Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet®
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

CITCA

MEMORIAS DEL

4TO CONGRESO INTERNACIONAL DE TECNOLGíA Y CIENCIA APLICADA

Cuernavaca Morelos, México del 21 al 23 de mayo de 2025

“Avances en investigación y Desarrollo Tecnológico”

ISBN: En trámite

BIENVENIDA

El Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) presenta el **4.° Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA),** el cual se consolida como un espacio fundamental para compartir avances en investigación aplicada y desarrollo tecnológico, así como para fomentar el análisis crítico en un entorno de respeto, apertura y colaboración entre especialistas, investigadoras, investigadores, estudiantes y profesionales del área.

Esta memoria tiene como objetivo generar un diálogo constructivo que promueva la creación de redes de colaboración y fortalezca las capacidades científicas y tecnológicas de nuestro país. Estamos convencidas y convencidos de que encuentros como este contribuyen de manera significativa a la construcción colectiva del conocimiento y al impulso del desarrollo nacional.

En esta edición se recibieron **316 contribuciones**, de las cuales **158 fueron aceptadas** para su publicación en la **memoria del congreso** (74 artículos y 84 carteles), y **93 contribuciones** fueron seleccionadas para su publicación en la **Revista de Tecnología y Ciencia Aplicada** (ISSN: 2992-8338). Además, se llevaron a cabo **seis conferencias magistrales** y **12 talleres precongreso**. Como parte del reconocimiento a la excelencia académica, se otorgaron premios a los mejores artículos y carteles presentados.

De manera especial, este año se celebró el **Primer Torneo Nacional de Robótica "ROBOTCITCA"**, con la participación de más de **400 robots** provenientes de diversas instituciones del país. Las y los ganadores de cada categoría fueron reconocidos con certificaciones internacionales que les permitirán representar a México en competencias en **Rumania y China**.

Agradecemos al **Tecnológico Nacional de México** por su permanente respaldo a este tipo de iniciativas académicas y científicas. Extendemos un especial reconocimiento al **Dr. Manuel Adam Medina**, presidente del comité organizador, así como al equipo editorial, personas revisoras y al gran equipo de trabajo que, con compromiso y dedicación, hicieron posible la realización de este congreso.

Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento a quienes impartieron las conferencias magistrales:

- **Ing. Nereida Ramírez**, Distribution Channels Manager, Rhode & Schwarz.
- **Ing. Eduardo Isaac López García**, Rohde & Schwarz.
- **M. C. Felipe Antonio Román Albores**, CEO, LENDUS.
- **M. C. Luis Conde López**, CENACE.
- **Dr. Jesús Olayo Lortia**, Director de Posgrado, Investigación e Innovación, TecNM.
- **M. C. Erasmo Cadenas Calderón**, Facultad de Ingeniería Mecánica, UMSNH.

Gracias por compartir su experiencia y conocimientos con la comunidad participante; estamos seguras y seguros de que sus aportaciones serán de gran utilidad.

Reconocemos el esfuerzo y dedicación del **Comité Organizador** y del **Comité de Personas Revisoras**, cuyas evaluaciones y sugerencias enriquecieron significativamente las contribuciones recibidas. Agradecemos también al **Comité Organizador Estudiantil** por su entusiasmo y colaboración constante durante todo el evento.

Finalmente, nuestro mayor agradecimiento es para **las autoras y los autores**, ya que son ustedes quienes hacen posible este congreso. Su participación es la esencia misma de este encuentro académico.

Reserva de Derechos

La presente edición electrónica de las Memorias del *Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA)* incluye trabajos pertenecientes a diversas áreas del conocimiento, entre las que se encuentran: Ingeniería Electrónica, Ciencias Computacionales, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Mecatrónica, Ciencias de la Ingeniería y otras disciplinas afines dentro del ámbito de la ingeniería.

Cubriendo las siguientes áreas prioritarias nacionales:

- Cambio Climático
- Economía Circular
- Desarrollo Sostenible
- Educación y Cultura
- Electromovilidad
- Inteligencia Artificial
- Tecnología 5.0 y Ciencias de Datos
- Sistemas Socioecológicos
- Vivienda
- Sistemas agroalimentarios sustentables
- Salud
- Gestión del Agua
- Eficiencia Energética / Energías Renovables
- Agentes Tóxicos y Procesos Contaminantes

Los autores que participan en esta publicación han otorgado su consentimiento expreso al Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET) para la difusión de sus contribuciones en esta memoria electrónica, correspondiente al CITCA, celebrado del 21 al 23 de mayo de 2025.

Asimismo, los autores declaran que los trabajos presentados son originales, producto de su autoría, y que no infringen derechos de terceros. Asumen plena responsabilidad por el contenido, veracidad y originalidad de los mismos, deslindando de toda responsabilidad legal, ética o académica al comité editorial de esta memoria.

Derechos Reservados

Junio de 2025

Memorias del Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA)

© Tecnológico Nacional de México

Avenida Universidad No. 1200, 5° piso, Colonia Xoco, Alcaldía Benito Juárez

C.P. 03330, Ciudad de México, México

Todos los derechos reservados. Las opiniones, análisis y resultados expresados en los trabajos aquí reunidos son responsabilidad exclusiva de sus respectivos autores y no reflejan necesariamente la postura institucional del TecNM o del CENIDET.

Se autoriza la reproducción parcial o total del contenido incluido en esta memoria, siempre que se cite adecuadamente la fuente y que dicha reproducción tenga fines estrictamente académicos y no lucrativos.

AVANCES EN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

MEMORIAS DEL

4TO CONGRESO INTERNACIONAL DE TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA, 2025

MESA DIRECTIVA

Lic. Lorenzo Octavio Hernández Robles Arenas

Director de CENIDET

Maestra Rosa Olivia Maquinay Díaz.

Subdirectora de Servicios Administrativos del CENIDET

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza

Subdirector Académico del CENIDET

CP. Erika Yaneli Bahena Flores

Subdirectora de Planeación y Vinculación del CENIDET

Dr. Jarniel García Morales

Jefe de Departamento de Ingeniería Electrónica del CENIDET

Dr. Manuel Adam Medina

Organización General del CITCA

Comité editorial

Editora General

Dra. Marisol Cervantes Bobadilla

Editor de Memoria

Dr. Jarniel García Morales

Editores Asociados

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo

Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda

Maestra. Nayeli del Milagro Hernández Barba

Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez

Dr. Andrés Blanco Ortega

Dr. Juan Gabriel González Serna

Dr. Dante Mújica Vargas

Comité organizador

Lic. Lorenzo Octavio Hernández Robles Arenas

Director de CENIDET

Maestra Rosa Olivia Maquinay Díaz.

Subdirectora de Servicios Administrativos del CENIDET

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza

Subdirector Académico del CENIDET

CP. Erika Yaneli Bahena Flores

Subdirectora de Planeación y Vinculación del CENIDET

Dr. Jarniel García Morales

Jefe de Departamento de Ingeniería Electrónica del CENIDET

Dr. Manuel Adam Medina

Organización General del CITCA

Dra. Marisol Cervantes Bobadilla

Editora General

Dr. Jarniel García Morales

Editor de Memoria

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo

Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda

Maestra. Nayeli del Milagro Hernández Barba

Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez

Dr. Andrés Blanco Ortega

Dr. Juan Gabriel González Serna

Dr. Dante Mújica Vargas

Editores Asociados

Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez

Dra. Mónica Borunda Pacheco

Conferencias Magistrales

Dr. Vicente Borja Jaimes

Dr. Abisai Acevedo Quiroz

Programa de Talleres

Maestro Víctor Josué Ruíz Martínez

Dr. Vitervo López Caballero

Sistema WEB

Maestro Emmanuel Olmos Barba

Diseño Gráfico del Congreso

Lic. Xóchitl Peña Adán

Maestra Daniela Hernández Castañeda

Lic. Silvia Ortiz Fuentes

Lic. Reyna Martínez Ávalos

Lic. Ana Karen Camarillo Salgado

Ing. Christopher Garduño Corona

Arreglos Locales

Comité arbitraje

Abisai Acevedo Quiroz
Alejandra Guadalupe Silva Trujillo
Alfredo De La Barrera González
Alfredo Terrazas Porcayo
Alicia Martínez Rebollar
Ana Odilia Martínez Hernández
Andrea Magadán Salazar
Andrés Blanco Ortega
Ángel Rodrigo Guadarrama Estrada
Angélica Monserrat Velázquez Hernández
Antonio Juan Capistran Abundez
Areli Marlen Salgado Delgado
Arístides Caballero Alfaro
Arturo Abúndez Pliego
Arturo Javier Martínez Mata
Blanca Dina Valenzuela Robles
Blanca Lucero Xopo Rodríguez
Camilo Leonardo Sandoval Rodríguez
Carlos Daniel García Beltrán
Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Carlos Manuel Lara Barrios
Cecilia-Irene Loeza-Mejía
Cesar Humberto Guzmán Valdivia
Cristina Blanco González
Daniela Hernández Castañeda
Dante Mujica Vargas
Dolores Azucena Salazar Piña
Eddie Helbert Clemente Torres
Edgar Omar Bañuelos Lozoya
Efraín Simá Moo
Eladio Martínez Rayón
Elías Ramos
Eliel Rafael Romero García
Eligio Flores Rodríguez
Emmanuel Olmos Barba
Enrique Alcudia Zacarías
Enrique Quintero Mármol Márquez
Erik Rosado Tamariz
Erika Darnely Rojas Ayala
Esther Lugo González
Ezequiel Domínguez Lagunas
Felipe Noh Pat
Fredi Alegría
Fredy Juárez Pérez
Gabriela Hernández-Luna
Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
Giner Alor Hernández
Gloria Lilia Osorio Gordillo
Héctor Miguel Buenabad Arias
Héctor Ramón Azcaray Rivera
Iris Lizeth Hernández Solís
Isay Obet Huicochea Ríos
Israel Isaac Zetina Ríos
Ivan Alcalá Barojas
Iván Antonio Juárez Trujillo
Jarniel García Morales
Javier Ortiz
Javier Uriarte Flores
Jesús Darío Mina Antonio
Jesús Emmanuel Solís Pérez
Jorge Alberto Fuentes Pacheco
Jorge Aurelio Brizuela Mendoza
Jorge Bedolla Hernández
Jorge Colín Ocampo
Jorge Edmundo Mastache Mastache
Jorge Misael Ruiz Martínez
José Alfredo Hernández Pérez
José Hugo Arellano
José Luis Rodríguez Pliego
Juan Carlos Rojas Pérez
Juan Gabriel González-Serna
Juan José Acevedo Fernández
Julia Patricia Melo Morín
Julia Jazmín Arana Llanes
Julio César González Juárez
Karime Baltazar Alcaraz
Katya Rodríguez Vázquez
Leonor Zavaleta Avejar
Lucero De Montserrat Ortiz Aguilar
Luis Enrique Calatayud Velázquez
Ma. Del Carmen Toledo Pérez
Ma. Guadalupe López López
Macdiel Emilio Acevedo Quiroz
Manuel Adam Medina
Manuel De Jesús Palacios Gallegos
María De Los Ángeles Cosío León
María Fernanda De Jesús Ramírez
María Susana Ávila García
Mario Andrés Aguilar Orduña
Mario Ponce Silva
Marisol Cervantes Bobadilla
Marisol Coba Martínez
Máximo López Sánchez
Melina Velasco Plascencia
Miguel Alberto Domínguez Gurría
Miguel Ángel Chagolla Aranda
Miguel Ángel Ruiz Jaimes
Miriam Antonia Chavarría Santibáñez
Mónica Borunda Pacheco
Nayeli Del Milagro Hernández Barba
Noé Alejandro Castro Sánchez
Noel García Díaz
Paola Andrea Niño Suarez
Rafael Campos Amezcua
Raúl Pinto Elías
René Santaolaya Salgado
Reynaldo Ángel Serrano Cruz
Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Roberto Alvarado Juárez
Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Roger Alejandro Cundapí Arroyo
Sandra Eloisa Rangel Estrada
Sara Lilia Moya Acosta
Semadar Bojorquez Sánchez
Susana Silva Martínez
Vicente Borja Jaimes
Víctor Hugo Olivares Peregrino
Víctor Josué Ruiz Martínez
Víctor Manuel Alvarado Martínez
Víctor Manuel Zezatti Flores
Víctor Miguel Salinas Cortés
Vitervo López Caballero
Wendy Netzy Hernández Díaz
Yadira Toledo Navarro
Jazmín Hernández Pérez
Yessenia Olazo Gómez
Yvonne Chávez Chena
Zully Vargas Galarza

Comité organizador estudiantil

Responsables del comité organizador estudiantil

Andrea Alejandra López Barreto
Ángel Uriel Córdova Ávila
Arturo Daniel Espinosa Pedroza
Carlos Daniel Urbina Alonso
Ildester Sánchez Ruiz
Luis Enrique Calatayud Velázquez
Marisol Coba Martínez
Yurika Toledo Sánchez

Comité organizador estudiantil

Adrián Emmanuel Guzmán Estrada
Alan Jair Gamboa Escobar
Alejandro Almaraz Martínez
Alejandro Álvarez Organista
Alexis Cazares Vidal
Aline Cecilia Casales Castro
Andrea Sánchez Ruiz
Ángel Alfredo Aguilar Álvarez
Antonio Juan Capistran Abundez
Arístides Caballero Alfaro
Blanca Lucero Xopo Rodríguez
Brenda Fernanda Lozano Pérez
Christian Sebastián Gutiérrez Arce
Cristian Clemente Macías Martínez
Cynthia Loeza de la Cruz
Daniel Cervantes Bobadilla
Daniel Romero Vergara
Daniela Estrada Severiano
Dara Naomi Ventura Guzmán
Delvis Estrada Ruíz
Diana Guillén López
Eduardo Alejandro Martínez Trejo
Elías Ramos Hernández
Emiliano Vázquez Albarrán
Emmanuel Sánchez Gómez
Erick Galicia Vargas
Erick Mejivan Guzmán
Fidelina Guadalupe Hernández Ramírez
Hugo Coello Sánchez
Hussein Antonio Peña Colli
Iván Bonifacio Hernández Hurtado
Ivetteh Virginia Medina Medina
Javier Alejandro Moreno Valdés
Joaquín Hernández Santiago
José Carrasco García
Josefina Jiménez Juárez
Joselyn Leyva Luciano
Juan Manuel González Rivera
Karen Yanine Román Miranda
Karime Baltazar Alcaraz
Laura Elena Hernández Pardiñas
Lázaro Alberto Rodríguez Loza
Leila Montserrat Coyote Estudillo
Lluvia Arely López Primo
Luis Alberto Orihuela Martínez
Luis Alfonso Manzanares Quirós
Luis Felipe Rivas Mendoza
Magdalena Miraglia Núñez
Marco Antonio Salazar Irazoque
María Fernanda De Jesús Ramírez
Marifer Jiménez Luna
Miguel Arturo Meneses Arcos
Mónica Cristal Girón Colín
Nayeli Adarely Arizmendi Juárez
Nilber Cruz Arias
Noel Núñez Cornejo
Rafael Guadalupe Solano Góngora
Reynaldo Ángel Serrano Cruz
Sandra Yaraset Vara Salas
Santiago Ramírez Capote
Vianey Rivera Altamirano

Moderadores

Juan Gabriel González Serna
Rafael Campos Amezcua
Andrés Blanco Ortega
Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
Vicente Borja Jaimes
Abisai Acevedo Quiroz
Noé Alejandro Castro Sánchez
Edgardo de Jesús Carrera Avendaño
Erik Rosado Tamariz
Mónica Borunda Pacheco
Víctor Hugo Olivares Peregrino
Rosa Olivia Maquinay Díaz
Yvonne Chávez Chena
Hugo Estrada Esquivel
Gloria Lilia Osorio Gordillo
Miguel Ángel Chagolla Aranda
Juan Carlos Rojas Pérez
Nayeli del Milagro Hernández Barba
Manuel Adam Medina
Eladio Martínez Rayón

Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Andrea Magadán Salazar
Blanca Dina Valenzuela Robles
Claudia Cortés García
Abraham Claudio Sánchez
Marisol Coba Martínez
Marisol Cervantes Bobadilla
Ivan Antonio Juárez Trujillo
Juan Reyes Reyes
Jarniel García Morales
Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Cándido Manuel Juárez Pacheco
Yesenia Reyes Severiano
Silvia Muñoz Moreno
Enrique Quintero Mármol Márquez
Arturo Abúndez Pliego
Yessenia Díaz Álvarez

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. ARTÍCULOS

Synthesis of PVDF/Carbon Dots Films for UV Protection Sensing 2
Reséndiz Mendoza, Ángel Olaf, Hernández Rivera, Daniel, López Ramírez, Nohemi

Early Warning System Based on IoT and Satellite Connectivity for Disconnected Rural Communities 8
Juárez-Pérez Fredy, Osorio-Antonia José, Aguilar-Meléndez Armando, Diaz-Ortega Rosario, Juárez-Reyes Fernando, Olivares-Cruz Janeth

CO2 Capture Analysis by Chemical Absorption using MDEA 12
Sánchez Ruiz Ildester, Cervantes Bobadilla Marisol, García Morales Jarniel, Vargas Méndez Rodolfo Amalio, Arce Landa Jesús, Olmos Barba Emmanuel, Adam Medina Manuel

Advances and Challenges in the Implementation of Renewable Energy for Sustainable Development 18
Pérez Arroyo Juan Pablo, Gonzáles Meneses Giselle Guadalupe, Romero Contreras Ana Clara

Asphalt Mixture Combined with Electronic Scraps 24
Alonso Gaeta, Reynaldo, Figueroa Hernández, Luis Ángel, Zúñiga Neria, Guillermo Capistrano

State of the Art on Sustainable Technology Use in Administrative and Operational Processes in Mexican Universities 29
Leyva Luciano Joselyn, Olmos Barba Emmanuel, Castro Sánchez Noe Alejandro, Baltazar Alcaraz Karime

Mechatronic design of a semi-automatic liquid mixing machine 34
Raúl Jiménez-Ramírez, Gloria Inés Estrada-Matus, Jorge Méndez-Valencia, Mariana Castillejos-Raymundo, Kevin de Jesús Hernández-Montes, Carlos García-Rodríguez, Alejandra Velarde-Galván

Implementation of Aerospace Standard 9145 in New Product Development 40
Acuña Ruiz, Enrique S., Velázquez Victorica Karla I., López Guerrero Aída, Olivares Fong Luz, Montoya Alcaraz Marco A.

From Waste to Fuel: Softening Polymer Purges for Pyrolysis 46
Arias San Elías, Alejandra, Becerra Rodríguez, María Blanca

Open-Source Technology for Industrial Automation of a Hydraulic Cylinder Driven by a Servovalve 51
Vazquez Aguilar, Juan Alejandro, Torres del Carmen, Felipe de Jesús, Plascencia Mora, Héctor, Cano Lara, Miroslava, Balvantín García, Antonio de Jesús

Digital Platforms: An Adoption of Technologies to Promote Tourism in the Huetamo Region of Michoacán 57
Dra. Mariela Yanin Magaña Gutiérrez, Dr. Carlos Reyes Dueñas, Mtro. José Antonio Sotelo Aguirre

Analyzing Burnout in Higher Education: A Case Study by Academic Discipline Using Generative AI Techniques 62

Ruiz Jurado, Aldo Carlos, Romero Flores, Edna Araceli, Elizabeth Eugenia Díaz Castellanos, Ruiz Ochoa, Arturo, Aguire y Hernández, Fernando, Omar Juarez, Rivera, Ruiz Jurado, Arturo

Development of an Educational Robot for Teaching Basic Mathematics 67
Quero Alavez, Alan Artemio, Bravo Ortiz, Alberto, Aguilar León, Cristian Jair, Navarro Martínez, Fernando Abel, Lugo González, Esther

Development of a Mobile Robot Navigation Technique using image processing 73
Navarro Martínez, Fernando Abel, Aquino Juárez, Blanca Rosario, Lugo González, Esther

Georeferencing of the Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala Using Augmented Reality 79
Ramirez Pastrana, Abigail, Couoh Novelo, Miguel Ángel, Rodríguez Rodríguez, Sara

A Review of Multi-Agent Systems for Quadcopter Control: LPV and LTI Approaches 85
Estrada Téllez, Dryden, Espinosa Pedroza, Arturo Daniel, Adam Medina, Manuel, Huicochea Ríos, Isay Obet

Innovation without Connection: Mobile Robotics App for Communities 90
C. J. Mendoza Cruz, A. Sánchez Cruz, I. I. Zetina Rios, R. Pacheco Sánchez, D. A. Serrano Cruz

Contrasting Renewable Technologies through Life Cycle Analysis (LCA) 96
Morales Ramírez Ulises, Gómez Lemus Teresa, Ramírez López Raul, González Huitron Victor

Review: Advances in Green Hydrogen Technologies, Storage and Applications 101
Toledo Sánchez, Yurika, Cervantes Bobadilla, Marisol, García Morales, Jarniel, Adam Medina, Manuel, Borunda Pacheco, Mónica, Gamboa Escobar, Alan Jair

Evaluation of Heat Transfer in Solar Ventilation Systems Applied to Energy Efficiency in Buildings 107
Méndez Rosique, Cristian Antonio, Torres Aguilar, Carlos Enrique, Aguilar Castro, Karla María, Macias Melo, Edgar Vicente, Pérez Olán, isa Yadira

Performance Evaluation of Photovoltaic Panels Integrated with Passive Cooling Systems 113
Angulo Castellanos, Jesús Kalep, Torres Aguilar, Carlos Enrique, Macias Melo, Edgar Vicente, Aguilar Castro, Karla María, Ramírez Hernández, Julio César

Application of a Standardized Protocol for Temperature Sensor Calibration Based on ASTM E-220 119
Cruz Pascual, Giuliani Emmanuel, Macias Melo, Edgar Vicente, Aguilar castro, Karla María, Torres Aguilar, Carlos Enrique, Pérez Olán, Isa Yadira

Experimental Study Of Heat Transfer In A Solar Still With Phase Change Material 125
Félix Félix, Adán, Piña Ortíz, Armando, Maytorena Soria, Víctor, Moreno Velázquez, Saúl, Iriarte Cornejo, Cuitláhuac

FEM analysis for stresses and deformations of a wind turbine 131
Garcia Vidal Ana Yatziri, Dr. Badillo Ruiz Carlos Alberto, Cruz Mendoza Jesus

Electronic Instrumentation Platform for Wireless Signal and Dynamic Systems Analysis 136
Amaya Martínez, Israel, Torres Mendoza, Manuel Enrique

Design and construction of an electrical conductivity measurement system for polymeric proton exchange membranes 141
Juan Carlos Carranza Cruz, Roberto Fernando Medina Juárez, Celso Hernández Tenorio, Hilda Moreno Saavedra, Ismael Cosme Torres, Omar César Díaz Lobatón

Design and Implementation of an IoT-Based Remote Light Quality Monitoring System 147
Marifer Jimenez Luna, Jorge Salvador Valdez Martínez, Iván Alcalá Barojas, Luis Jaime López Vega, Enrique Contreras Calderón, Guillermo Ramírez Zúñiga

Aerothermodynamic Design Of An Axial Compressor Developed With The Free Vortex Methodology 153
Gonzalez-Neria, Israel, Arreola Robles, Susana M., Contreras Nuñez, Erika, Alonzo-Garcia, Alejandro, Martínez-Delgadillo, Sergio A., Huerta Chávez, Oliver M.

Analysis of the electrical of the Gerencia de Control Regional Oriental (GCROri) 159
Alejandro Alvarez Organista, Mónica Borunda Pacheco, Carlos Daniel García Beltrán, Manuel Adam Medina

Economical Optimization of Surface Coverage of a Grid-Connected PV System in the Residential Sector 165
Guzmán García Adriel Eduardo, Borunda Pacheco Mónica, Adam Medina Manuel, García Beltrán Carlos Daniel

Methodological Proposal for Predicting Demand at Electric Vehicle Charging Stations Using Random Forest 171
González-Lorence, Armida, López-Castillo, Hernesto M., Navarrete-Fernández, Ángel C., Morales-Morales, Cornelio, Mondragón-Solís, Ana L., Ascencio-Laguna, José A.

Design of a Control Strategy for a Magnetic Reciprocating Engine 177
Alegría Gómez, Raúl, Espinosa Pedroza, Arturo Daniel, García Morales, Jarniel, Escobar Jiménez, Ricardo Fabricio, Guerrero Ramírez, Gerardo Vicente, Adam Medina, Manuel

Design and Implementation of a Steer-by-Wire System with CAN Bus Communication and Fault Detection 183
Juan Daniel Soriano-Colmenares, Arturo Hernández-Méndez, José Antonio Moreno, Carlos García-Rodríguez

PESTEL Analysis Approach through Interactive Dashboards for the Analysis of Electric Vehicle Adoption in Metropolitan Areas of Mexico 189
Alarcón Ruiz Erika, Reyes García Brenda Lizeth, Soto Hernández Ana María, Camero Berrones Rosa Gabriela, Reyes Méndez Victoriano, Rodríguez Zapata José Francisco Franklin, Liñan Valdez Melanie

Modeling and Speed Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Applications 193
Esteva Pérez, Roosemvelt, Lezama Ramírez, Alfredo, Borja Jaimes, Vicente, Guerrero Ramírez, Gerardo Vicente

Comprehensive Analysis of Drinking Water Leak Management in Urban Networks 198
Edgar Pérez Arriaga, Erika Alarcón Ruiz, Jesús Federico Mauricio Ruiz, Luis Daniel Ordóñez Pacheco, Martha Elena Mejía Maldonado, Luis Antonio Vázquez Ochoa

Platform for Signal-to-Text Conversion Using Machine Learning Techniques 204

Rafael Magaña-Rangel, Iván Alfonso Reyes-Portillo

Classification of Motion Patterns in Production Processes through Industrial Computer Vision 210
Oscar Evaristo Pérez Becerra, Valentín Calzada Ledesma, Armando Mares Castro, Marcela Palacios Ortega, José Ramón Gómez Armenta

Proposal for a Methodology to Measure the Impact on Science and Society of Self-Admitted Technical Debt in Deep Learning Frameworks 216
Cuatecontzi Cuahutle Elizabeth, Medina Barrera María Guadalupe, Cortes Maldonado Raúl, Bueno Avendaño Carlos

A Proposal for the Characterization and Dimensionality of Self-Admitted Technical Debt of Requirements 222
Sánchez Hernández, María Janai, Medina Barrera, María Guadalupe, Ramírez Cruz, José Federico, Pedroza Méndez, Blanca Estela

Deep Neural Network Training with Synthetic Data for BMI Classification 227
Velázquez Dodge Charles Fernando, Xochimanca Tapia Eduardo, Ayala Coapango Ana Luisa, Torres Gómez Georgina, Leyva Varela Paola

Design of a Three-Phase Inverter Controlled by an Artificial Neural Network Based on Model Predictive Control to Three-Phase Inductive Wireless Power Transfer 232
Tirado Torres, Germán, Ramírez Hernández, Jazmín, Hernández González, Leobardo

Intelligent Software Testing Property-Based Automation by Prompt Engineering 238
Gil Garcia Erven German, Quintero Meza Ricardo Rafael

Deep Learning Models to Detect Cervical Cancer in Cells Images: A Literature Review 242
García García, Luis Rodolfo, Hernández Pérez, María Yasmín, Ortiz Hernández, Javier

Multivariate temperature prediction using deep learning 248
Allan Mizael Jiménez Fernández, Juan Javier González Barbosa, Erika Alarcón Ruiz, Juan Frausto Solís, Mirna Patricia Ponce Flores

Artificial Intelligence to Predict Energy Production in Sediment Microbial Fuel Cells 254
Prieto Alvarado Rogelio, Rodríguez Rangel Héctor, Blenda Ramírez Pereda, Feregrino-Rivas Marlenne

Trash Collection Robot: An Educational Autonomous Vehicle for Waste Sorting in Schools 260
Gonzales Sánchez, Marco Antonio, Nicolas Peña, Daniel

Self-Regulated Learning Models in Intelligent Learning Environments: a literature review 266
Miguel Couoh-Novelo, Yasmín Hernández, Javier Ortíz-Hernández

Automated IoT System for Vertical Hydroponics at Home with Real-Time Monitoring and Control 271
Reyes Ruíz, Yazmin, Toledo Espinoza, Luis Eddie, Moreno Moreno, Christopher Yahir, Vicente Pérez, José Julián, Vázquez Albores, Luis David, Díaz Hernández, Carlos Alberto, Hernández Mendoza, Alonso Guadalupe

Uso de la IA como una manifestacion Extrema de la Sociedad del Rendimiento: Un ¿Aliado o complice de la autoexplotación estudiantil ? 276

Martinez Ortega, Jonatan Daniel

Measurement of impedance in different states of skin 282
Ruelas Vázquez, Víctor Manuel, Prado Olivarez, Juan, Gómez Cortés, Juan Carlos, Barranco Gutiérrez, Alejandro Israel, García Muñoz, Jorge Alberto

Implementation of an Administrative Management System for Patient Control in a Physiotherapy and Rehabilitation Clinic after COVID-19 in Mexico 286
M. Y. Vega-Flores, M.Z. Sanchez-Hernandez, J.S. Tellez-Martinez, A.A. Pintor-Estrada, J.C. Gonzalez-Juarez

Stereoscopic Vision for Functional Electrical Stimulation Applications 292
Martínez Díaz, Saúl, González Graniel, Estefanía

Development of a Gesture-Controlled Robot Assistant for Transporting Oxygen Tanks 298
Guadalupe Salas, Jesús Ivan Contreras, Abril Jiménez, Juan Manuel Hernández

APPSI: Extraction, Analysis, and Visualization Platform of Georeferenced Data Related to Mental Health 302
Gandhi Hernández-Chan, Matilde Jiménez-Coello, Manuel Sosa-Correa, Sally Vanega-Romero

User interface for artificial pancreas using a hardware-in-the-loop system for signal monitoring 308
Alvares Gonzalez, Martha Betsabe, Jaimes Pérez, Josué Iván, Ramirez Rasgado, Felipe, Astorga Zaragoza, Carlos Manuel, Arroyo Trejo, Erandi Alejandra

Deep Learning-Based Semantic Segmentation of Skin Lesions Using Pre-Trained Models 313
García Ramírez, Fernando, González Huitrón, Víctor Alejandro, Guzmán Rivera, Miguel Ángel, Montante Garza, Mario Alberto, Gorrostieta Hurtado, Efrén

Analysis of Pressure Distribution in a Seat during Seated Posture of the Human Body 319
Carmona-Ruiz, Deisy, Navarro-Martínez, Fernando Abel, Lugo-González, Esther

Algorithm Using Steganography Techniques for Security, Integrity and Authentication of Clinical Data in Imaging 325
Nuñez Ramirez, Diana, Sánchez Diaz, Aimee Amalinalli, Reyes Gordillo, Jonathan Daniel

Entomopathogenic Nematodes Steinernema glaseri Protected with Zinc Oxide Nanoparticles Against Ultraviolet Radiation 329
Cortés Martínez, Carlos Inocencio, Hernández Ramírez, Cecilia, González Arango, Fabiola, Ruiz Robles, Amairani Marlenne, Ávila López, Mariana Beatriz, Martínez Salgado, Rita Teresa

Real Time Monitoring and Control IoT System for an Earth Worm Breeding Bed 333
Ortega Castillo, Diana Alejandra, Ponce Monarrez, Israel Ulises

Optimization of food traceability through emerging digital technologies for food security 338
Pérez Gómez, Alí, Vela Rosas, Soemi del Carmen

Distributed Ledger Technologies for the Public Sector: A Methodological Approach for Implementation. 344
Orihuela Hernández Vladimir, Ortiz Hernández Javier, Hernández Pérez Jazmín, González Serna Juan Gabriel

Development of a Web-Based Information System for Strategic Decision-Making in Integrative Centers 350
Priego Clemente, Antonio, Hernandez Arias, Clemente, Diaz Villanueva, Felix, Arias Peregrino, Victor Manuel, Romellon Cerino, Mario José

Optimization of the cassava chip and bagasse drying process using the DMAIC methodology focused on Six Sigma 356
Valdés Álvarez Alejandra C., Hernández Sánchez Luis Alberto, González González Eric

Post-Quantum Digital Signature Model for Blockchain Using Xmss and Merkle Trees 362
García Reyes René, Ortiz Hernández Javier, Hernández Aguilar José Alberto, Mijarez Castro Rito, Hernández Pérez Yasmín

Estimation and Recording of Visual Depth Using a Camera and a Point Laser 368
Jiménez Díaz, Gilberto, Sólis Sánchez, Luis, Castañeda Miranda, Celina, Martínez Blanco, Rosario, Moreno Lucio, Mireya, Olvera Olvera, Carlos, Aguilar Ríos, Jazmín

Using Process Products for Business Process Integration 373
Eyzel Aritzu Valencia Tapia, Olivia Graciela Fragoso Díaz, Juan Carlos Rojas Pérez, Nimrod González Franco

Computer Vision for Workplace Safety: Automated Detection of Face Masks and Helmets 379
Flores Arcos, Daniel Misael, Barragán Pérez, Omar, Limón Hernández, Martha Eugenia, Sánchez Jiménez, Miguel, Odriozola Avilés, Emmanuel, Alcántara Pérez, Juan

LabVIEW interface implementation for data acquisition in real time monitoring of ceramic materials using dielectric spectroscopy 383
Adame Téllez, David Ulises, Prado Olivarez, Juan, Espinosa Calderón, Alejandro, Benítez Castro, Angélica, Muñoz Saldaña, Juan, López Kinney, Kevin Gerald

Prototype IoT System for Vibration and Temperature Analysis in Resin 3D Printers 389
Macias González, Erick Adrian, Ponce, Israel U

Segmenting LAN Traffic by Implementing Port-based VLANs as a Management Improvement Strategy 395
Hernández Arias, Clemente, Priego Clemente, Antonio, Díaz Villanueva, Felix, Arias Peregrino, Víctor Manuel, Remellón Cerino, Mario José, Villanueva Guzmán, Jorge Ceín

Factors Influencing the Estimation of Software Projects in DevOps Environments 400
Bueno Najera Esteban, Valenzuela Robles Blanca Dina, Santaolaya Salgado René, Hernández García Humberto.

CAPÍTULO 2. PÓSTER CIENTÍFICO

Análisis espacial y temporal de gases contaminantes 408
Juan Francisco Escudero Villegas, Josué Daniel Rivera Fernández, Ian Ilizaliturri Flores, Macaria Hernández Chávez, Diego Adrián Fabila Bustos, Gilgamesh Luis Raya

Transformación termohalina en el océano Antártico desde un enfoque de aprendizaje automático 409
Emmanuel Romero, Esther Portela, Laura Sánchez-Velaso, Leonardo Tenorio-Fernandez

Sistema de Producción de Hidrógeno Verde para uso Doméstico 410
Germán Hurtado Arellano, Cornelio Morales Morales, Octavio Rodríguez Garfias, Guadalupe Ángel Rodríguez Téllez, Jaime Navarrete Damián

Prototipo para Ascenso y Descenso de Superficies Cilíndricas 411
Ing. Rodrigo Adrián Gutiérrez Córdova, Dr. Francisco Gerardo Flores García

Análisis del Desarrollo de Celdas Solares Sensibilizadas por Colorantes en México 412
Oscar Uriel Mendoza Hernández, Ángel Custodio Navarrete Fernández, Cornelio Morales Morales

Evaluación de la actividad antifúngica e inhibición de la producción de esporas de especies de la familia Asteraceae 413
Alexei González-Arizmendi, José Francisco Carpio-Pineda, Macdiel Acevedo-Quiroz

Modelo de Planeación y Gestión de una Empresa Agropecuaria Caso: Empresa Miel Tierra Grande 414
A. Texta-Nogueda, M. Castro-Bello, L. Gómez-Muñoz, A. Bárcenas-Nava, C.V Marmolejo-Vega, A. Arzate-Salgado

La Construcción Vernácula Residencial en el Estado de Guerrero 415
C. Bello Pastor, M. Castro Bello, C. Morales Morales, C. V. Marmolejo Vega, D. Ángeles Herrera, A. Bárcenas Nava

Convección Natural de un Fluido en un Tubo Horizontal 416
Gerardo Ruiz Chavarría, Mónica Borunda Pacheco, Sergio Hernández Zapata

Modelado y control de temperatura del electrolito de un electrolizador alcalino 417
Arlett Adame Najera, Ricardo Fabricio Escobar Jiménez, Gerardo Vicente Guerrero Ramírez, Gloria Lilia Osorio Gordillo, Manuel Adam Medina

Estudio Comparativo de Mejoras a la Eficiencia de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos con Batería de Almacenamiento 418
Josefina Jiménez Juárez, Carlos Aguilar Castillo, Jaime Arau Roffiel

Condiciones de un Generador Diésel para un Sistema Híbrido en un Edificio Educativo 419
M.C.I.E. Daniel Alejandro Pérez Uc, Dra. Susana Estefany De León Aldaco, Dr. Jesús Aguayo Alquicira., Ing. Mardero José Toledo Wong

Manejo de desechos sólidos usando tecnologías renovables 420
Diana Gabriela Aguirre-Ortiz, Gabriela Hernández-Luna, Rosenberg Javier Romero, Moisés Montiel González, Jesús Cerezo Román

Políticas Públicas para la Eficiencia Energética de Edificios Comerciales en México 421
J. Z. Nava -Salazar, M. Castro-Bello, C. Morales-Morales, L. Gómez-Muñoz, C. V. Marmolejo-Vega, D.E. Gutiérrez-Valencia

Dispositivo supresor del modo “standby” 422
David Flores Hernández, Luis Alberto Rubio Saavedra, Cynthia Arroyo Reyes

Políticas Públicas para la Eficiencia Energética de Edificios Escolares: Caso Tecnológico Nacional de México 423
J.A Ocampo-Pineda, M. Castro-Bello, L. Gómez-Muñoz, C.V. Marmolejo-Vega, A. Bárcenas-Nava,

D.E. Gutiérrez-Valencia

Motor reciprocante magnético bicilíndrico: Alternativa sustentable 424
Arturo Daniel Espinosa Pedroza, Manuel Adam Medina, Jarniel García Morales, Marisol Cervantes Bobadilla

Normatividad vigente y certificaciones que deben cumplir los miniautos eléctricos: transporte de pasajeros y mercancías 425
Nizarinati Reyes Alonso, Mirna Castro Bello, Lizbeth Gómez Muñoz, Carlos V. Marmolejo Vega, Cornelio Morales Morales

Formación de Membranas Dinámicas Electroconductoras en un Reactor Bioelectroquímico de Aguas Residuales 426
Wilver Montes Dorantes, Edson Baltazar Estrada Arriaga

Sistema de purificación de agua con nanotecnología 427
Claudia Jaqueline Floriano Limón, Braulio Yahir Delgado Flores, Carlos Fernando Sánchez García

Visión artificial aplicada a la gestión de imágenes históricas 428
Jazmín Aguilar Ríos, Luis Solís Sánchez, Celina Castañeda Miranda, Rosario Martínez Blanco, Mireya Moreno Lucio

Semáforo Inteligente para la evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas 429
A. Barrera-Azoños, M. Castro-Bello, W. Campos-Francisco, C. Morales-Morales, D. Ángeles-Herrera, S. R. Zagal-Barrera

Propuesta metodológica para un Sistema de Clasificación de Microalgas basado en Visión Computacional e Iluminación Multiespectral 430
Tobón-Villalva, Alfredo Nabor, González-Lorence, Armida, Espinosa-Calderón, Alejandro, Sancén-Plaza, Agustín, Flores-Gómez, Carlos Alberto

Safebridge 431
Jose Manuel Arias Hernandez, Sergio Samael Ramirez Morales, Rogelio Carrillo Ramirez

Análisis de la inmovilización de anticuerpos sobre película delgada de óxido de Zinc 432
Gazal Sánchez Emmanuel, Orduña Diaz Abdú, Domínguez Jiménez Miguel Ángel

Análisis de la eficacia de la repetición intrónica del gen C9orf72 como biomarcador diagnóstico de la ELA en pacientes mexicanos 433
Manuel Alejandro Villalobos Loredo, Janay Araí Bátiz Lara, Raquel Cuevas Díaz Durán

Versión Preliminar del Diseño de Pruebas Estandarizadas Digitalizadas de Detección de Demencia 434
Lluvia Arely López Primo, Daniela Hernández Castañeda, José Francisco Gómez Aguilar, Adela Hernández Galván

Evaluación de la actividad antimicrobiana de extractos etanólicos de Oenothera rosea contra Escherichia coli y Shigella flexneri 435
Yadira Citlali Rodríguez Jiménez, MNC. Ana María Alvarado Vásquez

Implementación de una aplicación web integrando E-publicidad para divulgación y concientización de las donaciones de sangre 436

Nava Fombona Gabriel, Vázquez Pantaleón Fco. Javier, Cuellar Rodríguez Megan Brillith

Nanoencapsulados a base de extractos antioxidantes de Byrsonima crassifolia como potencial efecto terapéutico contra el adenocarcinoma gástrico 437
Brenda Montserrat González Vázquez, Marlon Rojas López, María Eugenia Jaramillo Flores, Minerva Rosas Morales

Nanoencapsulación de extractos de café (Coffea arabica L.) para la inhibición del crecimiento bacteriano de Pseudomonas aeruginosa 438
M.C. Jessica Andrea Hernández Celis, Dr. Marlon Rojas López, Dra. Rocío Pérez y Terrón, Dra. Leslie Susana Arcila Lozano

Desarrollo de fármaco hipoglucemiante que regule a la enzima tirosina fosfatasa 1B (PTP1B), y su posible impacto en la regulación de la eñalización del receptor de insulina 439
Ana Brenda Ortega Morales y Jose Luis Vique Sanchez

Propuesta de Diseño de una Plantilla Instrumentada para la Detección Temprana de Pie Diabético 440
J. A. Rodríguez Cabello, C. Morales Morales, A. González Lorence, M. Castro Bello

Desarrollo de fármaco regulador de la hormona resistina, y su posible efecto en enfermedades crónicas 441
Kendry Callejas Camargo , Ana Brenda Ortega Morales y Jose Luis Vique Sanchez

Cadena de Suministro en el Proceso de Producción de Miel 442
Emily Bibiano Bartolo, Cornelio Morales Morales, Mirna Castro Bello, Miguel Ángel Bueno Pólito

Sistema de control de CO 2 utilizando PLC FX3U-56MR 443
Barojas-Vázquez, José Alonso, Malagón-González, Fernando,Núñez-Dorantes, Juan Carlos

Síntesis química y biológica de nanopartículas de cobre y óxido de cobre con fines agrícolas 444
Frida Escamilla Barragán, Marlon Rojas López, Ada María Ríos Cortés

Estructura de la Comunidad de Aves en Hábitats Ganaderos con Diferente Cobertura Arbórea en Tierra Caliente, Guerrero 445
C. Sandino García-Vega, Lucero Sarabia-Salgado, R. Carlos Almazán-Núñez, Moisés Cipriano-Salazar, Luis A Saavedra Jiménez, Isidro Gutiérrez-Segura, Díaz-Pineda, Yahir, Torres Mercado, Cristal

Reconocimiento de Números de Parte Mediante Procesamiento de Imágenes 446
Irán Alexandra Díaz Sandoval, Israel Ulises Ponce Monárrez, Ángel Israel Soto Marrufo, Guillermo Mejía Cisneros, Adriana Salinas Ávila

Diseño y Construcción de Sistema Electrónico de Medición para el Monitoreo de la Presión, Temperatura y Altitud con Materiales Alternativos al Plástico 447
López Sánchez César Adrián, Eduardo Mael Sánchez Coronado, Ginés Monterrosas Daniel, Martínez Apale Gerardo, Rodríguez de Rosas Ángel Rubén, Cruz Montalvo Luis Alberto.

Prueba Cualitativa de Bajo Costo para Boquillas de Impresión 3D, Basado en Patrones de Difracción. 448

Uriel Rivera Ortega

Propagación de ondas en un océano no homogéneo bajo una capa de hielo 449
Alan Ismael Vázquez Yáñez, Vladimir Rabinovitch, Raúl Castillo Pérez

Muros verdes alternativa sustentable y viable ante el cambio climático 450
Sandra Hernández, Gabriela Hernández, Roserberg Romero, Miguel Basurto, Liliana Marcelino

CAPÍTULO 3. PÓSTER DIVULGACIÓN

Comportamiento de Materiales Frente a la Exposición Radiactiva 452
Hernan Gonzaga Barcena, Dr. Carlos Alberto Badillo Ruiz, Luis Ángel Méndez Rodríguez

Modelado y control de un reactor helicoidal para la producción de biodiésel 453
Sandro Vazquez Maceda, Abisai Acevedo Quiroz, Manuel Adam Medina, Jarniel García Morales

Zacatepec, Morelos como zona potencial para el desarrollo de diésel sintético sustentable 454
Azazel Sinai García Morales, Marisol Cervantes Bobadilla, Jarniel García Morales, Nicolás Raymundo Calvo

Fabricación de un material composito con matriz de aluminio 6061 reforzado con cerámica residual 455
Vanessa Andrés Méndez , Dr. Orlando Soriano Vargas, Dr. Roberto López Ramírez, Dr. Jorge Edmundo Mastache Mastache, Dr. Tomas de la Mora, Dr. Nicolás Cayetano Castro

Modelado matemático de bioprocesos: una herramienta clave para la sustentabilidad y la bioeconomía 456
Ana Guadalupe Hernández Acevedo, Martín Rogelio Cruz Díaz, María Aurora Martínez Trujillo

Análisis de fuerzas de estrés mecánico que actúan sobre una máquina Trituradora de Plástico 457
Javier Samael Martínez Morales, Carlos Alberto Badillo Ruiz, Cristian Antonio Concha Reyes, Raúl Reyes Lim

Evaluación de Factores en Proceso de Biodegradación de Poliestireno 458
Eduardo García Ramírez, Alejandro Ruiz López, Ma. Elena Calixto Olalde , Varinia López Ramírez

Producción de papel ecológico a base de pasto común (Pennisetum clandestinum) 459
Diego Salazar Alvarez

Aplicaciones informáticas como herramienta para la gestión de residuos en el sector manufactura 460
Gabriela Maqueda Rodríguez

Prototipo de Máquina Secador de Hojas de Papel Reciclado 461
De la Cruz Ortigoza Mendez, Karla América Gómez Carreón, Andrea Sarahi Miranda Tlacomulco, Elpidio Guerra León

IEMS CONTABLE: Aplicación Web Educativa para la Simulación Interactiva de la Declaración Anual 462

Nadia Susana Correa Martínez, Alexander Martínez González, Vanessa Martínez Hernández, Rosa Guadalupe Mejía Mora, Cornelio Morales Morales

Estrategias de Enganche para el Aprendizaje, con Juegos Formativos y el Enfoque Didáctico Constructivista 463
Arístides Caballero Alfaro, Juan Reyes Reyes, Gloria Lilia Osorio Gordillo, Carlos Manuel Astorga Zaragoza, Rodolfo Amalio Vargas Méndez

Intervención educativa contecnología y redes sociales 464
Elena Tzetzangary Aguirre Mejía, Lilia Parada Morado, Silvia Viridiana Parada Ávila, Rocío Lorena Rodríguez Chacón, Francisco Eduardo Rodríguez Campo

"Planea con Inteligencia, Enseña con Vocación" Una herramienta que transforma la planificación docente para cada estudiante y cada contexto 465
Karla Nazareth Guerrero Sánchez, Luis Alejandro Reyes Trigos

Estudio y optimización de una celda de combustible de intercambio protónico mediante la implementación de un sistema de control y modelado 466
Diana Montserrat Antonio Gordillo, Betty Yolanda López Zapata, Manuel Adam Medina

Impacto de IOT/IA en la Eficiencia Energética 467
Aparicio Garcia William, Díaz Tapia José Ángel, García Escobar Delia Karen

Sistema Híbrido de Energías Renovables: Características y Beneficios en Comunidades Marginadas 468
Ing. Nilber Cruz Arias, Dra. Susana Estefany De León Aldaco, Dr. Jesús Aguayo Alquicira

Uso de Semiconductores como Variadores de Carga para Seguidor del Máximo Punto de Potencia de Módulos Fotovoltaicos 469
Marco Antonio Zúñiga Reyes, Carlos Eduardo Morales Jiménez, Karina Lizbeth Escobar Sánchez, Avisaí Sánchez Alegría, Sergio Iván Díaz Hernández, Roberto Carlos García Gómez

Importancia del Monitoreo y Diagnóstico de Fallas en Turbinas Hidrocinéticas en Canales de Agua 470
Fher Said Macedo-García, Jaime Arau, Manuel Adam-Medina, Manuel Rico-Secades

Comportamiento de una Placa de Hierro Expuesta a la Radiación Solar 471
Rafael Guadalupe Solano Góngora, Juan Reyes Reyes, Jesús Arce Landa

Diseño y Fabricación de un Horno Eléctrico 472
Jesús Adrián Chávez Vázquez, Jorge Barron Corrales, Viridiana Guadalupe García López,Enrique Saavedra Arroy

Combinando la energía del sol y del viento, ¡podemos obtener energía limpia para todos! 473
Andrea Alejandra López Barreto, Jarniel García Morales, Juan Reyes Reyes, Marisol Cervantes Bobadilla

Diseño de un Vehículo Terrestre no Tripulado (UGV) para Reconocimiento 474
Miguel Angel Reyes Lemus, Jesús Eduardo Acosta Hernandez, Sigfrido Oscar Soria Frias

Electromovilidad en México 475
Hernández Ruiz Alan Yabin, Susana Estefany De león Aldaco, Jesús Aguayo Alquicira, Gonzales Ortega Alfredo, Mina Antonio Jesús Darío

Motor de 2 cilindros que funciona por atracción/repulsión magnética 476
Arturo Daniel Espinosa Pedroza, Manuel Adam Medina, Jarniel García Morales, Marisol Cervantes Bobadil

Gamificación con Inteligencia Artificial para la Selección de Aspirantes: Un Enfoque Innovador e Inclusivo 477
Mónica Cristal Girón Colín, Daniela Hernández Castañeda, José Francisco Gómez Aguilar

Algoritmos de Aprendizaje Profundo para la Detección de Plagas en Cultivos de Maíz con Imágenes Satelitales 478
Andrea Sánchez Ruiz, Antonio Juan Capistran Abundez, Vitervo López Caballero, Noé Alejandro Castro Sánchez

El Futuro de la Búsqueda 479
Gloria Betzabeth Ventura Ramírez

Identificación inteligente de pinos: Una Herramienta para la conservación 480
Adan Cruz Garcia, Rosalba Pacheco Sánchez

Aplicación del Algoritmo Genético a Problemas de Optimización 481
Beatriz Martínez-Bahena, Jazmín Yanel Juárez-Chávez, Juana Enríquez-Urbano

Estrategia de Control Neuronal para la Concentración de Biodiésel 482
Daniel Moreno Galíndez, Marisol Cervantes Bobadilla, Abisai Acevedo Quiroz, Manuel Adam Medina

Control de Velocidad en Vehículos para Caminos Irregulares 483
M.C. Florencio Miguel Xicotencatl Paleta, Dr. Jarniel García Morales, Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez, Dr. Erik Rosado Tamariz

Sistema de fumigación para un dron de bajo costo 484
Isay Obet Huicochea Rios, Jarniel García Morales, Manuel Adam Medina, Marisol Cervantes Bobadilla

Películas a Partir de Biopolímeros/Extractos Naturales 485
Avril López Zepeda, Arely Monserrat Rangel Pacheco, Ma. Elena Calixto Olalde, Divanery Rodríguez Gómez

Matemáticas al servicio de la salud: Control de enfermedades infecciosas 486
M.C. Semadar Bojórquez Sánchez, Dra. M. Lourdes Gutiérrez Xicotencatl, Dra. D. Azucena Salazar Piña, Dr. Manuel Adam Medina

Monitoreo de Condiciones Ambientales en la Germinación de Jitomate (Solanum Lycopersicum) Mediante IoT 487
Vázquez Evaristo, Miriam, Ramírez Vicente, Gabriel Ángel, Montiel Rosales, Aarón, Montalvo Romero, Nayeli

Automatización de un sistema de CO2 488
Barojas-Vázquez, José Alonso, Malagón-González, Fernando, Navarrete-Hernández, Gabriel Antonio, Grande-Ramírez, José Roberto

Desarrollo de un Sistema MRO Administrado Mediante SAP en Área de Soldadura Fija para Empresa Witzenmann México 489

Sánchez – Ramírez, Félix Antonio, Cárdenas – Manríquez, Marcela, Villegas – Saucillo, J. Jesús

Automatización de Estudio De Tiempos en la Industria 4.0: Ingración de Visión Artificial y KNN 490

Marcela Palacios Ortega, Armando Mares Castro, Valentín Calzada Ledezma, José Ramón Gómez Armenta

Vehículos eléctricos: Su impacto en la movilidad sostenible y los desafíos en el almacenamiento y manejo de energía 491

Moisés Rendón Valdéz, Abraham Claudio Sánchez, Jarniel García Morales

México Sostenible: El Rol de los Aerogeneradores en la Transición Energética 492

José Toledo Wong, Susana De León Aldaco, Mónica Borunda Pacheco, Jesús Aguayo Alquicira, Elías Ramos Hernández, Alan Jair Gamboa Escobar

ARTÍCULOS

Synthesis of PVDF/Carbon Dots Films for UV Protection Sensing

Reséndiz Mendoza, Ángel Olaf*, Hernández Rivera, Daniel, López Ramírez, Nohemi*****

** Tecnológico de Estudios Superiores de Chimalhuacán, C. Primavera s/n, Col. Santa María Nativitas, Chimalhuacán, México, 56330. (e-mail: 2020152071@teschi.edu.mx).*

*** Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, Camino al Monte s/n, esquina con Camino a Tlalmimilolpan, Loma de Guadalupe, Chicoloapan, México, 56380 (e-mail: daniel.rivera@teschic.edu.mx)*

**** Colegio de Postgraduados, Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco, México, 56264 (e-mail: lopez.nohemi@colpos.mx)*

Abstract: This work presents the synthesis and characterization of PVDF/Carbon Dots (CDs) nanocomposite films for ultraviolet (UV) protection sensing applications. The CDs were obtained through a carbonization process using *Hibiscus sabdariffa* (roselle) leaves as a natural carbon source. These nanoparticles were dispersed in dimethylformamide (DMF) and subsequently integrated into a PVDF polymer matrix via the solution casting method. The resulting films were evaluated for their structural and optical properties, highlighting the fluorescence induced by the embedded CDs. A UV protection sensing test was implemented by analyzing the change in fluorescence intensity when the films were exposed to UV-blocking commercial products, including sunscreens, screen protectors, and eyewear. The results indicate that the nanocomposites are capable of qualitatively detecting UV-blocking efficiency, while also showing an improvement in dielectric properties with increasing CD concentration. These findings suggest potential applications of PVDF/CDs films in the development of low-cost, eco-friendly optical sensors for UV protection and contaminant detection. For future work, it is recommended to improve the image analysis process to achieve greater accuracy and reproducibility. Additionally, testing the films under different UV wavelength ranges would enable a broader evaluation of protection efficiency and facilitate the calculation of more quantitative UV-blocking percentages.

Keywords: Carbon Dots, Nanocomposites, Fluorescence, PVDF, UV Protection.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el desarrollo de nanomateriales ha revolucionado diversas áreas de la ingeniería y la ciencia. Dentro de estos avances, los Carbon Dots (CDs) han mostrado una amplia versatilidad debido a sus propiedades únicas como la fluorescencia, biocompatibilidad, y la facilidad de síntesis a partir de fuentes orgánicas renovables como hojas, flores y frutos (Sharma, Tiwari & Mobin, 2017; Ozyurt et al., 2023; Rojas-Valencia et al., 2021). Estos nanomateriales han sido ampliamente utilizados en diversas áreas, incluyendo la biomedicina (Sharma, Tiwari & Mobin, 2017), la detección de contaminantes (Torres Landa, Kaur & Agarwal, 2022; Bogireddy et al., 2020), la remediación del agua (Xiao et al., 2025), entre otras. Asimismo, se ha explorado su aplicación en sensores ópticos; aprovechando, por ejemplo, las propiedades fluorescentes de los CDs, en el desarrollo de sensores ópticos para la detección de metales pesados (Li & Li, 2021). También, han sido utilizadas como "fillers" en diferentes tipos de nanocompuestos que han permitido modificar las propiedades intrínsecas del material que las contiene (Omanović-Mikličanin et al., 2020). Entre los nanocompuestos de mayor interés se encuentran los poliméricos basados en CDs. Estos se integran a la matriz polimérica con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y ópticas del polímero (Khan et al., 2023).

Uno de los polímeros con propiedades interesantes para la síntesis de nanocompuestos poliméricos es el fluoruro de polivinilideno (PVDF). Este es un termoplástico semicristalino en el que predominan 3 fases cristalinas, conocidas como α, β y γ (Dallaev et al., 2022). Siendo la fase β la que presenta propiedades de interés en el ámbito de los sensores, debido a sus características piezoeléctricas. Sus principales aplicaciones tecnológicas incluyen la detección de humedad (Hernández-Rivera et al., 2017), presión (Roy et al., 2019) y temperatura. (Hernández-Rivera & Suaste-Gómez, 2017). Además, debido a sus capacidades de transducción mecánica eléctrica y térmica eléctrica, se ha utilizado para la recolección de energía ambiental (Memarian et al., 2023).

La combinación de PVDF con CDs puede mejorar significativamente las propiedades piezoeléctricas y mecánicas de este polímero (Huang et al., 2021), además conferirle propiedades fluorescentes lo que aumenta sus posibilidades de aplicación óptica (Hernández-Rivera et al., 2023). Por otro lado, los CDs presentan fluorescencia al ser estimulados con luz UV por lo que son una opción prometedora para la detección de luz UV (Hernández-Rivera et al., 2021).

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo la fabricación de nanocompuestos de PVDF/CDs fluorescentes y

la evaluación preliminar de su capacidad para la detección de protección UV en materiales solares mediante procesamiento imágenes obtenidas con una cámara fotográfica convencional. Este estudio busca optimizar el proceso de estimación de la protección UV propuesto por Hernández-Rivera et al. 2021b y desarrollar sensores ópticos funcionales con un enfoque sustentable, aprovechando fuentes naturales de carbono para la síntesis de nanomateriales y simplificando la detección óptica.

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se desarrolló una metodología de 5 etapas para la síntesis de los nanocompuestos: 1) elaboración de CDs por la técnica de carbonización, 2) elaboración de solución polimérica de PVDF/CDs, 3) elaboración de películas poliméricas, 4) caracterización de los nanocompuestos y 5) pruebas de detección de bloqueo UV de productos comerciales.

2.1 Elaboración de CDs a partir de la flor de jamaica

Como materia prima para la elaboración de los CDs se utilizaron flores de jamaica secadas a temperatura ambiente durante dos semanas para eliminar la mayor cantidad de agua presente en estas. Posteriormente, se carbonizaron colocando 10 g de flores en un horno de mufla a 250 ˚C durante cuatro horas. Una vez carbonizadas, las muestras se molieron en un mortero hasta obtener un polvo fino (Figura 1).



Fig. 1. Carboncillo de flores de jamaica.

El carboncillo obtenido se mezcló con N, N-dimetilformamida (DMF) en una relación 10:1 y se sometió a agitación durante una hora a temperatura constante de 70˚C. Posteriormente la mezcla fue centrifugada a 4500 rpm durante 30 minutos. Finalmente, con el sobrenadante (DMF/CDs) se realizaron las mezclas poliméricas a diferentes concentraciones.

2.2 Elaboración de soluciones poliméricas

Para obtener soluciones poliméricas con diferente concentración de CDs, se prepararon soluciones poliméricas de PVDF a 15 wt%. Para ello, se disolvieron 0.5 g de PVDF en polvo (Sigma Aldrich) en una mezcla de DMF puro y DMF/CDs en diferentes proporciones como se muestra en la Tabla 1.

Muestra	DMF/CDs (mL)	DMF (mL)	DMF/CDs (%)
1	0	6	0
2	1	5	16
3	2	4	33
4	3	3	50
5	6	0	100

Tabla 1. Composición de las soluciones

Las soluciones se calentaron a 70 ˚C con agitación constante durante dos horas (Figura 2).



Fig. 2. Soluciones poliméricas de PVDF/CDs

2.3 Elaboración de películas de PVDF/CDs

Las películas poliméricas se fabricaron mediante la técnica de Solution Casting, depositando la solución sobre cubreobjetos de 2 cm^2 para obtener muestras del mismo tamaño. Posteriormente, las muestras se calentaron a 70 ˚C durante dos horas hasta eliminar el solvente y obtener películas de PVDF/CDs (Figura 3).



Fig. 3. Películas de PVDF/CDs

2.4 Caracterización

Primero se medió el espesor de cada muestra utilizando un micrómetro como se observa en la Figura 4, obteniendo 0.065 mm de espesor promedio.



Fig. 4. Medición de los grosores de las películas

Posteriormente, para obtener la constante dieléctrica de las muestras se medió la capacitancia de las películas utilizando un medidor LCR (BK Precision) en una configuración de placas paralelas. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Constante dieléctrica de las muestras

Muestra	Constante dieléctrica
1	12.88
2	10.17
3	13.42
4	13.35
5	17.73

Preliminarmente, se observó que la constante dieléctrica fue aumentando con forme aumentó la concentración de CDs, lo cual, coincide con lo reportado en la literatura (Aravinda et al., 2023).
Finalmente se observó la fluorescencia. presente en el material utilizando una lámpara de luz UV a 365nm.

Las películas presentaron fluorescencia en tonos blancos-azules como se observa en la figura 5, lo que evidencia la presencia de puntos de carbono en la composición de los polímeros.

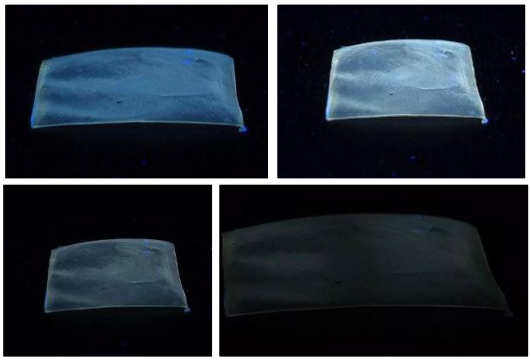


Fig. 5. Fluorescencia de las muestras

Las películas de PVDF/CDs mostraron fluorescencia al ser estimuladas con luz UV. Esta característica ha sido utilizada y validada en un estudio previo en el que se comparó el porcentaje de protección UV de cremas protectoras solares utilizando espectroscopía de absorción óptica y un mecanismo basado en fluorescencia. (Hernández-Rivera et al. 2021)
Con esta información, la fluorescencia presente en las películas fue utilizada para estimar el porcentaje de protección UV de diversos materiales que se comercializan como protectores de luz UV como cremas de protección solar, lentes protectores, entre otros. Para realizar pruebas de detección de la protección UV de ciertos productos comerciales se eligió la muestra con mayor cantidad de CDs, que fue la que presentó mayor fluorescencia.
Se eligieron 8 distintos productos, 3 protectores solares (M.A, M.B y M.C), 2 micas de pantalla de teléfono móvil (M.E y M.F), 1 crema corporal con prevención FPS 30 (M.D), 1 para de lentes con certificación anti blu-ray (M.G), y unos goggles de protección para laboratorio (M.H).

Las pruebas se realizaron dentro de una caja oscura para tener un contraste de la fluorescencia de la película con un fondo negro. Una vez que las muestras fueron estimuladas con una lámpara de 365nm, se tomaron fotografías antes y después de cubrir la película con el material protector de luz UV.

Las fotografías fueron tomadas con una cámara fotográfica de celular con las siguientes características: 12 Megapíxeles, sensibilidad ISO 50, zoom 2x, resolución 4000x3000 píxeles, Foco 1.7, -2/0 ev (valor de exposición, WB 6500K (balance de blancos, White Balance), velocidad de obturación 1/15 sec y sin flash.
Para minimizar la variabilidad de las fotografías, se mantuvieron constantes todos los parámetros de las pruebas; mismo ángulo y distancia de toma de la imagen, mismo dispositivo y características fotográficas, mismo espacio y condiciones físicas, además de utilizar una única película para cada una de las pruebas de medición.

3. RESULTADOS

3.2 Detección de protección UV de productos comerciales utilizando los nanocompuestos producidos

Las Figuras 6-13 muestran la fluorescencia de las películas de PVDF/CDs antes y después de ser cubiertas con distintos materiales de protección UV. Las imágenes a) muestran la fluorescencia característica de los CDs, mientras que las imágenes b) se evidencia su disminución debido al bloqueo parcial o total de la radiación UV (365 nm) por los materiales aplicados.

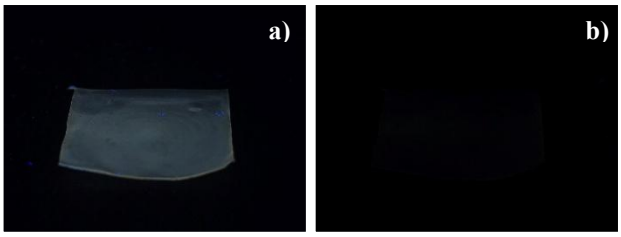


Fig.6. Muestras evaluadas con bloqueador solar M.A. a) antes de aplicar bloqueador y b) después de aplicar bloqueador.

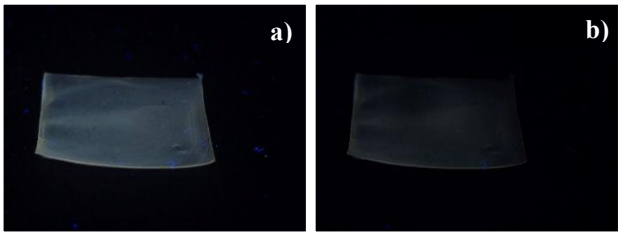


Fig.7. Muestras evaluadas con bloqueador solar M.B. a) antes de aplicar bloqueador y b) después de aplicar bloqueador.

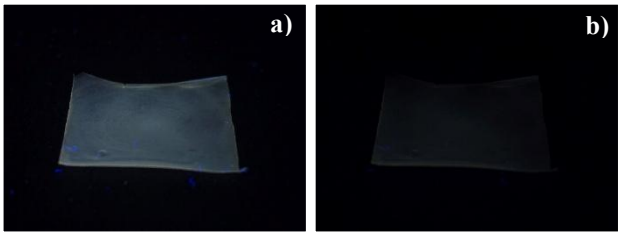


Fig.8. Muestras evaluadas con bloqueador solar M.C. a) antes de aplicar bloqueador y b) después de aplicar bloqueador.

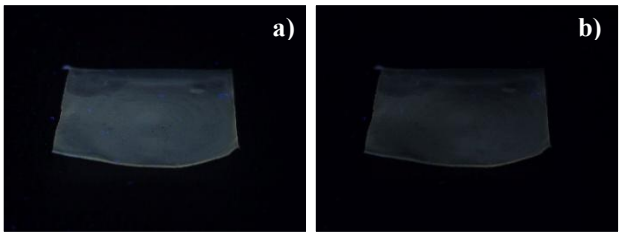


Fig.9. Muestras evaluadas con crema corporal M.D. a) antes de aplicar crema y b) después de aplicar crema.

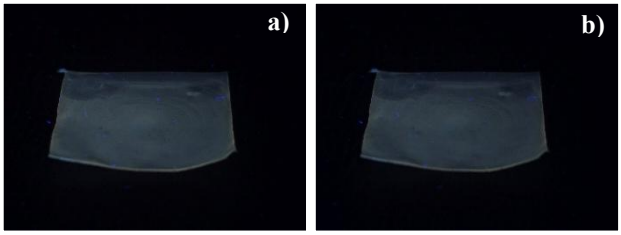


Fig.10. Muestras evaluadas con mica para teléfono con protección visual M.E. a) antes de colocar mica y b) después de colocar mica.

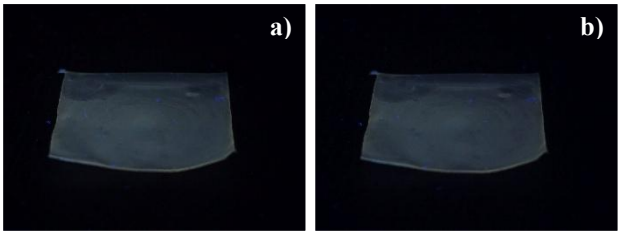


Fig.11. Muestras evaluadas con mica para teléfono con protección visual M.F. a) antes de colocar mica y b) después de colocar mica.

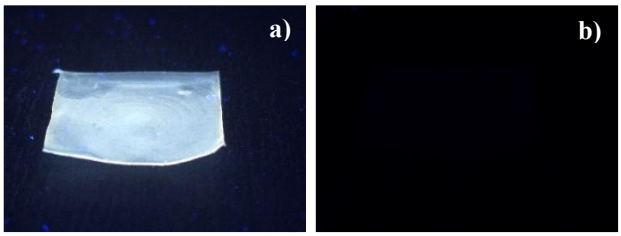


Fig.12. Muestras evaluadas con lentes con certificación Anti Blu-ray M.G. a) antes de colocar lentes y b) después de colocar lentes.

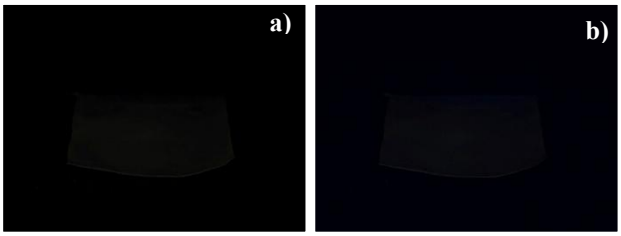


Fig.13. Muestras evaluadas con goggles de seguridad M.H. a) antes de colocar goggles y b) después de colocar goggles.

Esta comparación visual permitió evaluar de forma cualitativa la capacidad de protección UV de cada producto, y sirvió como evidencia complementaria al análisis cuantitativo.
Si bien los resultados obtenidos son preliminares, representan una evidencia prometedora para evaluar y respaldar el potencial de estos nanocompuestos como sensores UV.

3.3 Análisis fotográfico del porcentaje de protección UV de los productos

Una vez obtenidas las imágenes del antes y después de la exposición de las muestras a los productos comerciales de protección UV, se procedió a su análisis mediante el software MATLAB. Primero se realizó la segmentación de las imágenes para detectar el contorno de las películas. Posteriormente el segmento correspondiente a la película fue convertido a escala de grises (Figura 14) mediante un análisis de porcentaje de color por píxel, utilizando el método de Otsu. Finalmente, se comparó el nivel de fluorescencia antes y después de la exposición, considerando cada primera imagen como referencia del 100% de fluorescencia.
A partir de los valores obtenidos en la comparación, se obtuvo un gráfico (Figura 25) que muestra visualmente el porcentaje de bloqueo de cada producto.



Fig.14. Segmentación y conversión de la imagen a escala de grises

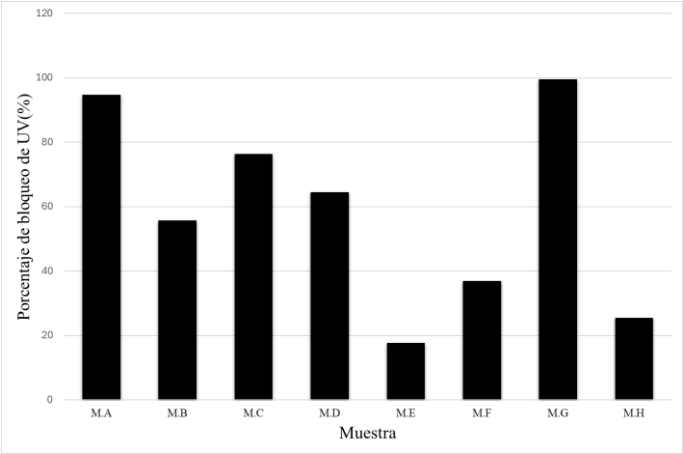


Fig.15. Comparativa del bloqueo de luz UV de productos comerciales

Los resultados de porcentaje de bloqueo de cada producto se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Comparativa de fluorescencia y porcentaje de bloqueo

Protector solar UV	Fluorescencia antes (U.A)	Fluorescencia después (U.A.)	Porcentaje bloqueo (%)
(M.A)	57.91	4.94	91.46
(M.B)	65.60	24.19	63.13
(M.C)	66.60	16.34	75.47
(M.D)	57.60	30.45	47.14
(M.E)	56.96	51.15	10.20
(M.F)	57.25	52.31	8.64
(M.G)	87.95	0.89	98.99
(M.H)	12.67	11.61	8.37

Con base en los porcentajes obtenidos, se confirma que productos como los bloqueadores solares y la crema corporal con FPS 30 ofrecen un nivel significativo de protección frente a la radiación UV. Incluso las micas de vidrio templado para celular logran, aunque en menor medida, bloquear aproximadamente un 10% de la luz UV incidente.

Sin embargo, se observa una variación notable entre diferentes marcas de bloqueadores solares que, en teoría, ofrecen el mismo nivel de protección (FPS 50). Esta diferencia se evidenció en la reducción de la fluorescencia de la película de PVDF/CDs, donde el bloqueador M.A (el de mayor costo) fue el que brindó mayor protección con un 91.46% de porcentaje de bloqueo, seguido por el bloqueador M.C, con un precio más accesible. Por último, el bloqueador de la marca M.B presentó el menor porcentaje de protección, a pesar de ser FPS 50.

En cuanto a la crema corporal M.D, su desempeño fue coherente con lo anunciado en su etiqueta, al ofrecer una protección adecuada para un FPS 30 con función preventiva.

4. CONCLUSIONES

Con estos resultados preliminares, se consiguió la síntesis de nanocompuestos basados en PVDF y CDs obtenidos por carbonización de flores de jamaica. Se caracterizaron sus propiedades dieléctricas y fluorescentes, confirmando su potencial como sensores para la detección de bloqueo de radiación UV. Los resultados sugieren un amplio rango de aplicaciones para estos nanocompuestos, incluyendo la detección de agentes contaminantes o sustancias con capacidad de absorción de fluorescencia.

Asimismo, se observó que la incorporación de CDs mejora en cierta medida las propiedades dieléctricas del PVDF, abriendo posibilidades para el desarrollo de dispositivos multifuncionales que integren respuesta óptica y de medición capacitiva.

Aunque los resultados de protección ultravioleta fueron acorde a las especificaciones de los productos evaluados, se recomienda para futuras investigaciones y trabajos probar la reproducibilidad y repetibilidad de los ensayos. Así como optimizar la dispersión de los CDs mediante sonicación y explorar variantes en su síntesis utilizando diferentes precursores o métodos de tipo *bottom-up*. También sería conveniente mejorar el análisis de imágenes mediante herramientas más robustas, que permitan cuantificar con mayor precisión los niveles de fluorescencia. Finalmente, se propone evaluar el comportamiento de los nanocompuestos ante distintas longitudes de onda UV con el objetivo de ampliar el rango de detección y obtener mediciones más precisas y cuantificables del porcentaje de protección.

REFERENCIAS

Aravinda, T., Rao, S., Kumbla, V. & Pattar, J. (2023) Improved dielectric performance of polyvinylidene fluoride (PVDF) - Carbon dots composites. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 147, 115589. doi:10.1016/J.PHYSE.2022.115589.

Bogireddy, N.K.R., Lara, J., Fragoso, L.R. & Agarwal, V. (2020) One-step hydrothermal preparation of highly stable N doped oxidized carbon dots for toxic organic pollutants sensing and bioimaging. *Chemical Engineering Journal*. doi:10.1016/j.cej.2020.126097.

Dallaev, R., Pisarenko, T., Sobola, D., Orudzhev, F., Ramazanov, S. & Trčka, T. (2022) Brief Review of PVDF Properties and Applications Potential. *Polymers*. 14 (22). doi:10.3390/POLYM14224793.

Hernández-Rivera, D., Hernandez-Ramires, P., Suaste-Gómez, E. & Agarwal, V. (2023) Porous silicon-polyvinylidene fluoride-carbon dots based portable temperature sensor. *Optical Materials*. 140, 113878. doi:10.1016/J.OPTMAT.2023.113878.

Hernández-Rivera, D., Rodríguez-Roldán, G., Mora-Martínez, R. & Suaste-Gómez, E. (2017) A capacitive humidity sensor based on an electrospun PVDF/graphene membrane. *Sensors (Switzerland)*. doi:10.3390/s17051009.

Hernández-Rivera, D. & Suaste-Gómez, E. (2017) Fabrication of piezoelectric PVDF/graphene membranes by electrospinning for respiratory rate and temperature sensing. In: *IFMBE Proceedings*. 2017 p. doi:10.1007/978-981-10-4086-3_100.

Hernández-Rivera, D., Torres-Landa, S.D., Rangel-Ayala, M. & Agarwal, V. (2021) Fluorescent films based on PVDF doped with carbon dots for evaluation of UVA protection of sunscreens and fabrication of cool white LEDs. *RSC Advances*. doi:10.1039/d1ra04746a.

Huang, P., Xu, S., Zhong, W., Fu, H., Luo, Y., Xiao, Z. & Zhang, M. (2021) Carbon quantum dots inducing formation of β phase in PVDF-HFP to improve the piezoelectric performance. *Sensors and Actuators A: Physical*. 330, 112880. doi:10.1016/J.SNA.2021.112880.

Khan, I., Khan, I., Saeed, K., Ali, N., Zada, N., Khan, A., Ali, F., Bilal, M. & Akhter, M.S. (2023) Polymer nanocomposites: an overview. *Smart Polymer Nanocomposites: Design, Synthesis, Functionalization, Properties, and Applications*. 167–184. doi:10.1016/B978-0-323-91611-0.00017-7.

Li, P. & Li, S.F.Y. (2021) Recent advances in fluorescence probes based on carbon dots for sensing and speciation of heavy metals. *Nanophotonics*. doi:10.1515/nanoph-2020-0507.

Memarian, F., Mohammadi, R., Akrami, R., Bodaghi, M. & Fotouhi, M. (2023) A Comprehensive Review of Nanocomposite PVDF as a Piezoelectric Material: Evaluating Manufacturing Methods, Energy Efficiency and Performance. *Nanofabrication*. 8. doi:10.37819/NANOFAB.8.1775.

Omanović-Mikličanin, E., Badnjević, A., Kazlagić, A. & Hajlovac, M. (2020) Nanocomposites: a brief review. *Health and Technology*. 10 (1), 51–59. doi:10.1007/S12553-019-00380-X/METRICS.

Ozyurt, D., Kobaisi, M. Al, Hocking, R.K. & Fox, B. (2023) Properties, synthesis, and applications of carbon dots: A review. *Carbon Trends*. 12, 100276. doi:10.1016/J.CARTRE.2023.100276.

Rojas-Valencia, O.G., Regules-Carrasco, M., Hernández-Fuentes, J., Germán, C.M.R.S., Estrada-Flores, M. & Villagarcía-Chávez, E. (2021) Synthesis of blue emissive carbon quantum dots from Hibiscus Sabdariffa flower: Surface functionalization analysis by FT-IR spectroscopy. *Materialia*. 19, 101182. doi:10.1016/J.MTLA.2021.101182.

Roy, K., Ghosh, S.K., Sultana, A., Garain, S., Xie, M., Bowen, C.R., Henkel, K., Schmeiβer, D. & Mandal, D. (2019) A Self-Powered Wearable Pressure Sensor and Pyroelectric Breathing Sensor Based on GO Interfaced PVDF Nanofibers. *ACS Applied Nano Materials*. doi:10.1021/acsanm.9b00033.

Sharma, V., Tiwari, P. & Mobin, S.M. (2017) Sustainable carbon-dots: Recent advances in green carbon dots for sensing and bioimaging. *Journal of Materials Chemistry B*. doi:10.1039/c7tb02484c.

Torres Landa, S.D., Kaur, I. & Agarwal, V. (2022) Pithecellobium dulce Leaf-Derived Carbon Dots for 4-Nitrophenol and Cr(VI) Detection. *Chemosensors*. 10 (12), 532. doi:10.3390/CHEMOSENSORS10120532/S1.

Xiao, Y., Wang, Z., Fu, J., Zhang, J., He, Q., Lu, H., Zhou, Q. & Wang, H. (2025) Recent Advances in the Synthesis, Characterization, and Application of Carbon Dots in the Field of Wastewater Treatment: A Comprehensive Review. *Water 2025, Vol. 17, Page 210*. 17 (2), 210. doi:10.3390/W17020210.

Early Warning System Based on IoT and Satellite Connectivity for Disconnected Rural Communities

Juárez-Pérez Fredy*, Osorio-Antonia José*, Aguilar-Meléndez Armando, Diaz-Ortega Rosario*, Juárez-Reyes Fernando*, Olivares-Cruz Janeth***

**Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache, Posgrado en Economía Social y Solidaria, Km 6.5 Carretera Potrero del Llano - Tuxpan, 92730 Xoyotitla, Ver.*

(email: {fredy.jp,jose.oa,rosario.od,fernando.rj,janeth.oc}@alamo.tecnm.mx)

***Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Civil, Región Poza Rica-Tuxpan, prolongación Av. Venustiano Carranza s/n 93390 Poza Rica, Ver.*

(email: armaguilar@uv.mx)

Abstract: Vulnerable rural communities face serious risks from hurricanes, particularly those without access to communication systems or the Internet. The lack of technological infrastructure hinders timely warnings, increasing the social and economic impact of these events. It is a priority to develop solutions adapted to rural contexts that enable early warning in areas without conventional connectivity. This work presents an early warning system based on IoT technology, installed in rural communities and connected to the cloud via Starlink satellite Internet. The system issues visual alerts using color-coded lights, following the protocol of the Early Warning System for Tropical Cyclones (SIAT-CT), and can be remotely activated by Civil Protection authorities from their central offices. The solution uses low-cost devices that operate autonomously and in real time. Field tests demonstrated that the system is functional, reliable, and replicable, effectively alerting marginalized areas without relying on terrestrial networks. Its implementation represents progress in managing hydrometeorological risks in isolated rural communities.

Keywords: IoT, early warning, satellite Internet, rural communities, risk management.

1. INTRODUCCIÓN

Las comunidades rurales costeras de Veracruz enfrentan un alto riesgo ante huracanes, cuyos impactos han dejado pérdidas humanas y materiales significativas a lo largo de las décadas. Eventos como los huracanes Karl (2010), Janet (1955) y Grace (2021) evidencian la vulnerabilidad de estas zonas, donde la falta de infraestructura de telecomunicaciones complica las labores de prevención y respuesta. Casos recientes como el huracán Otis en Acapulco (2023), que golpeó sin previo aviso suficiente, subrayan la urgencia de contar con sistemas efectivos de alerta temprana, especialmente en regiones aisladas donde la conectividad tradicional no existe (Woodward & Samet, 2018; Marsooli et al., 2019).

Este trabajo presenta una solución basada en tecnología IoT que permite emitir alertas tempranas visuales a través de un sistema de semáforo codificado por colores, fundamentado en el protocolo del SIAT-CT (Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales) (Domínguez-Sarmiento et al., 2023). La infraestructura se conecta a Internet mediante Starlink, un sistema de órbita baja que reduce significativamente la latencia frente a tecnologías satelitales convencionales (Deutschmann et al., 2022). Esto permite la operación remota en tiempo real desde las sedes de Protección Civil, mejorando la coordinación y el alcance del sistema hasta comunidades rurales previamente incomunicadas.

Las pruebas realizadas en campo, en la comunidad del ejido Manual Ávila Camacho "La gloria", municipio de Álamo Temapache, se encuentra ubicada entre los municipios de Tuxpan, Álamo y Cerro Azul, del Estado de Veracruz, como se muestra en la Figura 1.

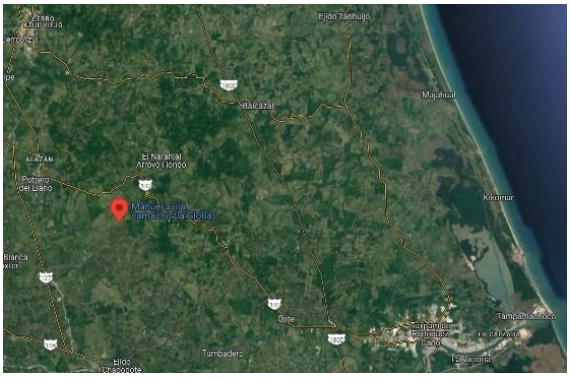


Figura 1. Localidad Manual Ávila Camacho.

Demostraron que el sistema es funcional, confiable y replicable. La activación remota de las alarmas, su respuesta inmediata y su bajo costo de implementación lo convierten en una herramienta viable para fortalecer la gestión del riesgo hidrometeorológico. Esta solución representa un paso importante hacia la equidad tecnológica y la protección de vidas humanas en territorios marginados.

2. METODOLOGÍA

El sistema de alerta temprana está basado en una arquitectura IoT de bajo costo, diseñada para operar en zonas rurales sin conectividad terrestre.

2.1 Prototipo.

El prototipo fue desarrollado empleando tecnología Arduino, programado mediante su Entorno de Desarrollo Integrado (IDE), e implementado con un NodeMCU basado en el microcontrolador ESP8266 con conectividad Wi-Fi, un dispositivo económico, de código abierto y compatible con el lenguaje de Arduino como se muestra en la Figura 2. La comunicación entre los nodos instalados en campo y el servidor central se realiza mediante el protocolo MQTT, a través del broker Mosquitto, seleccionado por su eficiencia en dispositivos con recursos limitados y su adecuado rendimiento en redes con bajo ancho de banda.

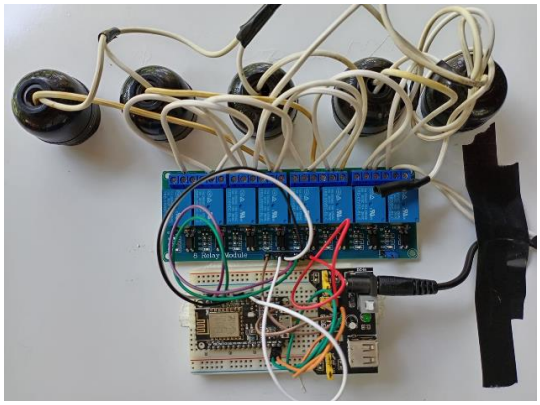


Figura 2. Prototipo de la alarma temprana.

Tanto el broker MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) como la interfaz de control Node-RED se encuentran alojados en un servidor virtual EC2 (Elastic Compute Cloud) con sistema operativo Linux, desplegado en la nube de Amazon Web Services (AWS), como se muestra en la Figura 3.

Esta instancia, que cuenta con dirección IP pública, garantiza la operación remota del sistema desde cualquier ubicación con acceso a Internet. Esta infraestructura permite que el personal de Protección Civil pueda activar, supervisar y gestionar las alertas directamente desde sus instalaciones, sin necesidad de desplazarse físicamente a las comunidades.

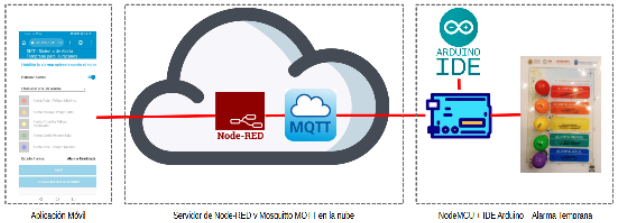


Figura 3. Sistema de alarma temprana

2.2 Sistema de alerta temprana.

La alerta se emite mediante un sistema visual codificado por colores, conforme al protocolo del Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT-CT) como se muestra en la Figura 4.

Promedio De Escalas	Detección o más de 72	72 a 60 horas	60 a 48 horas	48 a 36 horas	36 a 24 horas	24 a 18 horas	18 a 12 horas	12 a 6 horas	Menos de 6 horas
0 a 0.99									
1 a 1.99									
2 a 2.99									
3 a 3.99									
4 a 4.99									
5									

Figura 4. Activación de las etapas de alertamiento.

Este esquema utiliza luces LED de alta potencia para representar tres niveles de riesgo: verde para condiciones normales, amarillo para alerta preventiva y rojo para emergencia como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Luces de alerta SIAT.

Esta codificación facilita la interpretación por parte de los habitantes y permite una respuesta comunitaria rápida y eficiente.

2.3 La conectividad remota mediante Starlink.

Para garantizar el funcionamiento del sistema en comunidades sin acceso a Internet, se empleó el servicio de Internet satelital Starlink. Su constelación de satélites en órbita baja (LEO) ofrece una latencia menor a 60 ms, permitiendo la operación remota en tiempo real (Donati & General, 2022).

La infraestructura se complementó con un servidor MQTT desplegado en la nube, encargado de gestionar la comunicación entre la interfaz de activación (ubicada en las sedes de Protección Civil) y los dispositivos instalados en campo. Esta solución permite encender o apagar el sistema desde cualquier punto con acceso a Internet, sin necesidad de intervención local como se muestra en la Figura 6.

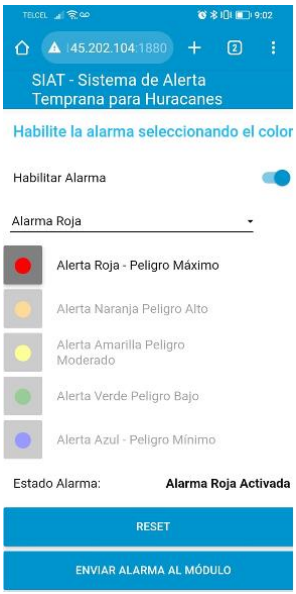


Figura 6. Interfaz operacional en teléfono móvil.

2.4 Implementación en campo y validación.

Las pruebas de campo incluyeron: verificación de encendido remoto, evaluación de tiempos de respuesta, monitoreo de estabilidad del enlace satelital, y observación de la visibilidad y comprensión del sistema por parte de los habitantes. La operación se realizó bajo condiciones reales, con energía autónoma proporcionada por batería y generador portátil.

3. RESULTADOS.

Durante la fase experimental, la solución fue instalada y evaluada en la comunidad rural de "La gloria", en el municipio de Álamo Temapache, Veracruz. La elección de este sitio respondió a su aislamiento, carencia de servicios de telecomunicaciones. La instalación incluyó una unidad de alerta temprana con semáforo visual codificado por colores, un nodo IoT con microcontrolador, alimentación autónoma y conectividad satelital mediante Starlink, como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Despliegue del sistema en campo.

Las pruebas de campo permitieron validar la capacidad del sistema para ser activado remotamente desde una ubicación central con conectividad a Internet, simulando el entorno de una sede de Protección Civil. El tiempo promedio de activación fue inferior a 1 segundo tras el envío de la señal, gracias a la baja latencia ofrecida por la red satelital de órbita baja (Deutschmann et al., 2022).

Adicionalmente, se evaluó la calidad del servicio de Internet provisto por Starlink bajo diferentes condiciones climáticas. Las velocidades promedio de descarga fueron de 46.67 Mbps en días lluviosos, 98.32 Mbps con cielo nublado y 102 Mbps en días despejados. Las velocidades de subida registraron promedios de 26.9 Mbps, 26 Mbps y 28 Mbps respectivamente. En cuanto a la latencia, se observaron valores promedio de 76.9 ms (lluvia), 69.6 ms (nublado) y 62.8 ms (despejado), lo que confirma su viabilidad para operación remota en tiempo real incluso en condiciones adversas.

La visibilidad del sistema fue verificada a distancias superiores a los 100 metros bajo condiciones de iluminación diurna. Además, se constató la comprensión inmediata del significado de los colores por parte de los habitantes locales, lo que refuerza su efectividad como canal de comunicación visual directa. La arquitectura del sistema, basada en componentes de bajo costo y operación autónoma, lo hace replicable en otras comunidades rurales marginadas.

4. CONCLUSIONES

La implementación de un sistema de alerta temprana basado en tecnología IoT, enlazado a la nube mediante conectividad satelital Starlink, ha demostrado ser una solución viable y funcional para mejorar la gestión del riesgo en comunidades rurales sin acceso a infraestructura de telecomunicaciones. Su capacidad de operación remota, activación en tiempo real y bajo costo de implementación permiten responder con rapidez ante amenazas meteorológicas como los huracanes.

Las pruebas de campo realizadas en la comunidad de La Gloria validaron el desempeño del sistema bajo condiciones reales, destacando la baja latencia de la red satelital y la estabilidad de las comunicaciones incluso en condiciones climáticas adversas. Los resultados obtenidos en términos de velocidad de descarga, subida y latencia confirman que la tecnología utilizada es adecuada para escenarios de emergencia y zonas aisladas.

Esta solución representa un paso hacia la equidad tecnológica, al permitir que poblaciones marginadas accedan a mecanismos de protección civil que históricamente han estado fuera de su alcance. Su replicabilidad y escalabilidad la convierten en una herramienta clave dentro de estrategias más amplias de ecosistemas rurales inteligentes y resilientes, capaces de mitigar el impacto de los desastres naturales.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México (TECNM), por el apoyo otorgado en la Convocatoria de Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2024 (proyecto 19553.24-PD).

6. REFERENCIAS

Deutschmann, J., Hielscher, K.S. and German, R. (2022) 'Broadband internet access via satellite: performance measurements with different operators and applications', *Broadband Coverage in Germany; 16th ITG-Symposium*, pp. 1–7.

Donati, A. and General, E. S. (2022) *Integrating satellite applications in disaster risk management.

Giles Navarro, C. A. and Méndez Mandujano, M. Á. (2019) *La participación del Ejército en labores de protección a la población: el caso del Plan DN-III-E*.

Gomes, T., Tapolcai, J., Esposito, C., Hutchison, D., Kuipers, F., Rak, J. et al. (2016) 'A survey of strategies for communication networks to protect against large-scale natural disasters', *2016 8th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM)*, pp. 11–22. IEEE. https://doi.org/10.1109/RNDM.2016.7608292

Hernández, O. G., Garnica, B. H., Schroeder, M. O. and Salgado, M. (n.d.) *Selección de datos de entrada para el modelado de huracanes en seguros paramétricos en México y simulación de eventos de huracán y su validación con eventos históricos*.

Juárez Pérez, F., Lugo Clemente, H., Reyes Juárez, F., Domínguez Carrillo, G. and Martínez R., S. (2023) *Producto 1: estudio del desempeño de comunicaciones satelitales Starlink para infraestructura móvil computacional*. Proyecto CP 0911 1058/23. Tecnológico Nacional de México – Campus Álamo Temapache.

Juárez Pérez, F. et al. (2023) *Producto 7: sistema de alarma temprana para comunidades rurales vulnerables*. Proyecto Ecosistema Rural Inteligente. TecNM Campus Álamo Temapache.

National Hurricane Center (2023) *Eastern Pacific and Atlantic hurricane archive*. NOAA. Available at: https://www.nhc.noaa.gov

SpaceX (2023) *Starlink specifications and installation guide*. Available at: https://www.starlink.com

Woodward, A. J. and Samet, J. M. (2018) 'Climate change, hurricanes, and health', *American Journal of Public Health*, 108(1), pp. 33–35. https://doi.org/10.2105/AJPH.2017.304197

CO_2 Capture Analysis by Chemical Absorption using MDEA

Sánchez Ruiz Ildester*, Cervantes Bobadilla Marisol*, García Morales Jarniel *, Vargas Méndez Rodolfo Amalio *, Arce Landa Jesús*, Olmos Barba Emmanuel*, Adam Medina Manuel*

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México, 62490. (e-mail: m24ce015@cenidet.tecnm.mx;*

marisol.cb@cenidet.tecnm.mx; jarniel.gm@cenidet.tecnm.mx, rodolfo.vm@cenidet.tecnm.mx; jesus.al@cenidet.tecnm.mx; emmanuel.ob@cenidet.tecnm.mx; manuel.am@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: The increase in atmospheric carbon dioxide (CO_2) concentrations, linked to industrial and technological development, has generated significant consequences for climate change. In this context, CO_2 capture and recovery technologies are presented as a solution to mitigate environmental impact and generate valuable resources from industrial waste. Crematoriums, as facilities that emit CO_2 in large quantities, can benefit from these technologies by capturing the gas during the cremation process. This study uses Aspen Plus simulation software to model CO_2 capture in crematoriums, employing N-methyl diethanolamine (MDEA) as an absorbent in an absorption column. The model simulates different operating conditions to maximize process efficiency, achieving a capture efficiency of 99%. In addition, emerging technologies for CO_2 capture, such as pre-combustion, post-combustion, and oxy-combustion, as well as CO_2 recovery in various industries, are reviewed. Despite advances, challenges remain regarding costs, energy consumption, and safe CO_2 storage. Simulations confirm that MDEA is effective for capturing CO_2 in crematoria, and optimal operating conditions are suggested to improve efficiency.

Keywords: CO_2 capture, Simulations, Chemical absorption, MDEA

1. INTRODUCCIÓN

Las emisiones de CO_2 derivadas de diversas fuentes industriales representan una de las principales preocupaciones ambientales debido a su contribución al cambio climático. Entre estas fuentes, los crematorios generan una cantidad significativa de CO_2 debido a la quema de restos humanos, y su control resulta esencial para minimizar el impacto ambiental de esta práctica. Los crematorios están diseñados para operar a altas temperaturas, lo que favorece la completa combustión de los materiales orgánicos; sin embargo, la emisión de CO_2 sigue siendo inevitable.

El control de las emisiones contaminantes se ha vuelto crucial para cumplir con normativas medioambientales cada vez más estrictas y con los objetivos globales de reducción de gases de efecto invernadero. La captura de CO_2 postcombustión es una de las soluciones más prometedoras para mitigar estas emisiones en industrias como la cremación, que producen gases residuales con alta concentración de CO_2.

Los crematorios emiten una variedad de gases contaminantes como parte de sus procesos de combustión, entre ellos dióxido de carbon (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) y otros compuestos orgánicos volátiles. Si bien el CO_2 es el principal gas de efecto invernadero emitido, la cantidad exacta varía según la tecnología utilizada, la eficiencia de la combustión y el tipo de combustible empleado. Según EIC, 2022 y Beck, A., & Jones, P., 2021, un crematorio promedio que utiliza gas natural produce entre 160 a 245 $kgCO_2$/cremación, lo que traduce alrededor de 80 a 120 tCO_2/año, contemplando entre 325 y 750 cremaciones anuales, valor que puede variar según la eficiencia de los equipos de combustión y el tamaño de las instalaciones.

Dado que la incineración de restos humanos es una práctica que difícilmente puede eliminarse, la implementación de tecnologías de captura de CO_2 se perfila como una alternativa viable para mitigar su impacto ambiental. Reducir las emisiones en este sector puede contribuir a los objetivos globales de sostenibilidad, así como a mejorar la calidad del aire en las zonas cercanas a los crematorios, donde estos procesos suelen llevarse a cabo.

La post-combustión se lleva a cabo después de la combustión de los combustibles fósiles, cuando el CO_2 ya está presente en los gases de escape en concentraciones bajas (entre un 3% y un 15%). En este caso, se utilizan solventes químicos para capturar el CO_2, que se encuentra diluido en una mezcla de gases.

Esto se realiza generalmente a través de tecnologías de absorción, adsorción o membranas, siendo la absorción con soluciones de aminas la más común.

Entre las soluciones aminas utilizadas, Antonini, C.,*et. al.,* 2021, el MDEA (N-metil-di-etanolamina) es una de las más eficaces para la captura de CO_2, especialmente en condiciones de baja presión y temperaturas moderadas. El MDEA es preferido debido a su alta selectividad por CO_2, menor corrosividad y buena estabilidad térmica, lo que lo hace ideal para aplicaciones en procesos industriales, como la captura postcombustión.

En la captura de CO_2 postcombustión con MDEA, el CO_2 se absorbe en una solución de amina en un absorbente, luego la solución cargada de CO_2 se calienta en un sistema de desorción (columna de desorción), liberando CO_2 puro que puede ser almacenado o utilizado en otros procesos industriales.

Este trabajo presenta una primera aproximación al diseño de un dispositivo para la captura de CO_2, con potencial de aplicación en instalaciones de pequeña y mediana escala. La propuesta se basa en el uso de MDEA (N-metil dietanolamina) como absorbente químico en un esquema de captura por postcombustión. Para ello, se emplea el software Aspen Plus, mediante el cual se realiza la simulación preliminar del sistema. Se considerará el tratamiento de gases generados por crematorios, excluyendo otras fuentes de emisiones como las procedentes de la quema de combustibles fósiles en sectores industriales. Esta delimitación permite mantener un enfoque específico en la optimización del proceso de captura en este tipo de instalaciones, sentando las bases para desarrollos posteriores ajustados a sus condiciones particulares.

El estudio se centra exclusivamente en la captura de CO_2 de los gases de escape de un crematorio, considerando las características típicas de estos sistemas y las propiedades del MDEA como solvente. La simulación se lleva a cabo utilizando Aspen Plus para modelar el proceso de absorción con el fin de determinar los mejores parámetros operativos (como la concentración de MDEA, las temperaturas de operación, y la eficiencia de la captura).

2. METODOLOGÍA

La post-combustión, proceso que se muestra en la figura 1, aunque menos eficiente que la pre-combustión en términos de concentración de CO_2, es un proceso aplicable a instalaciones ya existentes, lo que lo convierte en una opción atractiva para su implementación a corto plazo.

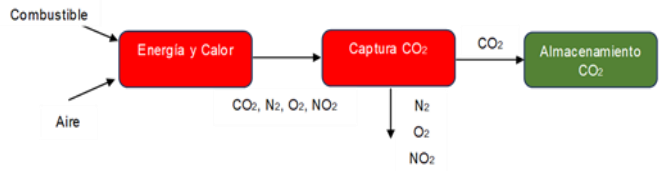


Figura 1: Esquema Post-combustión.

El sistema propuesto para la captura de CO_2 en un crematorio es un proceso de captura postcombustión basado en la absorción de CO_2 en una solución acuosa de MDEA. Este sistema consta de una etapa principal: la absorción.

En la absorción, los gases de escape del crematorio, que contienen una concentración de CO_2, se introducen en una columna de absorción donde se ponen en contacto con la solución de MDEA. Durante este proceso, el CO_2 se disuelve en la solución acuosa, formando un complejo con el MDEA.

Este proceso es eficiente, económico y escalable para su implementación en crematorios de diferentes tamaños, con el beneficio adicional de que se minimizan las emisiones de CO_2 a la atmósfera., proceso que se muestra en la figura 2.

La MDEA es una amina terciaria que, al entrar en contacto con CO_2 disuelto en agua, forma iones bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}) mediante una reacción ácido-base reversible. Este proceso ocurre en la fase líquida de la torre de absorción, donde el CO_2 se transfiere desde la fase gaseosa al líquido. La formación de $MDEA^+$ indica que la reacción de captura ha tenido lugar, ya que es el producto de la protonación de la MDEA tras la reacción con CO_2, como se muestra en la Ec. 1.

$$CO_2\ (g) + H_2O\ (l) \longrightarrow HCO_3^- + H^+ \qquad (1)$$

La MDEA capta el protón H^+ para formar el ión protonado, como se muestra en la Ec. 2:

$$MDEA + H^+ \longrightarrow MDEA^+ \qquad (2)$$

Donde la reacción total simplificada se muestra en la Ec. 3:

$$CO_2 + H_2O + MDEA \longrightarrow HCO_3^- + MDEA^+ \qquad (3)$$

Además, el CO_2 absorbido en agua forma primero HCO_3^-, donde parte de ese bicarbonato puede perder otro protón y transformarse en el ión carbonato CO_3^{2-}, como se muestra en la Ec. 4:

$$HCO_3^- + H_2O \longrightarrow H_3O^+ + CO_3^{-2} \qquad (4)$$

El CO_2 capturado en forma de carbamato de amonio y el ión carbonato, puede ser liberado mediante un proceso de regeneración. Al calentar la solución rica en CO_2, el carbamato se descompone, liberando CO_2 puro que puede ser almacenado o utilizado, mientras que la MDEA se regenera y puede ser recirculada al sistema.

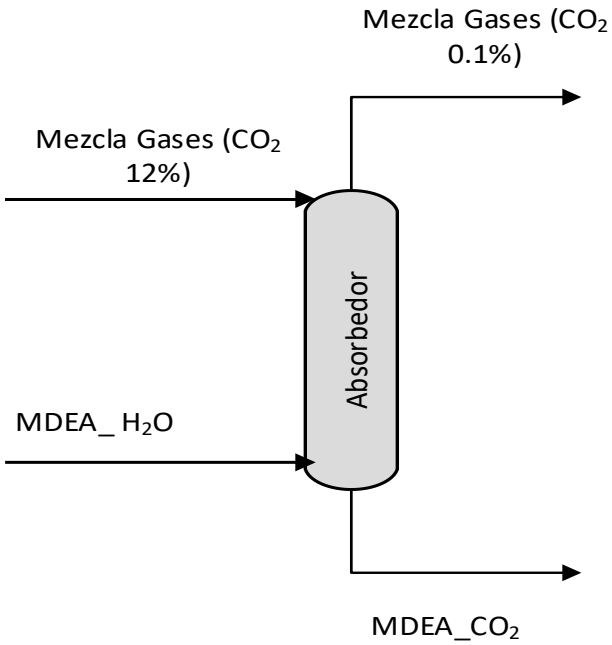


Figura 2. Esquema de Captura de CO_2

Estructura del Modelo en Aspen Plus

La simulación en Aspen Plus se lleva a cabo mediante la creación de un modelo que represente el sistema de captura propuesto. La estructura del modelo se divide en los siguientes bloques principales:

1. Entrada de Gases de Escape:

El modelo de gases de escape se modela con una corriente que contenga CO_2, O_2, N_2 y otros compuestos menores. Las características de esta corriente (como flujo volumétrico, composición y temperatura) se toman de datos típicos de un crematorio.

2. Entrada de la solución acuosa compuesta de MDEA y H_2O.

La solución acuosa MDEA_H_2O, a diferentes concentraciones, es introducida en la columna de absorción para capturar el CO_2 al entrar en contacto con el fujo de gases.

3. Columna de Absorción:

La columna de absorción se modela como una torre de absorción, en la cual se especifica el flujo de la solución de MDEA y su concentración. El modelo incluye la transferencia de masa entre la fase gas y la fase líquida, considerando las condiciones operativas del proceso.

4. Salida de CO_2 capturado con MDE

La sustancia acuosa, cargada del CO_2 capturado, es extraida de la columna de absorción.

5. Salida de Gases resultantes.

El gas resultante es liberado a la atmósfera con pequeñas cantidades de CO_2 residual.

Condiciones de Operación

Para la simulación en Aspen Plus, se definen las siguientes condiciones y supuestos:

1. Gases de Escape del Crematorio:

- Composición típica de los gases de escape: 10-15% de CO_2, 80-85% de N_2 y O_2, y trazas de otros gases.

- Temperatura de entrada: 900-1000°C.

- Presión de entrada: 1 atmósfera (suponiendo que el proceso de cremación ocurre a presión atmosférica).

2. Solución de MDEA:

- Concentración de MDEA: 30 y 50%.

- Temperatura de la solución:60 y 70°C.

- Velocidad de recirculación: Definida para garantizar una captura eficiente sin problemas de corrosión o pérdida de amina.

3. Columna de Absorción:

- Se asume una eficiencia de transferencia de masa alta (90%) para la absorción de CO_2 en la solución de MDEA.

- Número de etapas de la columna y la altura se estima de 10 etapas para obtener una captura eficiente de CO_2.

Selección de Modelo Termodinámico y Configuración Básica del Flujo

- Para modelar el comportamiento de la solución MDEA, se utiliza el modelo termodinámico Electrolyte-NRTL (Non-Random Two-Liquid), que es adecuado para sistemas que contienen disolventes acuosos como el MDEA, ya que considera tanto la interacción entre iones como los efectos de las especies químicas en la fase líquida.

- En la simulación, el flujo de gases de escape se utiliza a una temperatura adecuada para la absorción (60-70°C) antes de ser introducido en la columna de absorción.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelado del proceso en Aspen Plus

El proceso de absorción se modela utilizando el software Aspen Plus, seleccionando las propiedades termodinámicas adecuadas para MDEA y CO_2. Se utiliza una columna de absorción como unidad de operación para simular el contacto entre los gases de combustión y el absorbente MDEA dónde ocurre la reacción química.

Partiendo de una composición de gases, luego de la combustión, de CO_2 al 12%, O_2 al 3.1%, N_2 al 67%, vapor de H_2O al 10%, CO al 0.4%, CH_4 al 0.5%; NOx, SOx y partículas, a una temperatura (T) de 60 y 70ºC, presión (P) de 1.1atm de entrada en el absorbedor. La entrada de mezcla de MDEA_H_2O se simula en varias composiciones, según la literatura, de cada sustancia, al 50 % de cada una, así como 30% y 70% respectivamente con iguales valores de T (60ºC) y P para una fracción de masa de 400kg/h.

El dispositivo de captura de CO_2 en la simulación se compone de una columna de absorción, como se muestra en la figura 3, donde los gases se hacen burbujear en sentido contrario al MDEA.

Los flujos de gas y absorbente se simulan en función de las propiedades termodinámicas, la velocidad de flujo y las concentraciones de CO_2.

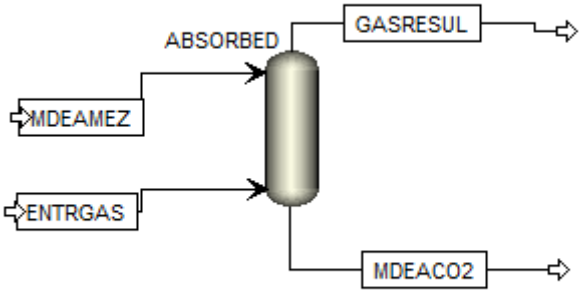


Figure 3. Esquema de Captura de CO_2 en Aspen Plus

Limitaciones del Modelo

1. - En el modelo, se asume una composición de gases de escape estándar basada en datos promedio. Sin embargo, en la práctica, las emisiones de crematorios pueden variar dependiendo de diversos factores, lo que podría afectar la precisión del modelo.

2. - El modelo asume que las propiedades termodinámicas del MDEA son constantes, lo cual puede no ser del todo preciso a lo largo del tiempo debido a la posible degradación de la amina o la variabilidad de las condiciones de operación.

3. - Los contaminantes presentes en los gases de escape (como NOx, SOx y otros compuestos) no fueron modelados detalladamente, aunque podrían afectar la eficiencia de la absorción y la regeneración de la amina.

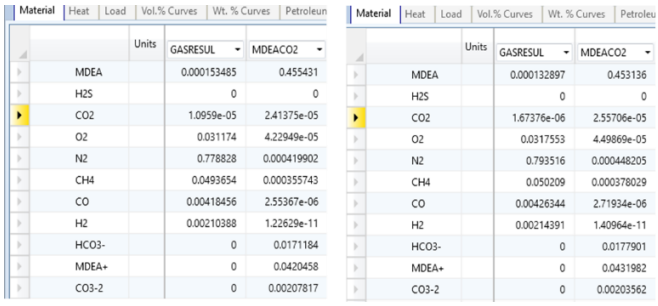
Estos resultados proporcionan una visión clara sobre la efectividad de la captura de CO_2 en crematorios usando

MDEA, subrayando tanto las ventajas como las áreas de mejora del sistema.

El uso de MDEA permite una alta capacidad de absorción y una menor corrosión en las instalaciones en comparación con otros solventes. Además, es más eficiente y menos costoso a largo plazo.

Se realizan varias simulaciones en Aspen Plus, las primeras 4, se realizan configurando el absorbedor para P= 1.1atm, con 10 etapas para una eficiencia de 90% y 200 iteraciones, con diferentes valores de T, 60ºC para las simulaciones 1 y 3, y 70ºC para las simulaciones 2 y 4; el tiempo de contacto en cada etapa de 5s para las simulaciones 1 y 2; y 10s para las simulaciones 3 y 4; la composición de mezcla de MDEA_H_2O al 50% de cada sustancia para un flujo de mezcla de 400kg/h y un flujo de gases de 100kg/h.

Con las configuraciones anteriores se logran diferentes valores de captura de CO_2 en la figura 4 se muestran los resultados de las simulaciones 1 y 3, a) y b) respectivamente, donde se aprecia la mayor captura de CO_2, en cada componente, como resultado de la reacción química. Un resumen de los resultados de las simulaciones 1, 2, 3 y 4 se muestran en la Tabla 1 con sus respectivos valores de eficiencia.



a) Simulación 1

	Units	GASRESUL	MDEACO2
MDEA		0.000153485	0.455431
H2S		0	0
CO2		1.0959e-05	2.41375e-05
O2		0.031174	4.22949e-05
N2		0.778828	0.000419902
CH4		0.0493654	0.000355743
CO		0.00418456	2.55367e-06
H2		0.00210388	1.22629e-11
HCO3-		0	0.0171184
MDEA+		0	0.0420458
CO3-2		0	0.00207817

b) Simulación 3

	Units	GASRESUL	MDEACO2
MDEA		0.000132897	0.453136
H2S		0	0
CO2		1.67376e-06	2.55706e-05
O2		0.0317553	4.49869e-05
N2		0.793516	0.000448205
CH4		0.050209	0.000378029
CO		0.00426344	2.71934e-06
H2		0.00214391	1.40964e-11
HCO3-		0	0.0177901
MDEA+		0	0.0431982
CO3-2		0	0.00203562

Figura 4. Resultados de Captura de CO_2 en Aspen Plus (1ra y 3ra Simulación)

Tabla 1. Resultado de captura de CO_2 en Aspen Plus para 50% MDEA.

Simulación	Tiempo interacción (s)	Temperatura (ºC)	CO_2 capturado (HCO_3^- + CO_3^{-2})(kg/h)	CO_2 no capturado	Eficiencia (%)
1	5	60	11.9781	0.02189	99.82
2	5	70	11.9764	0.02365	99.63
3	10	60	11.9785	0.02154	99.66
4	10	70	11.9770	0.02299	99.64

En un proceso de absorción como el que se simula en Aspen Plus, la eficiencia de captura de CO_2 aumenta a medida que el gas pasa a través de las distintas etapas de la columna de absorción. Cada etapa permite que el CO_2 se transfiera de la fase gaseosa a la fase líquida (solución de MDEA), y la eficiencia de captura mejora conforme se incrementa el número de etapas. Sin embargo, a medida que el número de etapas aumenta, la mejora en la captura tiende a estabilizarse después de un cierto punto.

En la gráfica, el Eje X (Número de Etapas): representa el número de etapas de contacto en la columna de absorción. Cuanto más alta es la cantidad de etapas, mayor es el tiempo de contacto entre el gas y la solución de amina. El Eje Y (Captura de CO_2): muestra la fracción molar de CO_2 que se ha capturado en cada etapa.

En la gráfica, figura 5, se muestra el comportamiento de la captura por etapas de la simulación 1, donde se obtuvo mayor eficiencia de captura; se observa que las primeras etapas (del 1 al 6) muestran un aumento rápido en la captura de CO_2, lo que sugiere que las primeras etapas son las más eficaces en cuanto a la absorción del gas.

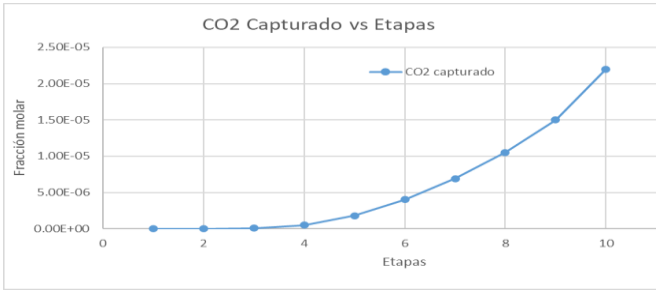


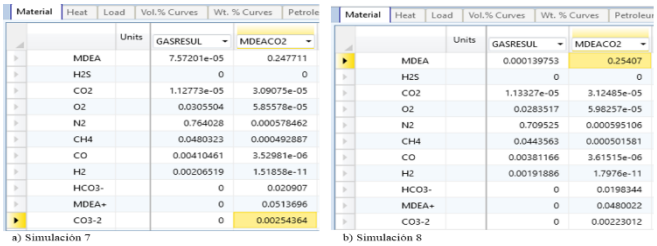
Figura 5. Gráfico de Resultados de Captura de CO_2 vs Etapas en Aspen Plus (1ra Simulación)

Aumentar el número de etapas requiere de más espacio y, en algunos casos, más energía (para mover los líquidos a través de la columna y mejorar la transferencia de masa). Por lo tanto, hay un equilibrio entre la mejora en la captura y los costos operativos adicionales.

Basándose en este tipo de gráfico, un diseño óptimo podría limitar el número de etapas a las necesarias para alcanzar una captura eficiente de CO_2 sin incurrir en costos adicionales innecesarios. Esto es particularmente relevante cuando se evalúa la viabilidad económica de la implementación del sistema de captura.

Las siguientes 4 simulaciones se realizan configurando el absorbedor para iguales valores de T y P, cantidad de etapas, eficiencia, iteraciones y tiempo de contacto; variando la composición de mezcla de MDEA_H_2O al 30 y 70% respectivamente, con iguales valores de flujos.

Con las configuraciones anteriores se logran diferentes valores de captura de CO_2, en la figura 6 se muestran los resultados de las simulaciones 7 y 7, a) y b) respectivamente, donde se aprecia la mayor captura de CO_2, en cada componente, como resultado de la reacción química. Un resumen de los resultados correspondientes a las simulaciones 5, 6, 7 y 8 se muestran en la Tabla 2 con sus respectivos valores de eficiencia.



a) Simulación 7

	Units	GASRESUL	MDEACO2
MDEA		7.57201e-05	0.247711
H2S		0	0
CO2		1.12773e-05	3.09075e-05
O2		0.0305504	5.85578e-05
N2		0.764028	0.000578462
CH4		0.0480323	0.000492887
CO		0.00410461	3.52981e-06
H2		0.00206519	1.51858e-11
HCO3-		0	0.020907
MDEA+		0	0.0513696
CO3-2		0	0.00254364

b) Simulación 8

	Units	GASRESUL	MDEACO2
MDEA		0.000139753	0.25407
H2S		0	0
CO2		1.13327e-05	3.12485e-05
O2		0.0283517	5.98257e-05
N2		0.709525	0.000595106
CH4		0.0443563	0.000501581
CO		0.00381166	3.61515e-06
H2		0.00191886	1.7976e-11
HCO3-		0	0.0198344
MDEA+		0	0.0480022
CO3-2		0	0.00223012

Figura 6. Resultados de Captura de CO_2 en Aspen Plus (7ma y 8va Simulación)

Tabla 2. Resultado de captura de CO_2 en Aspen Plus para 30% MDEA.

Simulación	Tiempo interacción (s)	Temperatura (ºC)	CO_2 capturado (HCO_3^- + CO_3^{-2})(kg/h)	CO_2 no capturado	Eficiencia (%)
5	5	60	9.66814	2.33186	80.42
6	5	70	11.9761	0.02391	99.61
7	10	60	11.9760	0.02396	99.62
8	10	70	11.9753	0.02466	99.61

La eficiencia de captura se define como la cantidad de CO_2 absorbido por la solución de MDEA en relación con el CO_2 total presente en los gases resultantes de la combustión. Es uno de los índices más cruciales para evaluar el rendimiento del sistema, como se muestra en la Ec. 5.

$$Eficiencia\ de\ Captura = \frac{CO_2\ capturado}{CO_2\ total\ en\ gases\ de\ combustión} \times 100 \quad (5)$$

Los resultados de las simulaciones muestran la eficiencia de la captura de CO_2 (99%) bajo diferentes condiciones operativas. Se evaluaron parámetros como la concentración de MDEA y T, y se determinó que ciertas condiciones operativas favorecen una mayor captura de CO_2.

En la siguiente gráfica, el Eje X (simulaciones realizadas): representa el número de simulaciones realizadas para cada % de mezcla de MDEA (30 y 50%). El Eje Y (Temperatura): muestra las T (60 y 70ºC) a las que se realizaron las simulaciones.

En la gráfica, figura 7, se muestra el comportamiento de la captura de CO_2, donde, a pesar de obtener capturas eficientes, mayores del 99% en la mayoría de las simulaciones, sólo en la simulación 5 (30% MDEA) se observan diferencias considerables, quedando por debajo del 90% la eficiencia de captura, en el resto de las simulaciones se muestra una variación muy pequeña para los flujos de gases utilizados, se obtuvo una captura constante para el 30% de la mezcla de MDEA independientemente de la T y tiempos de interacción utilizados.

Se observa que variando la concentración de MDEA, se mejora la eficiencia de captura.

Los resultados indican que la eficiencia de captura de CO_2 es sensible a la concentración de MDEA. Se sugieren condiciones de operación óptimas para maximizar la captura.

La eficiencia se mantuvo alta incluso con variaciones en la concentración de MDEA, lo que sugiere que el sistema de captura propuesto es robusto frente a diferentes condiciones.

La simulación mostró que la temperatura óptima para la absorción se encuentra 60°C.

Los resultados confirman que el uso de MDEA en un proceso de captura de CO_2 en crematorios es eficaz. Sin embargo, la optimización del proceso depende de factores operativos como la temperatura y la concentración del absorbente.

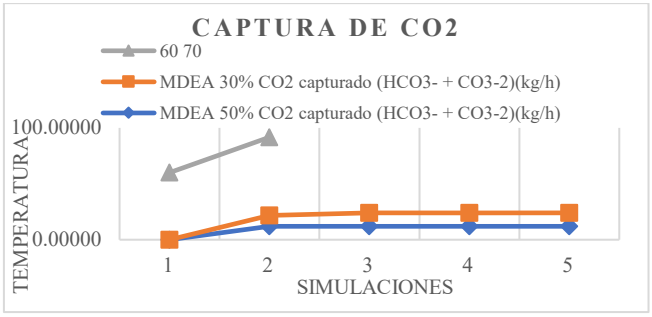


Figura 7. Comparativa de resultados de Captura de CO_2 con Temperatura y Cantidad de MDEA.

Comparando con estudios previos en la literatura sobre la captura de CO_2 con MDEA, los resultados obtenidos en esta simulación muestran valores superiores con la mayoría de los estudios que informan eficiencias de captura entre 90% y 95% para procesos de absorción con aminas. La eficiencia del sistema propuesto supera el rango esperado para tecnologías de captura postcombustión, lo que respalda la viabilidad de usar MDEA en crematorios.

A pesar de que el MDEA es eficaz, tecnologías como la captura por membranas o el uso de otros solventes más avanzados podrían ofrecer mejores rendimientos en ciertas condiciones. Sin embargo, el MDEA sigue siendo una opción viable para muchos procesos industriales.

4. CONCLUSIONES

En el estudio de la captura de CO_2 en crematorios utilizando MDEA, se han observado los siguientes hallazgos clave:

La eficiencia de captura de CO_2 utilizando una solución de MDEA en el sistema de absorción postcombustión es alta, alcanzando un 99% de captura bajo condiciones operativas estándar. Esto sugiere que el sistema es eficaz para reducir las emisiones de CO_2 generadas en los crematorios.

Se establece la temperatura óptima para la absorción, lo cual favorece una mayor captura de CO_2 sin generar un consumo energético excesivo. Además, el número de etapas de absorción influye directamente en la eficiencia, siendo las primeras etapas las más eficientes.

La propuesta de implementar un sistema de captura de CO_2 en crematorios utilizando MDEA es viable, especialmente para aquellos crematorios con una alta tasa de emisión de CO_2. Las principales ventajas de este sistema incluyen:

El sistema permite reducir de manera significativa las emisiones de CO_2, al capturar el 99% del CO_2 lo cual es crucial para cumplir con las normativas ambientales y mejorar el perfil ecológico de los crematorios.

La propuesta de captura de CO_2 utilizando MDEA para crematorios es viable, con altos índices de captura y una clara reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Con un enfoque adecuado en la investigación y mejora de los procesos, esta tecnología puede desempeñar un papel crucial en la reducción de la huella de carbono de los crematorios y en el cumplimiento de las regulaciones ambientales. La simulación muestra que la captura de CO_2 en un crematorio

mediante MDEA es viable y efectiva, con un alto rendimiento bajo condiciones optimizadas.

La simulación en Aspen Plus es una herramienta crucial en la optimización del proceso de captura de CO_2, ya que permite realizar un análisis detallado y preciso de diversos aspectos del proceso, desde la selección de solventes hasta la optimización de parámetros operativos. La variación de la concentración de MDEA, la variación de la temperatura y el tiempo de contacto afectan directamente la capacidad de absorción de CO_2. Se pueden simular diferentes concentraciones, temperaturas y tiempo de interacción para encontrar el valor óptimo. Además, proporciona la flexibilidad necesaria para probar diferentes configuraciones sin incurrir en los costos y riesgos de la experimentación física. Lo cual resulta en un diseño más eficiente, rentable y sostenible para las tecnologías de captura de CO_2.

5. RECOMENDACIONES

Desarrollo de Nuevos Solventes: el MDEA es una opción prometedora, su degradación con el tiempo puede ser un desafío, por lo que se podría explorar el uso de solventes alternativos o aditivos que incrementen la vida útil de la amina y mejoren la eficiencia en la captura.

Reducción de Costos Operativos: diseñar columnas de absorción con mayor capacidad de captura para reducir el número de etapas necesarias y, por ende, los costos operativos.

Monitoreo y Control Continuo: Desarrollar un sistema de monitoreo en tiempo real para la concentración de CO_2 en los gases de escape y en la solución de MDEA. Esto permitiría ajustar dinámicamente las condiciones operativas y optimizar la eficiencia del proceso.

Estudios de Impacto Económico y Ambiental: Realizar un análisis de costo-beneficio detallado que considere no solo los costos de implementación, sino también los beneficios a largo plazo en términos de reducción de emisiones de CO_2, cumplimiento de normativas ambientales y posibles incentivos fiscales por la adopción de tecnologías limpias.

Pilotaje en Crematorios Reales: Implementar un proyecto piloto en un crematorio para validar la viabilidad del sistema en condiciones operativas reales. Esto permitiría ajustar los parámetros de operación y proporcionar datos más precisos sobre los costos y el rendimiento.

6. AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, y Tecnologías e Innovación (SECIHTI) por la beca para desarrollar esta investigación en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet) sede del Tecnológico Nacional de México (TecNM).

7. REFERENCIAS

Antonini, C., Pérez-Calvo, J:F., Van der Spek, M., Mazzotti, M.(2021). Optimal design of an MDEA CO_2 capture plant for low-carbon hydrogen production — A rigorous process optimization approach.

Arachchige, U., Rasenthiran, K., Liyanage, M. (2019). Modelling Of CO_2 Capture Using Aspen Plus For Coal Fired Power Plant. International Journal of Scientific & Technology Research, Volume 8, ISSUE 07, ISSN 2277-8616, 316, IJSTR©2019. www.ijstr.org

Beck, A., & Jones, P. (2021). Carbon Emissions from Modern Crematories. Journal of Environmental Science & Technology.

Becken, S., & McLaren, L. (2021). Electricity-Based Cremation and CO_2 Emissions. Journal of Sustainable Environmental Science.

Environmental Impact of Cremation: CO_2 Emissions and Regulatory Measures. (2022). Environmental Impact Journal, 15(2): 101-115.

Environmental Performance of Electric Cremation Systems: A Comparative Analysis. (2023). Environmental Impact Journal, 20(1): 70-85.

Gupta, V. (2016). Modelling of CO_2 capture using Aspen Plus for EDF power plant, Krakow, Poland. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. October 2016.

Gutiérrez, P., Vigil Montaño, M. R., & Burgos Rodriguez, S. (2014). TECNOLOGIAS DE CAPTURA DE CO_2. Dyna, 89(3), 360–365. https://doi.org/10.6036/7003

Leiqing Hu, Vinh T. Bui, Narjes Esmaeili, Haiqing Lin. (2024). Nanoengineering membrane surfaces: A new paradigm for efficient CO2 capture, Carbon Capture. Science & Technology, Volume 10, 100150, ISSN 2772-6568. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100150

Liu, C., Shao, L., Pan, C., Xu, F., Wu, Z., Zhao, Z., Chen, Y., Fan, H., Zheng, C., & Gao, X. (2024). Multi-stage solvent circulation absorption enhancement: System optimization for energy-saving CO2 capture. Separation and Purification Technology, 332(125644), 125644. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125644

Pedraza, J; Martínez, L; Suarez, L; Rojas, N; Ramírez, J; Mejìa, A; Cano, D; Chavarrio, J; Casallas, J. (2018). Métodos de captura de CO_2: Innovando contra el cambio climático. Innovación y Ciencia, Revista XXV No. 1. AvanCiencia. https://innovacionyciencia.com/articulos_cientificos/metodos-de-captura-de-co2-innovando-contra-el-cambio-climatico

Zhang, M., Xu, T., Zhao, Q., Liu, K., Liang, D., & Si, C. (2024). Cellulose-based materials for carbon capture and conversion. Carbon Capture Science & Technology, 10(100157), 100157. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100157

Won, Y., Lee, S. (2019). Energy Efficiency Improvement and Field Scale Study of Crematory using Computation Fluid Dynamics. Appl. Chem. Eng., Vol. 30, No. 1, February 2019, 95-101. https://doi.org/10.14478/ace.2018.1108

Advances and Challenges in the Implementation of Renewable Energy for Sustainable Development

Pérez Arroyo Juan Pablo*, Gonzáles Meneses Giselle Guadalupe*, Romero Contreras Ana Clara*.

** Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Puebla Av. Tecnológico #420 Fracc. Maravillas. C.P. 72220 Puebla, Pue; email: {i22221296.02, i22221180.02}@puebla.tecnm.mx.*

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Puebla Av. Tecnológico #420 Fracc. Maravillas. C.P. 72220 Puebla, Pue; email: {i21222041.02} @puebla.tecnm.mx.

Abstract: This work examines the barriers to the effective implementation of renewable energy in Mexico, emphasizing sustainable development and social responsibility. It discusses the importance of transitioning to a more sustainable energy model that balances economic growth, social well-being, and environmental protection. The study specifically addresses emerging technologies and strategies designed to expedite this transformation.
Several significant barriers have been identified, including insufficient electrical infrastructure, high initial investment costs, regulatory and technological uncertainty, and intermittency associated with renewable sources such as solar and wind power. Despite these challenges, the adoption of renewable energy has demonstrated substantial positive impacts, including reductions in greenhouse gas emissions, improvements in air quality, enhanced energy security, and tangible social benefits for rural and marginalized communities.
The paper concludes that achieving an effective and sustainable energy transition requires not only technological advancements but also significant changes in public policies, improved financial incentives for private investment, and appropriate socioeconomic adaptations. Ultimately, the transition towards renewable energy is vital for Mexico's comprehensive and sustainable development, reducing fossil fuel dependence and promoting balanced social and industrial growth.

Keywords:
Sustainability, ecosystem, environment, energy, social responsibility.

1. INTRODUCCIÓN

La transición hacia un modelo energético basado en fuentes renovables es un pilar fundamental para alcanzar un desarrollo sostenible y mitigar los efectos del cambio climático. En las últimas décadas, tecnologías como la solar, eólica, hidroeléctrica y biomasa han experimentado un crecimiento significativo, impulsado por compromisos internacionales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Instituciones como la Agencia Internacional de Energía (IEA) y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) han subrayado la necesidad de acelerar esta transformación para limitar el calentamiento global a 1.5°C, conforme a los objetivos del Acuerdo de París.

El avance de las energías renovables se refleja en iniciativas innovadoras alrededor del mundo, mismas que, de ser aplicadas con éxito en el territorio mexicano lograrían demostrar el potencial de las energías limpias para reducir la huella de carbono a nivel global.

Sin embargo, la transición energética no está exenta de desafíos. La variabilidad en la generación de fuentes como la solar y la eólica requiere soluciones innovadoras, como el almacenamiento de energía, la digitalización de las redes eléctricas y una gestión eficiente de la demanda. Además, la modernización de infraestructuras, la adaptación de los marcos regulatorios y la equidad en el acceso a estas tecnologías son aspectos cruciales para garantizar una transición justa y sostenible.

Este artículo analiza los principales avances tecnológicos en el sector de las energías renovables, así como las barreras económicas, políticas y sociales que limitan su expansión. A partir de estudios recientes y experiencias de distintos países, se exploran estrategias para fortalecer la transición energética y garantizar que el uso de energías renovables contribuya efectivamente a un futuro más sostenible.

El problema estudiado es la dificultad en la implementación de energías renovables, un desafío que surge de múltiples factores, como los altos costos iniciales de inversión, la intermitencia de fuentes como la solar y la eólica, la falta de regulación adecuada y la resistencia social al cambio. A pesar de los beneficios ambientales y económicos que representan las energías limpias, su adopción masiva enfrenta barreras que deben ser analizadas y superadas para garantizar una transición energética eficiente y sostenible. Este problema se enmarca en la discusión sobre la transición energética, la sostenibilidad y las políticas públicas. La transición energética es el proceso de cambio desde un sistema basado en combustibles fósiles hacia otro fundamentado en energías renovables, lo que implica transformaciones en la infraestructura, el mercado y la

regulación del sector energético. La sostenibilidad, por su parte, enfatiza la necesidad de equilibrar el crecimiento económico con la protección del medio ambiente y el bienestar social. Además, el estudio de políticas públicas permite comprender cómo los gobiernos pueden incentivar la inversión en energías limpias, mejorar la regulación del sector y fomentar la aceptación social de estas tecnologías.

Este problema se estudia porque el uso de energías renovables es clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y combatir el cambio climático. Sin embargo, sin un análisis profundo de las barreras existentes, la transición energética podría verse ralentizada o limitada a ciertas regiones del mundo. Además, comprender estos desafíos permite diseñar estrategias para optimizar el almacenamiento de energía, mejorar la infraestructura de redes eléctricas, desarrollar incentivos financieros y abordar la resistencia de ciertos sectores económicos y comunidades.

1.1 Subsección

A partir del análisis realizado, consideramos que los avances en la implementación de energías renovables han demostrado resultados prometedores para alcanzar un desarrollo más sostenible. Sin embargo, creemos que aún existen barreras significativas, especialmente en términos políticos, económicos y tecnológicos, que podrían limitar temporalmente su adopción global. En nuestra opinión, es fundamental promover un compromiso conjunto entre gobiernos, empresas y sociedad civil para superar estos desafíos. Pensamos que una mayor cooperación internacional y el aumento de inversión en investigación pueden acelerar significativamente este proceso hacia una transición energética efectiva.

2. METODOLOGÍA

AVANCES TECNOLÓGICOS Y PROYECTOS DESTACADOS

En los últimos años, México ha adoptado tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de sus fuentes de energía renovable. En el ámbito solar, se ha promovido el uso de paneles fotovoltaicos de alta eficiencia, así como sistemas de seguimiento solar (trackers) que aumentan la captación energética. En energía eólica, la incorporación de aerogeneradores de última generación ha permitido elevar la capacidad instalada en regiones como Oaxaca y Tamaulipas.

Por otro lado, el uso de tecnologías digitales como el monitoreo remoto, inteligencia artificial y big data ha optimizado la operación y mantenimiento de plantas renovables, reduciendo costos y mejorando la fiabilidad del suministro eléctrico. Asimismo, se han desarrollado sistemas híbridos que integran energías renovables con almacenamiento en baterías, lo cual representa un avance crucial para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico nacional.

PROYECTOS DESTACADOS DE ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO

La banca de desarrollo, particularmente Nacional Financiera (NAFIN), ha sido un actor fundamental en la estructuración y financiamiento de proyectos de gran escala en el país. A través de esquemas de inversión público-privados y fondos multilaterales, se han impulsado diversos proyectos emblemáticos:

Parque Eólico La Bufa (Zacatecas): con una capacidad instalada de 103 MW, este proyecto permite abastecer de energía limpia a miles de hogares, reduciendo significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero.

Parque Solar Villanueva (Coahuila): es una de las plantas solares más grandes de América Latina, con más de 750 MW de capacidad. Utiliza paneles fotovoltaicos bifaciales que captan energía por ambas caras, aumentando su eficiencia (Gobierno de México, 2023).

Proyecto Eólico Reynosa (Tamaulipas): desarrollado por ACCIONA, tiene una capacidad de 424 MW y ha contribuido a la creación de más de 1,000 empleos durante su construcción.

Planta Geotérmica Cerro Prieto (Baja California): operada por la CFE, es una de las más importantes en América Latina y representa un uso eficiente de recursos térmicos del subsuelo para generar electricidad (CFE, 2022).

Además de estos proyectos a gran escala, se han promovido esquemas de generación distribuida, permitiendo a hogares y pequeñas empresas instalar sistemas solares fotovoltaicos en techos, reduciendo costos energéticos y fomentando el autoconsumo.

PRINCIPALES BARRERAS

“Entre estos obstáculos están la falta de infraestructura adecuada, los costos iniciales elevados, un marco regulatorio ineficaz y la necesidad de avances tecnológicos. Estas fuentes de energía, que incluyen la solar, eólica e hidroeléctrica, no solo son cruciales para disminuir la dependencia de combustibles fósiles, sino que también traen consigo beneficios económicos, como la creación de empleo y la mejora de la calidad del aire.” Diario Noticias (s.f.)

México tiene un enorme potencial para desarrollar energías renovables, gracias a su rica diversidad geográfica y climática. Sin embargo, la transición hacia una matriz energética más sostenible se enfrenta a varios obstáculos que complican su implementación efectiva. A continuación, exploraremos las principales barreras que México debe superar en este ámbito:

1. Viabilidad del recurso y factor de planta bajo

Las fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, dependen de condiciones naturales que varían a lo largo del día y las estaciones. Esta intermitencia hace que la planificación y la garantía de un suministro energético continuo sean un verdadero desafío. Además, el factor de planta, que mide la eficiencia de una instalación, suele ser bajo en estas tecnologías, lo que afecta su competitividad frente a fuentes de energía tradicionales.

2. Infraestructura y conexión a la red eléctrica
La infraestructura eléctrica actual en México no está completamente preparada para integrar de manera eficiente la generación distribuida que proviene de fuentes renovables. Los problemas de conexión a la red y la capacidad limitada de transmisión y distribución son obstáculos significativos para la expansión de proyectos renovables.
3. Retos económicos y financieros
Desarrollar proyectos de energías renovables requiere inversiones iniciales bastante considerables. La incertidumbre en las políticas energéticas y la falta de incentivos claros han generado desconfianza entre los inversionistas, limitando el flujo de capital hacia este sector. Además, la competencia con fuentes de energía fósil que reciben subsidios dificulta la viabilidad económica de las energías limpias.
4. Marco legal y regulatorio
La inconsistencia y los cambios en las políticas energéticas han creado un entorno incierto para el desarrollo de energías renovables. Las modificaciones en la regulación y una mayor centralización en la toma de decisiones han afectado la confianza de los inversionistas y el avance de estos proyectos.

IMPACTOS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN EL DESARROLLO SOSTENIBLE

En el contexto actual de crisis climática y creciente desigualdad socioeconómica, las energías renovables se consolidan como un componente esencial para alcanzar los objetivos del desarrollo sostenible. Su adopción, más allá de los beneficios ambientales inmediatos, conlleva implicaciones sociales, económicas y políticas que transforman positivamente la realidad de las comunidades y fortalecen la resiliencia global frente a los desafíos del siglo XXI.

Uno de los impactos más relevantes de las fuentes renovables es la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, dado que tecnologías como la solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica generan electricidad sin recurrir a la quema de combustibles fósiles. Este cambio en la matriz energética contribuye directamente a la mitigación del cambio climático, uno de los principales retos que enfrenta la humanidad (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2020).

Asimismo, al sustituir fuentes energéticas altamente contaminantes, se disminuye de forma considerable la emisión de partículas nocivas al ambiente, lo cual se traduce en mejoras en la salud pública. La Organización Mundial de la Salud (2016) estima que la contaminación del aire provoca millones de muertes prematuras cada año. En este sentido, la expansión de las energías limpias representa una estrategia efectiva para proteger la salud humana y reducir la carga sobre los sistemas sanitarios.

Desde una perspectiva geopolítica, la diversificación energética mediante fuentes renovables también refuerza la seguridad y soberanía energética, ya que reduce la dependencia de importaciones de combustibles fósiles y protege a los países frente a fluctuaciones de precios o conflictos internacionales que puedan afectar el suministro energético (International Energy Agency [IEA], 2022).

Por otra parte, las energías renovables tienen un impacto social positivo, particularmente en comunidades rurales y aisladas. Estas tecnologías, al no requerir infraestructura compleja para su funcionamiento, posibilitan el acceso a la electricidad en regiones marginadas, lo cual impulsa el desarrollo educativo, sanitario y productivo (Naciones Unidas, 2021). De esta manera, las energías limpias se convierten en una herramienta de inclusión y equidad social.

ACTITUDES FRENTE AL CAMBIO

La transición hacia un modelo energético sustentado en fuentes renovables representa no solo una transformación tecnológica y económica, sino también un proceso de reconfiguración cultural y social de gran alcance. La implementación efectiva de las energías limpias está condicionada por las actitudes de los individuos y las comunidades, las cuales pueden constituir tanto catalizadores como barreras significativas en la ruta hacia el desarrollo sostenible. En este contexto, el análisis de las percepciones sociales y de los factores que inciden en la aceptación o el rechazo de estas tecnologías se vuelve imprescindible para el diseño de políticas públicas efectivas y socialmente inclusivas. Diversos estudios revelan que las actitudes frente al cambio climático no son homogéneas, sino que se encuentran influenciadas por múltiples dimensiones como el nivel de información, la educación ambiental, la confianza en las instituciones, la identidad cultural, la situación económica y las experiencias personales con fenómenos climáticos. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2022) clasifica a la población latinoamericana en seis perfiles actitudinales respecto al cambio climático: alarmados, preocupados, cautelosos, desinteresados, dudosos y escépticos. Esta diversidad de posturas refleja la complejidad del entorno social y la necesidad de diseñar estrategias diferenciadas que aborden las particularidades de cada grupo en la promoción de la transición energética.
Uno de los fenómenos sociales más relevantes en este ámbito es el denominado NIMBY (“Not In My Backyard”), que pone de manifiesto la paradoja entre el respaldo generalizado hacia las energías renovables y la oposición localizada a su implementación. Si bien existe un consenso creciente sobre la necesidad de abandonar los combustibles fósiles, muchas comunidades rechazan la instalación de proyectos específicos cerca de sus territorios, argumentando posibles impactos negativos sobre el paisaje, la biodiversidad, la economía local o la calidad de vida. Esta situación, observada incluso en países con políticas avanzadas en energía renovable como Francia o Alemania, da cuenta de una tensión estructural entre

las necesidades globales de mitigación del cambio climático y los intereses inmediatos de las poblaciones locales (Wikipedia, 2024).

La aceptación social de las energías renovables, por tanto, no depende únicamente de sus beneficios ambientales o de su eficiencia técnica, sino de una multiplicidad de factores interrelacionados. La percepción de los beneficios locales —como la generación de empleo, la mejora del acceso a energía limpia o la dinamización de la economía regional— influye de manera determinante en la actitud de las comunidades. Sin embargo, cuando estas perciben que los costos serán internalizados localmente mientras los beneficios se externalizan hacia empresas foráneas o actores gubernamentales, emerge una resistencia legítima que no puede ser desestimada. En este sentido, la "licencia social para operar", entendida como el consenso no escrito pero necesario de las comunidades, se convierte en un elemento central para la viabilidad de cualquier proyecto energético (El País, 2024). Asimismo, el acceso a información veraz, oportuna y basada en evidencia científica es fundamental para contrarrestar la desinformación que suele alimentar percepciones erróneas o temores infundados. Estudios como el de la Universidad de Rhode Island (2021) han demostrado que la divulgación de contenidos claros sobre el funcionamiento, los beneficios y los impactos potenciales de las tecnologías renovables mejora notablemente la aceptación pública. En este sentido, la educación ambiental y la alfabetización energética, integradas de forma transversal en los sistemas educativos y en las políticas de comunicación institucional, representan estrategias clave para fomentar una ciudadanía informada y proactiva en materia de sostenibilidad.

No obstante, es indispensable reconocer que las actitudes frente al cambio están mediadas por contextos estructurales más amplios. En regiones donde persisten altos niveles de desigualdad, pobreza energética o carencias en los servicios básicos, la prioridad de las personas suele estar enfocada en la satisfacción de necesidades inmediatas más que en los beneficios ambientales de largo plazo. En estos casos, la transición energética corre el riesgo de ser percibida como una imposición externa, distante de las realidades locales. Por ello, los programas de energía renovable deben enmarcarse en estrategias integrales de justicia social y desarrollo territorial, garantizando que los sectores históricamente marginados no queden excluidos de los beneficios de la descarbonización.

ESCENARIO IDEAL HACIA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Visualizar un escenario ideal para la implementación de energías renovables en el marco del desarrollo sostenible implica concebir un sistema energético integral, justo, resiliente y culturalmente sensible. Este escenario supera el enfoque meramente tecnológico y se fundamenta en la articulación de políticas públicas sólidas, innovación inclusiva, gobernanza participativa y equidad en el acceso a los beneficios del nuevo modelo energético.

En dicho contexto ideal, las políticas energéticas estarían orientadas por una visión de largo plazo que prioriza la sostenibilidad por encima de intereses económicos de corto alcance. Esta visión sería respaldada por marcos regulatorios estables, transparencia institucional y un sistema de gobernanza multinivel que involucre activamente a gobiernos locales, regionales y nacionales. La planificación energética estaría guiada por principios de justicia ambiental y respeto por las particularidades socio-territoriales, evitando enfoques centralistas que históricamente han marginado a las comunidades rurales e indígenas.

Desde el punto de vista técnico, este escenario ideal contemplaría una matriz energética diversificada, limpia y descentralizada, donde las fuentes renovables —solar, eólica, geotérmica, hidráulica de pequeña escala y biomasa— sean aprovechadas de manera eficiente y sostenible. La descentralización del sistema permitiría el surgimiento de microrredes, sistemas de generación distribuida y esquemas de autoconsumo, lo cual reduciría la dependencia de grandes infraestructuras y fomentaría la autonomía energética de comunidades y territorios. Para ello, se requeriría un ecosistema robusto de innovación donde los centros de investigación, universidades, gobiernos y el sector privado trabajen en conjunto para el desarrollo y adaptación de tecnologías apropiadas al contexto local (IRENA, 2023).

En este marco, los proyectos energéticos serían concebidos no solo como obras de infraestructura, sino como procesos de transformación social, con una participación comunitaria plena y efectiva. La ciudadanía no se limitaría a ser consultada, sino que tendría un papel activo en todas las fases del proyecto: diagnóstico, planificación, implementación y evaluación. Esta participación correspondería a un modelo de "licencia social para operar" profundamente arraigado en la legitimidad del consenso local y sustentado en la distribución justa de beneficios. Las comunidades tendrían garantizado el acceso a información clara, culturalmente pertinente y basada en evidencia científica, lo cual fortalecería su capacidad de decisión frente a los impactos e implicaciones del cambio energético (OCDE, 2021).

A nivel educativo, se integraría de forma transversal la alfabetización energética en todos los niveles de enseñanza, promoviendo una ciudadanía crítica y ambientalmente consciente. Este proceso iría acompañado de campañas públicas sostenidas de comunicación y divulgación científica que contrarresten la desinformación y promuevan la apropiación social del conocimiento. Los medios de

comunicación, las redes sociales y los espacios comunitarios serían aliados estratégicos en la construcción de una cultura energética basada en la cooperación, la corresponsabilidad y el compromiso colectivo.

En cuanto a la equidad, el escenario ideal incorporaría un enfoque explícito de justicia energética, garantizando que ningún grupo social quede excluido del acceso a una energía asequible, segura y sostenible. Se priorizarían programas de electrificación rural, tarifas diferenciadas, subsidios focalizados y líneas de financiamiento accesibles para comunidades vulnerables. La transición energética no sería vista únicamente como un proceso tecnológico, sino como una oportunidad para corregir desigualdades históricas y construir un modelo de desarrollo inclusivo y redistributivo.

Por otro lado, desde el plano económico, este escenario contemplaría un entorno favorable para la inversión sostenible, mediante instrumentos como incentivos fiscales, fondos verdes, financiamiento climático y esquemas de riesgo compartido. Estos mecanismos apoyarían tanto a grandes desarrolladores como a cooperativas comunitarias, facilitando un equilibrio entre eficiencia económica y sostenibilidad social. Además, los indicadores de evaluación del progreso irían más allá de los megavatios instalados e incorporarían criterios de impacto social, conservación ambiental, empoderamiento comunitario y resiliencia frente al cambio climático.

Este escenario ideal estaría orientado a consolidar una visión regional latinoamericana que, reconociendo su alto potencial en recursos renovables, su diversidad biocultural y su vulnerabilidad climática, apueste por un liderazgo transformador en la transición energética global. Una América Latina que no solo adopte tecnologías limpias, sino que proponga al mundo modelos energéticos justos, sustentables y centrados en las personas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis realizado surgen dos aspectos fundamentales. En primer lugar, se identificaron claramente las principales problemáticas para la implementación efectiva de energías limpias en México, destacando la insuficiente infraestructura eléctrica, costos iniciales elevados, incertidumbre regulatoria y tecnológica, así como la intermitencia en fuentes energéticas como la solar y la eólica. Estas barreras no solo ralentizan el desarrollo del sector renovable, sino que también limitan significativamente el potencial de expansión y adopción generalizada en distintas regiones del país.

En segundo lugar, se reconocieron los impactos positivos que ya se han logrado mediante la implementación de proyectos destacados de energías renovables. Estos impactos se reflejan en una significativa reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, mejoras tangibles en la calidad del aire y una mayor resiliencia energética frente a fluctuaciones internacionales en el mercado de combustibles fósiles. Asimismo, la adopción de energías limpias ha mostrado un impacto social positivo notable, particularmente al facilitar el acceso a la energía eléctrica en comunidades rurales y marginadas, contribuyendo directamente al desarrollo sostenible a nivel local y regional.

A partir de estos resultados, es evidente que, pese a los desafíos actuales, las energías renovables ofrecen múltiples beneficios económicos, ambientales y sociales. Por tanto, resulta esencial fomentar la cooperación interinstitucional, mejorar las políticas públicas y promover la inversión tecnológica, facilitando así una transición energética más rápida y eficiente.

4. CONCLUSIONES

La implementación de energías renovables en México enfrenta diversas barreras significativas, incluyendo infraestructura insuficiente, altos costos iniciales, y una regulación energética incierta. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías ha demostrado generar impactos altamente positivos, tanto en la mitigación del cambio climático mediante la reducción sustancial de emisiones, como en la mejora de la calidad ambiental y social de las comunidades involucradas.

Para superar los desafíos identificados, se requiere una estrategia integral que involucre reformas políticas claras, esquemas financieros que incentiven la inversión privada, así como el fortalecimiento tecnológico y de infraestructura. Es fundamental involucrar activamente a la sociedad y al sector privado, fomentando un compromiso conjunto hacia un futuro energético más sostenible. Con los resultados obtenidos se fuerza, la importancia de continuar impulsando las energías renovables, reconociéndolas no solo como una alternativa viable a los combustibles fósiles, sino como una necesidad estratégica para el desarrollo sostenible, la equidad social y la seguridad energética del país.

REFERENCIAS

Banco Interamericano de Desarrollo (2022) *Los 6 tipos de actitudes frente al cambio climático*. Disponible en: https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/los-6-tipos-de-actitudes-frente-al-cambio-climatico/ (Accedido: 17 junio 2025).

CFE (2022) *Plantas de generación geotérmica*. Comisión Federal de Electricidad. Disponible en: https://www.cfe.mx/generacion/geotermia (Accedido: 17 junio 2025).

El País (2024) *Licencia social para impulsar la transición ecológica*. Disponible en: https://elpais.com/proyecto-tendencias/2024-08-30/licencia-social-para-

impulsar-la-transicion-ecologica.html (Accedido: 17 junio 2025).

Gobierno de México (2023a) *Plan Nacional de Desarrollo Energético*. Secretaría de Energía (SENER). Disponible en: https://www.gob.mx/sener (Accedido: 17 junio 2025).

Gobierno de México (2023b) *Proyectos de Energía Renovable*. Nacional Financiera. Disponible en: https://www.gob.mx/nafin/acciones-y-programas/proyectos-de-energia-renovable (Accedido: 17 junio 2025).

International Energy Agency (2022) *World energy outlook 2022*. Disponible en: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022 (Accedido: 17 junio 2025).

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2020) *Renewable power generation costs in 2020*. Disponible en: https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020 (Accedido: 17 junio 2025).

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023a) *Renewable energy and jobs – Annual review 2023*. Disponible en: https://www.irena.org/publications/2023/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2023 (Accedido: 17 junio 2025).

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023b) *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*. Disponible en: https://www.irena.org/publications/2023/Mar/WETO-2023 (Accedido: 17 junio 2025).

Naciones Unidas (2021) *Informe sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2021*. Disponible en: https://unstats.un.org/sdgs/report/2021/ (Accedido: 17 junio 2025).

Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Ciudad de México (2022) *El mercado de las energías renovables en México*. ICEX España Exportación e Inversiones. Disponible en: https://www.icex.es (Accedido: 17 junio 2025).

Organización Mundial de la Salud (OMS) (2016) *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. Disponible en: https://www.who.int/publications/i/item/9789241511353 (Accedido: 17 junio 2025).

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (2021) *Mejorar la gobernanza de las inversiones en infraestructura sostenible*. Disponible en: https://www.oecd.org/investment/mejorar-la-gobernanza-de-las-inversiones-en-infraestructura-sostenible.htm (Accedido: 17 junio 2025).

University of Rhode Island (2021) *The Effects of Information on Public Attitudes Toward Renewable Energy*. Disponible en: https://digitalcommons.uri.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1004&context=maf_facpubs (Accedido: 17 junio 2025).

Wikipedia (2024) *Wind power in France*. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_France (Accedido: 17 junio 2025).

Asphalt Mixture Combined with Electronic Scraps

Alonso Gaeta, Reynaldo *, Figueroa Hernández, Luis Ángel *, Zúñiga Neria, Guillermo Capistrano*

** Tecnológico Nacional de México, Campus Ciudad Hidalgo, Av. Ing. Carlos Rojas Gutiérrez 2120, Fraccionamiento Valle de la Herradura, Ciudad Hidalgo Michoacán. (e-mail:* ralonso@*cdhidalgo.tecnnm.mx).*

Abstract: This project relates to the development of an asphalt mixture incorporating electronic scraps and plastic residues extracted from end-of-life electronic devices. These materials are classified and subjected to milling, sieving, and separation processes based on specific granulometry. The processed waste is then used to create an asphalt mixture, which is heated to a specific temperature until reaching the gelation and plasticization point—an essential process for enhancing the durability and resistance of conventional asphalt. The objective is to develop a new asphalt mixture incorporating electronic waste and recycled plastics obtained from electronic device casings, such as ABS, HIPS, and PC, that meets or exceeds the parameters established by the SCT for hot-mix asphalts. To develop this mixture, various laboratory tests were conducted, including Marshall tests and destructive testing, to optimize the formulation and ensure compliance with SCT regulations. Based on the activities carried out, the results confirmed the achievement of the objective by developing a mixture with improved mechanical properties, such as durability, wear resistance, hardness, compression (stability), and compactability (flow). Notably, the mixture complies with the parameters established in SCT standards N-CMT-4-04/17 and N-CMT-4-10 05-003-16 for patching and asphalt layer applications.

Keywords: Asphalt mixture, electronic waste, recycled plastics, durability, Marshall test.

1. INTRODUCCIÓN

(1) Contextualización del problema: El crecimiento acelerado de la tecnología ha generado un aumento significativo en los residuos electrónicos, alcanzando más de 1.1 millones de toneladas al año en México, de los cuales solo el 10% se recicla correctamente. Estos desechos contienen materiales contaminantes que afectan el suelo y los mantos acuíferos, representando un riesgo ambiental y para la salud humana [1].
Paralelamente, el deterioro de las vialidades, especialmente la aparición constante de baches, es un problema que impacta la movilidad y seguridad de la población. El proyecto surge como una alternativa innovadora al integrar residuos electrónicos en mezclas asfálticas, mejorando la durabilidad y resistencia del pavimento, al mismo tiempo que contribuye a la reducción del impacto ambiental de estos desechos.

(2) Estado del arte y antecedentes: El uso de materiales reciclados en la construcción de pavimentos ha sido objeto de diversas investigaciones a nivel global, destacándose iniciativas como el desarrollo de pavimentos autorreparables en México, como el Pavimento de Goma Autorregenerativo (Paflec), creado a partir de neumáticos reciclados, que permite la reparación automática al entrar en contacto con agua [2]. En Costa Rica, se desarrolló una mezcla asfáltica con plástico reciclado de botellas, que mejora la resistencia a la deformación y agrietamiento [3]. En Escocia, la empresa MacRebur introdujo un asfalto ecológico que sustituye parte del betún por gránulos de plástico reciclado, aumentando la durabilidad de las carreteras y reduciendo la dependencia de recursos no renovables [4]. Estos avances reflejan la tendencia mundial de incorporar materiales reciclados en pavimentos para mejorar sus propiedades mecánicas y disminuir el impacto ambiental.

(3) Justificación y contribución del trabajo: La generación de residuos electrónicos en México ha experimentado un incremento significativo, alcanzando más de 1,2 millones de toneladas métricas en 2020, lo que representa un aumento del 17,9 % respecto a 2015 (Statista Research Department, 2020). A nivel mundial, la problemática es aún mayor, con 53,6 millones de toneladas generadas en 2019 y una proyección de 74,7 millones para 2030, según el Global E-Waste Monitor 2020 de Naciones Unidas. Ante este desafío ambiental, el proyecto surge como una alternativa innovadora para mitigar la contaminación del suelo por desechos electrónicos, incorporándolos en mezclas asfálticas para mejorar las propiedades mecánicas del pavimento, promoviendo así una infraestructura vial más sostenible y resistente.

(4) Organización del artículo: El resto del documento está estructurado de la siguiente manera: en la sección de Metodología se describen las etapas seguidas para el desarrollo de la nueva mezcla asfáltica incorporando residuos electrónicos. A continuación, en la sección de Resultados, se presentan los hallazgos obtenidos a partir de la investigación. Posteriormente, se incluyen las Conclusiones, seguidas del

apartado de Referencias y, finalmente, los Anexos, que complementan la información del proyecto.

2. METODOLOGÍA

El proceso de transformación de residuos electrónicos en material útil para el bacheo de carpetas asfálticas comienza con la recolección de aparatos electrónicos en desuso (Fig. 1.).

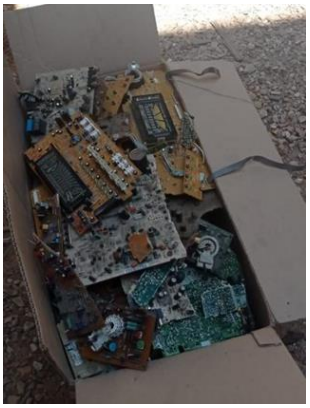


Fig. 1. Recolección de residuos electrónicos.

Tras la separación de las tarjetas madre y la clasificación de los gabinetes por tipo de plástico, ABC (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), HIPS (Poliestireno de Alto Impacto) y PC (Policarbonato), después, se procede a retirar cables y metales como lo son los flybacks, transformadores y disipadores de calor, así como, membranas conductoras y elementos de vidrio, siendo estos los cinescopios de televisiones o displays (Fig. 2).



Fig. 2. Extracción de caratulas, cables, membranas, metales y vidrios.

Los materiales seleccionados se trituran individualmente hasta obtener hojuelas finas (Fig. 3), que luego se tamizan para seleccionar el granulado óptimo (Fig. 4).



Fig. 3. Molienda de los residuos electrónicos en hojuelas.



Fig. 4. Tamizaje de las hojuelas para selección del granulado.

La granulometría utilizada es la del #40 o malla #40 (Fig. 5) en adelante para la placa electrónica y en los plásticos se trabajan a partir de la malla #10 (Fig. 6).



Fig. 5. Granulometría de la placa electrónica



Fig. 6. Granulometría de los plásticos

Este granulado se mezcla con asfalto (Fig. 7), siguiendo las proporciones establecidas por la normativa, para crear especímenes de prueba (Fig. 8).



Fig. 7. Pesado y mezclado de los materiales para realizar los especímenes.



Fig. 8. Traslado de la mezcla del horno al molde

La mezcla se calienta en un horno (Fig. 9) y se moldea mediante el método Marshall, que implica compactar la mezcla en moldes cilíndricos (normalizados) (Fig. 10).



Fig. 9. Calentamiento de la mezcla.



Fig. 10. Creación de pastillas con el pistón

Los especímenes resultantes se dejan reposar durante siete días, posteriormente se marcan para su correcta identificación al momento de ensayarlos (Fig. 11) posteriormente, se obtienen diferentes parámetros como los pesos del espécimen (Fig. 12) tanto suspendido, como sumergido en agua (Fig. 13), de igual manera, la medida de su periferia y espesor (Fig. 14).



Fig. 11. Reposo y marcado de las pastillas para ensayos posteriores.



Fig. 12. Pesado del espécimen



Fig. 13. Espécimen como sumergido en agua



Fig. 14. Medida de su periferia y espesor

Para la determinación de características del material se someten los especímenes a temperaturas críticas establecidos en la norma (Fig. 15).



Fig. 15. Horno para temperaturas críticas

Para determinar valores referentes a la resistencia del material se somete el espécimen a cargas por medio de una Prensa Marshall (Fig. 16), dónde se llega hasta la fractura del espécimen, y se obtienen valores de estabilidad y flujo del material con el que están hechas las pastillas de prueba. Las mezclas asfálticas convencionales rondan desde los 1000 hasta los 1200 kgf, y de ~800 kgf para trafico ligero (*Norma N·CMT·4·05/02: Resistencia al flujo plástico en mezclas asfálticas mediante el método Marshall*) [5], mientras que la nueva mezcla asfáltica soportó en promedio valores de ente 1350 y 1500 kgf que, de acuerdo a la norma antes mencionada, la nueva mezcla se encuentra en la categoría de mezclas modificadas o reforzadas, es decir > 1200 kgf.



Fig. 16. Prensa Marshall

El material es seccionado (Fig. 17) para identificar las partículas agregadas, además para poder reconocer la compactación que adquiere el material una vez que se eleva la temperatura.



Fig. 17. Espécimen seleccionado

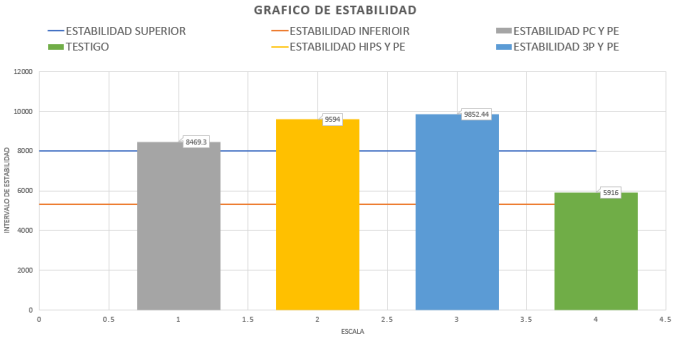
La figura anterior representa la mezcla asfáltica con residuos electrónicos, donde se logra apreciar la compactación que tiene y el encapsulado de los residuos, mientras que para el asfalto convencional la compactación es menor, se puede apreciar por la porosidad de la pastilla, mostrada de la siguiente (Fig. 18).



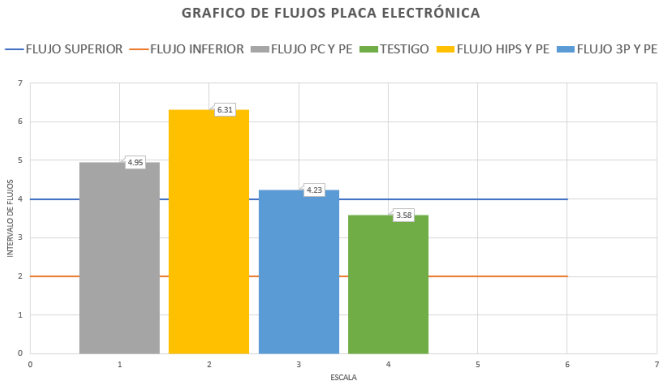
Fig. 18. Porosidad de espécimen convencional

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Una vez teniendo esto, se realiza un análisis de los resultados mediante gráficas, para ver el comportamiento de la mezcla asfáltica con los agregados, para ambas gráficas; las líneas horizontales representan el intervalo de valores que puede tomar la mezcla. Para el caso de estabilidad o resistencia se puede tener valores de 5340 - 8000 N o mayores.



Gráfica 1. Estabilidad de las mezclas



Gráfica 2. Resultados de las pruebas de flujos

- La primera barra indica la estabilidad de PS y Placa electrónica los valores son aceptables.
- Segunda barra indica la estabilidad de HIPS y Placa electrónica los valores son aceptables.
- Tercera barra indica la estabilidad al agregar los 3 tipos de plásticos y placa electrónica es aceptable y la ideal.
- Cuarta barra indica el valor de la mezcla convencional o testigo.

En la gráfica 1, se visualizan los datos obtenidos por medio del ensayo Marshall de la estabilidad y flujo agregando la molienda de la placa electrónica y los termoplásticos.

Para la gráfica 2, las líneas horizontales representan el intervalo de valores que puede tomar la mezcla. Para el caso del flujo se puede tener 2 - 4 in con una tolerancia de +/- 0.5, de acuerdo a la norma.

- Primera barra indica el flujo de PS y Placa electrónica los valores no son aceptables.
- Segunda Barra indica el flujo de HIPS y Placa electrónica los valores no son aceptables.
- Tercera barra indica el flujo al agregar los 3 tipos de plásticos y placa electrónica el valor está dentro de la tolerancia y es aceptable.
- Cuarta barra indica el valor de la mezcla común o testigo.

Los resultados obtenidos muestran que la mezcla asfáltica en unión con residuos electrónicos, puede ser aplicada para mezclas asfálticas en caliente y bacheo, cumpliendo con los requerimientos de las normativas N-CMT-4-04/17 Y N-CMT-4-05-003-16 que establece la SCT (secretaria de Comunicaciones y transportes).

Es importante hacer mención que para llevar a cabo el desarrollo de las pruebas anteriores se tomó el apoyo del departamento del "SICC Ingenieros" (supervisión y control de calidad), haciendo uso de su laboratorio ubicado en la ciudad de Morelia, Michoacán. Donde se otorgó un informe que establece que el proyecto cumple con las normativas de la SCT (Fig. 19).

Cabe resaltar que, se implementó una muestra piloto (Fig. 18) para poder identificar el comportamiento del material expuesto a la intemperie, la aplicación piloto fue hecha sobre la calle Guillermo Prieto, colonia Centro, en Ciudad Hidalgo Michoacán, a la fecha, no muestra deterioro significativo de desgaste y/o falla.



Fig. 18. Aplicación de la nueva mezcla asfáltica

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman el éxito de esta investigación, Se logró desarrollar una mezcla asfáltica innovadora que supera las propiedades mecánicas de las mezclas convencionales, tal como demuestran los ensayos destructivos. Este material, sólido y homogéneo, cumple rigurosamente con las normativas de la SCT, abriendo así un camino prometedor para la construcción de carreteras más duraderas y sostenibles. Con esta innovación, esperamos impulsar significativamente la reutilización de residuos electrónicos y plásticos, transformando un problema ambiental en una solución constructiva.

REFERENCIAS

[1] Pérez, J. y González, M. (2019) 'Contaminación por residuos electrónicos: una amenaza creciente', Revista de Medio Ambiente y Sociedad, 14(2), pp. 45–59.

[2] Briseño, I. A. (2019). Pavimento de goma autorregenerativo (Paflec). El Universal. https://www.eluniversal.com.mx

[3] Lanamme. (2018). Desarrollo de mezcla asfáltica con plástico reciclado. Infobae. https://www.infobae.com

[4] MacRebur. (2018). Asfalto ecológico con gránulos de plástico reciclado. Infobae. https://www.infobae.comBrown, F., Harris, M.G., and Other, A.N. (1998). Name of paper. In Name(s) of editor(s) (ed.), *Name of book in italics*, page numbers. Publisher, Place of publication.

[5] Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (2014) Norma N·CMT·4·05/02: Resistencia al flujo plástico en mezclas asfálticas mediante el método Marshall. México: Dirección General de Servicios Técnicos. Disponible en: https://www.sct.gob.mx

State of the Art on Sustainable Technology Use in Administrative and Operational Processes in Mexican Universities.

Leyva Luciano Joselyn *, Olmos Barba Emmanuel *, Castro Sánchez Noe Alejandro *, Baltazar Alcaraz Karime *.

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Int. Internado Palmira S/N, C.P. 62490. Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos, México*
(e-mail: {m2ce163, noe.cs, emmanuel.ob, d22ce075}@cenidet.tecnm.mx})

Abstract:

Sustainable technologies are increasingly being implemented in higher education institutions as essential tools for optimizing administrative and operational processes, enabling informed decision-making. These technologies contribute to sustainability by positively impacting the three key pillars: economic, social, and environmental. As a result, higher education institutions can reduce their carbon footprint while promoting quality education and climate action, aligning with the Sustainable Development Goals.

This study focuses on the state of the art through a literature review analyzing various sustainable technologies employed in both private and public universities. By examining these cases, the research identifies key trends and the impacts associated with adopting such technologies. The findings indicate that this topic requires further dissemination and research to highlight best practices and address economic, technical, and organizational challenges in the adoption of sustainable technologies.

Keywords: Sustainable technologies, higher education, sustainability,sustainable development goals

1. INTRODUCCIÓN

Las Tecnologías sostenibles son relevantes para mejorar los procesos administrativos y operativos de las instituciones que van desde la planificación hasta la toma de decisiones, la gestión de capital humano, recursos tecnológicos y materiales; así mismo, se busca reducir el impacto ambiental. En este contexto, se destacan las tecnologías sostenibles tales como el Internet de las Cosas, Blockchain, realidad virtual y aumentada, entre otras.

Es importante entender cómo estas tecnologías pueden usarse para enfrentar los desafíos actuales sobre la sostenibilidad. Sin embargo, las instituciones de educación superior se enfrentan continuamente al desafío de adaptarse a un entorno en constante cambio, en el que se ven involucrados avances tecnológicos en continua evolución. La implementación de estas tecnologías varía significativamente entre las Instituciones de Educación Superior (IES) debido a su infraestructura, limitaciones presupuestarias, capacitación, la falta de conocimiento sobre las tecnologías disponibles, así como sus diversas y políticas institucionales, lo que genera diversidad en sus resultados.

La estructura de este trabajo se presenta de la siguiente manera: la Sección 2 presenta los trabajos relacionados y fundamentos teóricos. En la sección 3 se muestra el uso de las tecnologías sostenibles en las IES. La Sección 4 donde aborda la clasificación de las tecnologías. La sección 5 presenta las conclusiones y trabajos futuros.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se dan a conocer los principales conceptos y teorías para contar con un mejor contexto de esta investigación.

2.1. Sostenibilidad

La sostenibilidad se entiende como el progreso que satisface las demandas de las personas sin poner en riesgo la habilidad de las generaciones venideras para cubrir sus propias necesidades. El objetivo principal del desarrollo es cubrir las necesidades y aspiraciones humanas.

Esto conlleva tres elementos decisivos como lo ecológico, lo económico y lo social. Al fusionar estos tres elementos, obtenemos las dimensiones de sostenibilidad, equidad, sostenibilidad y viabilidad. (Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio Ambiente Desarrollo).

2.2. Tecnologías sostenibles

La tecnología sostenible se caracteriza por desarrollar innovaciones empleando materiales y procesos amigables o respetuosos con el medioambiente, así como aplicar dichas tecnologías para resolver desafíos ambientales, sociales y de gobernanza (ESG). Estas soluciones pueden abarcar desde dispositivos físicos, como los paneles solares, hasta herramientas digitales para el análisis y gestión del desempeño ESG.

Mientras que las TIC, Tecnologías de la Información y la Comunicación, se enfocan en el uso de dispositivos y redes

para procesar, transmitir y almacenar información. (Rouse,2024)

2.3 Agenda 2030

Consiste en un plan de acción global destinado a fomentar el progreso social y económico sostenible en todo el mundo y fortalecer la paz universal en un concepto más amplio de la libertad. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen una convocatoria universal para poner fin a la pobreza, salvaguardar el planeta y mejorar las perspectivas de las personas en todo el mundo.

En 2015, todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas aprobaron 17 Objetivos como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de 2015, en la cual se establece un plan para alcanzar los Objetivos en 15 años. (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2017)

3. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

Una revisión de la literatura es una búsqueda de información, la cual responde a una pregunta de investigación sobre el tema de tecnologías con un enfoque sostenible. En total se recolectaron 5 artículos entre 2016 y 2024 en las bases de datos IEEE, Google académico, Elsevier y Springer. El perfil inicial de los artículos recabados se concentró en cuatro principales criterios: de primera instancia son las bases de datos antes mencionadas, los descriptores de búsqueda según las categorías abstraídas de los objetivos, artículos escritos en inglés y español y el criterio cronológico de artículos publicados entre los últimos cinco años.

Fue necesario identificar palabras clave en español e inglés tales como: tecnologías sostenibles/ Sustainable technologies, instituciones de educación superior/ Higher Education Schools, Procesos administrativos y operacionales/ Administrative and operational processes.

Hernández et al. (2020) hacen mención acerca la aplicación de la tecnología digital Blockchain en el ámbito educativo donde a pesar de sus beneficios, enfrenta obstáculos tanto tecnológicos como organizacionales. Esta herramienta es la más utilizada para tener un mejor control de documentos oficiales en las instituciones ya que esto es información inmutable teniendo como beneficio la seguridad de información personal.

Es por ello que dentro de los objetivos existen metas clave que contribuyen a una mejora en la educación tal como es la meta 4.4 que, en el enfoque educativo, garantiza veracidad de certificados y mejora la movilidad académica, de igual manera, la meta 12.6 donde nos indica la adopción de prácticas sostenibles esta tecnología promueve transparencia institucional en sostenibilidad.

Pozzo et al. (2024), llevan a cabo una perspectiva acerca de la aplicación de la realidad virtual en la educación superior donde realizan un estudio en el que especifica la importancia como herramienta educativa, administrativa y su potencial para mejorar el acceso y la calidad de la educación. Los hallazgos indican la necesidad de investigar más a fondo el uso de la realidad virtual en educación superior y las oportunidades que esta tecnología puede ofrecer para mejorar el acceso y la calidad educativa en sus procedimientos, así como posibilidad de realizar experimentos o simulaciones sin generar residuos peligrosos promoviendo la educación ambiental y la seguridad en prácticas de laboratorio.

Esta tecnología contribuye a las metas 4.4. donde aumentará las competencias técnicas y profesionales, seguida de la meta 4.7 donde promoverá la educación para el desarrollo sostenible permitiendo experiencias educativas más efectivas y sostenibles sin necesidad de laboratorios físicos o viajes. De igual manera la meta 13.3. contribuirán en la sensibilización mediante a simuladores que demuestren consecuencias del cambio climático.

Abad et al. (2020) denotan sobre la implementación de la realidad aumentada (AR) en la educación universitaria y su progreso en años actuales. Señalan que, a través de un estudio bibliométrico de 1,977 publicaciones de investigación relacionadas con el tema, donde abordan aportaciones tales como estudios que indica el desarrollo de tecnologías de RA aplicadas a la educación superior, centrándose en aspectos técnicos e ingenieriles para mejorar la interacción y la experiencia de aprendizaje. Esta tecnología directamente contribuye a las metas de los ODS numero 4.7,13.3. donde es útil esta tecnología en el momento de enriquecer el aprendizaje técnico, práctico y ambiental, así como ahorrar recursos físicos en prácticas y laboratorios.

De igual manera esto se relaciona con la inteligencia artificial (IA) tal como lo mencionan Salas et al. (2020) en el artículo “Aplicaciones de la inteligencia artificial en la educación superior latinoamericana: una revisión sistemática”, que presentan un análisis de las diversas innovaciones producto de las tecnologías de inteligencia artificial que se han implementado en los procesos educativos, específicamente en las áreas de aprendizaje y administración. Esto ayuda a poder abordar la deserción estudiantil, la gestión administrativa y la investigación (Salas-Pilco, Yang, 2020). La IA permite optimizar el uso de recursos, así como la mejora de la planificación académica, es por ello que la meta 13.2 se cumpliría ya que esta tecnología reduce la huella de carbono al mejorar la eficiencia energética, de igual manera el 6.4 que indica la optimización del uso de agua en los campus y por último el 8.2 que mejora la productividad institucional a través de automatización.

Jodlbauer et al. (2023) se adentraron en el tema de economía circular, esto facilita el reciclaje la reutilización de materiales y la creación de productos biodegradables, promoviendo un modelo de producción más sostenible.

Autores como Adams et al., 2016; Khurana et al., 2021; Klewitz y Hansen, 2014, argumentan que la innovación orientada a la sostenibilidad es una estrategia que ayuda a promover la competitividad, el bienestar humano y social, así como las buenas prácticas ambientales, ya que estos tres pilares son importantes para mantener un equilibrio. De la

misma forma Salas et al. (2021) indagaron sobre el rol de las instituciones de educación superior en la implementación de la economía circular en América Latina, analizando la importancia de estas como intermediarias entre el gobierno, la industria y la sociedad civil, y con ello los retos y posibilidades a los que se enfrentan en naciones en desarrollo, teniendo en cuenta situaciones locales. La economía circular adopta modelos de gestión de residuos, reutilización de equipos tecnológicos etc., es por ello por lo que las metas 12.5, 13.1 y 8.3 se cubren ya que reducen desechos electrónicos y materiales, promueve resiliencia ambiental y fomenta empleos en mantenimiento y reutilización.

Se conoce que las TIC son una herramienta importante en esta época de la transformación digital y que está relacionada en cualquier departamento de una institución. Así, la gestión administrativa en el ámbito educativo, al integrar la tecnología en los procesos de enseñanza, aprendizaje y al incorporar el lenguaje tecnológico en la planificación de las asignaturas, ha alcanzado logros al desafiar los métodos de enseñanza convencionales. (Maldonado, 2020).

Es así que el autor González et al. (2020) en el artículo denominado “Gestión de las TIC para la Educación Sostenible: Investigación análisis en el contexto de la educación superior” hace énfasis en cómo las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) contribuyen a una educación enfocada en la sostenibilidad, lo que a su vez beneficia el proceso de toma de decisiones en las instituciones de educación superior y en las políticas educativas. De igual manera en el artículo “Soluciones sostenibles: el impacto de las tecnologías verdes en las operaciones universitarias” donde las tecnologías sostenibles en universidades su propósito es reducir el impacto ambiental de sus operaciones mediante estrategias innovadoras, dentro de esto contiene varios factores tales como la eficiencia energética, gestión de residuos, edificaciones sostenibles y el uso de energías renovables. Aghamolaei y Fallahpour (2023), indican que estas estrategias buscan disminuir la huella de carbono en las universidades.

La gestión de las TIC aumenta el acceso a la educación y reduce la huella ecológica de los procesos administrativos (papel, energía, transporte) esta tecnología contribuye a las metas 4.3 y 4.4 donde se contará con acceso a programas de formación digital. Asimismo, Sirin et al. (2023) se analizan sistemas fotovoltaicos integrados en edificios de instituciones, demostrando su eficiencia en la reducción del consumo energético. Bosch et al. (2023) reportan que los techos verdes en universidades han mejorado la biodiversidad y la calidad del aire en sus entornos.

Anwar et al. (2020) enfatiza la importancia de la gestión de recursos humanos para promover el comportamiento responsable en el área universitaria. Tavants similares (2023) donde enfatizan la importancia de la gestión en la implementación de iniciativas de sostenibilidad en las universidades.

Los sistemas fotovoltaicos implementan energía solar en campus y oficinas reduce costos y emisiones, mientras da ejemplo de compromiso climático institucional, esta tecnología sostenible contribuye a las metas 7.2 enfocado al aumento del uso de energía renovable y la 13.2 donde se contar con acciones climáticas institucionales.

3.1. Conclusiones del estado del arte

El análisis del estado del arte revela un panorama alentador que permite explorar la aplicación de tecnologías con enfoque sostenible en las instituciones de educación superior. La implementación de dichas tecnologías permite reducir el impacto ambiental de las universidades mediante el uso de energías renovables, prácticas eficientes y una disminución de la huella de carbono, contribuyendo de manera directa a los esfuerzos globales contra el cambio climático.

3.2. Contribución acerca del fomento de la participación estudiantil en proyectos sostenibles

Las IES en México desempeñan un papel importante en la promoción de la sostenibilidad al fomentar la participación estudiantil en proyectos que abordan los desafíos ambientales, sociales y económicos. A través de programas de voluntariados, asociaciones estudiantiles y grupos de acción, los estudiantes desarrollan habilidades de liderazgo y conciencia ecológica.

Por una parte, tenemos a la UNAM, el ITESO y la Universidad de Guadalajara que han implementado programas de formación en sostenibilidad para sus alumnos (Prado Fuentes et al 2011). Por otro lado, el Tecnológico de Monterrey y la Universidad Autónoma de Nuevo León han impulsado proyectos de emprendimiento verde en áreas como la biotecnología y el aprovechamiento de recursos naturales (Participación estudiantil. 2023). Así mismo, la Universidad de Quintana Roo y la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla han desarrollado estrategias de campus sostenible con la participación de los estudiantes (González Ciriaco, 2024).
La presión y organización estudiantil han llevado a la implementación de políticas institucionales de sostenibilidad, como la reducción del uso de plásticos y la eficiencia energética en edificios universitarios. La Universidad Veracruzana y la Universidad Autónoma Metropolitana han incorporado normativas ambientales dentro de sus planes estratégicos, impulsadas por iniciativas estudiantiles (Temis, J. R. H. 2019).

La colaboración entre estudiantes, docentes, autoridades universitarias y sociedad permite generar soluciones innovadoras y fortalecer la conciencia ecológica en las nuevas generaciones, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Es por ello por lo que el fomento de la participación estudiantil en proyectos sostenibles en universidades de México es una estrategia clave para formar ciudadanos responsables y comprometidos con el desarrollo sostenible.

4. CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS

La implementación de tecnologías sostenibles no solo contribuye a la conservación del entorno, sino que también mejora la eficiencia de la gestión universitaria y enriquece el proceso de enseñanza-aprendizaje. De esta forma, las instituciones de educación superior se consolidan como agentes clave para la transición hacia un modelo de desarrollo más responsable y resiliente.

Al respecto, se llevó a cabo la recopilación de información con el objetivo de identificar la implementación de tecnologías sostenibles en las instituciones de nivel superior y de igual manera identificar las tecnologías por categorías tal y como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de tecnologías sostenibles

Categorías	Tecnología	Autor y año	Articulo
Administración digital y reducción del papel	Blockchain	Hernández Et al. (2020)	Aplicación de la tecnología Blockchain en la educación superior
	Realidad aumentada	Abad Et al. (2020)	Sostenibilidad de las tecnologías educativas: una aproximación a la investigación en realidad aumentada
	Realidad virtual	Pozzo Et al. (2024)	Perspectivas y aplicaciones de la realidad virtual en la educación superior: un análisis de las publicaciones de América Latina",
Educación y sensibilización ambiental	Economia circular	Salas Et al. (2021)	El rol de las instituciones de educación superior en la implementación de la economía circular en América Latina
Tecnologías digitales para la sostenibilidad	Gestión de las Tic	Chen Et al. (2020)	Gestión de las TIC para la Educación Sostenible: Investigación análisis en el contexto de la educación superior

Elaboración propia

La digitalización de procesos se ha realizado mediante la automatización de procedimientos académicos, lo que disminuye la demanda de recursos tangibles y mejora la habilidad para monitorear los datos. Por otro lado, estas acciones se ven reflejadas en un rendimiento de la inversión a mediano y largo plazo, ya que se evita la reposición constante de materiales y con ello se disminuyen los costos vinculados a la construcción.

En el contexto social, la implementación de tecnologías ayuda a fomentar una mayor igualdad en la educación. Herramientas como la realidad virtual, la realidad aumentada o los ambientes educativos virtuales promueven la instrucción a distancia y posibilitan la inclusión de alumnos que habitan en áreas distantes y se localizan en zonas urbanas. Así, las instituciones de educación superior divulgan su alcance y promueven la diversidad en su entorno académico.

La ausencia de tecnologías sustentables en el ámbito educativo es ejemplo de este problema, cuya solución se basa en varios elementos, tales como la infraestructura, las políticas institucionales y el respaldo económico del gobierno.

En el contexto socio académico, el análisis de datos a través del uso de algoritmos de inteligencia artificial y herramientas de Business Intelligence, posibilita la recopilación y análisis de información sobre el rendimiento y comportamiento académico, lo que facilita la personalización de la enseñanza, la detección temprana de dificultades y la optimización de las estrategias pedagógicas.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Con el paso del tiempo, el impacto del uso inadecuado o limitado de tecnologías en las instituciones ha generado dificultades significativas, especialmente cuando las acciones emprendidas no contribuyen de manera equilibrada a los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad: el económico, el social y el ambiental.

Estos componentes son esenciales para perfeccionar tanto los procedimientos administrativos como operativos en las instituciones, son esenciales para promover un desarrollo institucional integral. Por ello, resulta necesario realizar una adecuada difusión de las tecnologías involucradas en los procesos administrativos y operativos que actualmente están implementando algunas instituciones de educación superior. Así mismo, también resulta importante profundizar sobre las tecnologías que se están empleando en las empresas, industria y demás organizaciones, identificando sus beneficios a partir de una correcta y adecuada clasificación.

REFERENCIAS

Abad-Segura, E., González-Zamar, M.-D., Luque-de la Rosa, A. L., & Morales Cevallos, M. B. (2020). Sustainability of educational technologies: An approach to augmented rCONeality research. Sustainability, 12(10), 4091. https://doi.org/10.3390/su12104091

Aghamolaei and M. Fallahpour, "Strategies towards reducing carbon emission in university campuses: A comprehensive review of both global and local scales," Journal of Building Engineering, p. 107183, 2023.

C. Şirin, J. Goggins, and M. Hajdukiewicz, "A review on building integrated photovoltaic/thermal systems for green buildings," Applied Thermal Engineering, p. 120607, 2023.

González Ciriaco Díaz, L. A. (2024). Participación estudiantil en la responsabilidad social universitaria: estrategias, factores de éxito y mejores prácticas. Estrategia y Gestión Universitaria. https://doi.org/10.5281/ZENODO.14174001

González-Zamar, M.-D., Abad-Segura, E., López-Meneses, E., & Gómez-Galán, J. (2020). Managing ICT for sustainable education: Research analysis in the context of higher education. Sustainability, 12(19), 8254. https://doi.org/10.3390/su12198254

Hernández, C. (2019). Aplicaciones de la tecnología blockchain en educación superior: Estado del arte 1y2,85.https://www.researchgate.net/publication/361802044

Jodlbauer, H., Brunner, M., Bachmann, N., Tripathi, S., & Thürer, M. (2023). Supply chain management: A structured narrative review of current challenges and recommendations for action. Logistics, 7(4), 70. https://doi.org/10.3390/logistics7040070

Maldonado, M., Galicia, E., & Apolinar, P. (2020). Herramientas digitales de apoyo al proceso de enseñanza-aprendizaje: Repositorio de objetos de aprendizaje. México. https://doi.org/10.47422/ac.v5i4.179

M. Bosch, A. M. Lacasta, F. E. Berigüete, A. Alva, and I. R. Cantalapiedra, "Green Roofs and Other Nature-Based Solutions in Barcelona: Environmental Benefits, and Physical and Mental Well Being," Building Engineering Facing the Challenges of the 21st Century: Holistic Study from the Perspectives of Materials, Construction, Energy and Sustainability, pp. 511-532, 2023.

National Geographic España. (2024). National Geographic. https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/05/economia-circular-que-es-y-por-que-beneficia-al-medio-ambiente

Organización de las Naciones Unidas. (2015). La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Desarrollo Sostenible. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/

Participación estudiantil. (2023, febrero 8). Secretaría de Sustentabilidad; Universidad Autónoma de Nuevo León. https://sds.uanl.mx/participacion-estudiantil.com

Pozzo, D. N., Roa, I. G., Alfonso, C., Yadira, B., Patricia, C., & Guerrero, V. C. (2024). Perspectives and applications of virtual reality in higher education: An analysis of Latin America's publications. Procedia Computer Science, 238, 962–967. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.120

Prado Fuentes, Sandra Elizabeth, & Pérez Campuzano, Enrique. (2011). Participación estudiantil en programas ambientales en instituciones de educación superior. Perfiles educativos, 33(134), 77-98. Recuperado en marzo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-26982011000400006&lng=es&tlng=es

Rouse, M. (2024). Tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Techopedia Español. https://www.techopedia.com/es/definicion/tic

Salas, D. A., Criollo, P., & Ramirez, A. D. (2021). The role of higher education institutions in the implementation of circular economy in Latin America. Sustainability, 13(17), 9805. https://doi.org/10.3390/su13179805

Salas-Pilco, S. Z., & Yang, Y. (2022). Artificial intelligence applications in Latin American higher education: A systematic review. International Journal of Educational Technology in Higher Education, 19(1). https://doi.org/10.1186/s41239-022-00326-w

Temis, J. R. H. (2019). Jóvenes universitarios, capacitados para generar ideas sustentables. Universo - Sistema de noticias de la UV. Recuperado el 6 de marzo de 2025, de https://www.uv.mx/prensa/general/jovenes-universitarios-capacitados-para-generar-ideas-sustentables.com

Mechatronic design of a semi-automatic liquid mixing machine.

Raúl Jiménez-Ramírez * **Gloria Inés Estrada-Matus** *
Jorge Méndez-Valencia * **Mariana Castillejos-Raymundo** *
Kevin de Jesús Hernández-Montes *
Carlos García-Rodríguez * **Alejandra Velarde-Galván** *

* *Universidad Tecnológica de la Mixteca, Av. Doctor Modesto Seara Vázquez No.1, Acatlima, Heroica Ciudad de Huajuapan de León, Oax. México, 69004. (e-mail: jirr000331, eamg020512, mevj020406, carm020814, hemk000904@gs.utm.mx, sofosmaster, alevelar@mixteco.utm.mx).*

Abstract: This document presents the prototype development of a semi-automatic mixing machine with a capacity of 200 liters, designed for obtimazing the production of liquid cleaning products in micro-enterprises. The project aims to improve the efficiency and precision of the production process. Based on connectivity features for IoT applications, its value for the price, and its relatively low power consumption, the ESP32 microcontroller was proposed as the general control unit. The ESP32 not only facilitate remote monitoring and preccised control of the mixing process but also open new opportunities for small-scale process automation, enabling future adaptations and improvements, offering a scalable and adaptable solution to diverse user needs. The prototype was developed following a mechatronic design methodology, which included requirements analysis, CAD modeling, operational simulation, and selection of key components such as motors, frequency inverters, and control systems. Subsequently, the prototype was constructed by integrating mechanical, electronic, and programming systems. The results obtained from simulations and physical tests confirmed the feasibility and efficiency of the system.

Keywords: Mechatronic design, mixing machine design, automation process based on ESP32 microcontroller, IoT applications.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo surge debido a la necesidad de mejorar el proceso de producción de una micro empresa de fabricación y venta de productos de limpieza oaxaqueña. El proceso de mezclado se realiza de forma manual, lo que origina problemas de homogeneidad, calidad y tiempo de producción. Las máquinas mezcladoras automáticas son una solución efectiva a esta problemática; sin embargo, los modelos disponibles en el mercado que cuentan con la flexibilidad requerida en la preparación de diversos productos de limpieza están orientados a compañías grandes, con costos inadmisibles para las pequeñas empresas. En la literatura se podrán encontrar trabajos de desarrollo de mezcladoras como en Rincón Guerrero (2017), donde se diseña un dispositivo automático para la elaboración de jabones líquidos, suavizantes y desengrasantes industriales para una empresa de químicos. Otro ejemplo es el de Huancas (2020), donde se realizó el diseño de una mezcladora de alimento balanceado de 1 Tn/hora para mejorar la homogeneización en una empresa avícola. En la Universidad Politécnica Salesiana, Peña and Morales (2024), se realizó un prototipo a escala de una máquina mezcladora automatizada para la producción de dulce de membrillo utilizando un sistema PLC. Asimismo, en la Universidad Tecnológica del Perú, Ruiz and Moreno (2024), se realizó el diseño de un prototipo de máquina mezcladora y envasadora de pinturas en el que se tenía un control automático del vaciado para la igualación del color de la pintura. A diferencia de las referencias citadas, en este trabajo se aborda el diseño, simulación y construcción de una mezcladora de líquidos semiautomática desde un enfoque más integral. El diseño concurrente mecatrónico busca ofrecer una solución innovadora, eficiente y adaptada a las necesidades de la empresa. Los procesos manuales tradicionales presentan desafíos en términos de eficiencia y precisión, lo que motiva al diseño, construcción y programación de un equipo capaz de adaptarse a las necesidades del sector. El presente documento está organizado de la siguiente forma: en la Sección 2 se plantea el problema y se describe la metodología de diseño mecatrónico a utilizar; en la Sección 3 se hace mención de las restricciones de funcionamiento y a los requerimientos del cliente para el diseño de la máquina; en la Sección 4 se presenta el diseño preliminar, cálculos de diseño mecánico y electrónico, análisis de esfuerzos mediante el método de Elemento Finito y obtención de frecuencias naturales del sistema; en la Sección 5 se realiza la planificación de la manufactura; en la Sección 6 se muestra el procedimiento de construcción e integración de las áreas de mecánica, electrónica y control; finalmente, en la Sección 7 se analizan los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones finales del trabajo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA

La problemática general es desarrollar un prototipo de máquina mezcladora semiautomática para productos de limpieza líquidos a través de una metodología mecatrónica. Para el desarrollo de esta máquina se siguió la metodología de diseño mecatrónico mostrada en la Figura 1 propuesta por Lugo-González et al. (2020).

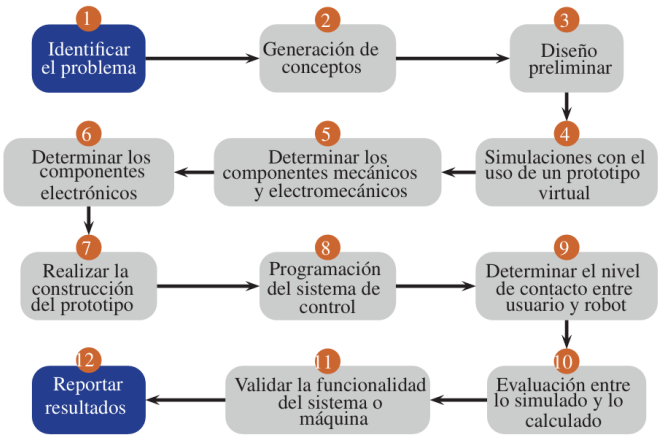


Fig. 1. Metodología de diseño mecatrónico.

El proceso inicia con la identificación del problema, analizando las limitaciones del proceso existente y definiendo los objetivos del proyecto. A continuación, se generan propuestas mediante la elaboración de bocetos y se selecciona la que cumpla con los requerimientos del usuario. Posteriormente, se lleva a cabo un modelado matemático del sistema para predecir su comportamiento, seguido del diseño del prototipo en software CAD, el cual es validado mediante análisis de esfuerzos. Una vez obtenido el diseño preliminar, se procede a la selección de actuadores, sensores y demás componentes necesarios para garantizar la precisión y el control requeridos por el sistema. Se realiza la construcción del prototipo físico, considerando los materiales y planos técnicos de la máquina, así como un plan de manufactura. Se continúa con la implementación de los sistemas de control para verificar el adecuado funcionamiento del prototipo, se evalúa y valida la funcionalidad del equipo. Este enfoque metodológico asegura un desarrollo estructurado y eficiente del prototipo.

3. RESTRICCIONES Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

Las restricciones y requerimientos que guiaron el diseño y construcción de esta máquina se obtuvieron de la investigación realizada a partir del estado del arte, así como de los requerimientos del cliente. Entre las restricciones establecidas, se destacó la imposibilidad de mezclar productos sólidos, limitando su uso a sustancias líquidas. Además, se definió un tiempo máximo de trabajo de 6 horas diarias, una capacidad de mezclado que oscilara entre 10 y 200 litros, y se requirió que el diseño de las entradas y salidas se adecuara a la disponibilidad de puertos del microcontrolador seleccionado. Asimismo, se definieron dos modos de operación: semiautomático y manual. En el modo de operación manual se definió un gabinete de control en el que el usuario pueda tener acceso a las operaciones de funcionamiento de la máquina. El material del agitador debería ser resistente a la corrosión, y se sugirió la implementación de una interfaz en pantalla móvil para mejorar la interacción con el usuario. Otros requerimientos fueron, la capacidad de la plataforma del motor para subir y bajar, así como la conexión a una red eléctrica monofásica para el funcionamiento de la máquina. Finalmente, se consideró deseable que la máquina contara con un sistema de sujeción para el contenedor principal, garantizando estabilidad durante el proceso.

4. DISEÑO PRELIMINAR Y EN DETALLE

4.1 Generación de conceptos y prototipo virtual

Para la realización del prototipo virtual se consideraron los requerimientos del proyecto, los resultados obtenidos por los cálculos y simulaciones. En la Figura 2 se observan los componentes principales en el diseño del mezclador. El software empleado para el diseño fue SolidWorks™v2022 en un procesador AMD Ryzen 5 5600X.

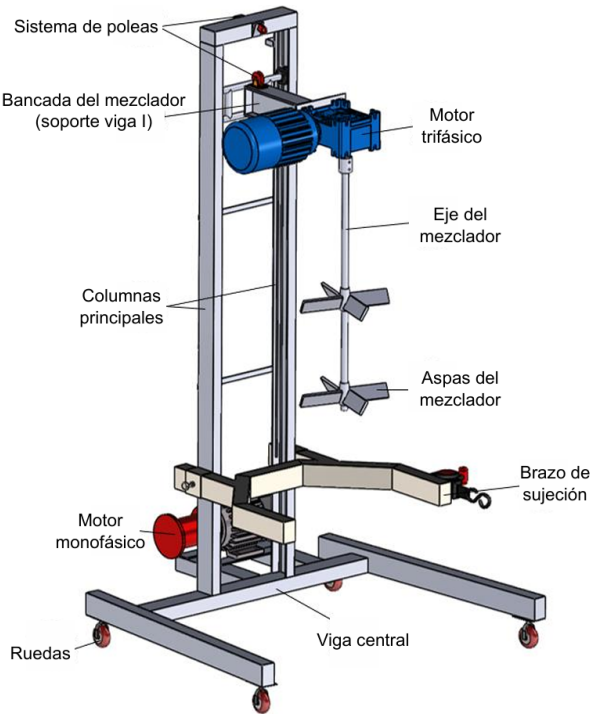


Fig. 2. Componentes principales del mezclador.

4.2 Cálculos el área mecánica

Los resultados obtenidos en el diseño y evaluación del sistema de agitación demuestran que todos los componentes cumplen con los requisitos de resistencia, rigidez y funcionalidad.

- **Dimensionamiento de las Palas de Agitación** Las dimensiones de las palas de agitación se calcularon en función del diámetro del tanque y las especificaciones del usuario. Los resultados indican que las palas tienen un tamaño adecuado para garantizar un mezclado homogéneo en el contenedor de 200 litros.

- **Potencia y Torque del Eje de Agitación** Para obtener la Potencia y Torque necesario para el eje mezclador, se consideraron aspectos físicos del fluido (viscosidad dinámica, densidad), parámetros de funcionamiento (velocidad angular del eje) y parámetros físicos (dimensiones del eje, número de potencia). A partir de los datos anteriores, se obtuvo la potencia requerida para el eje de agitación de **0.52488 W**, y el torque calculado fue de **5.0122 N·m**. Estos valores son bajos, lo que indica que el sistema no requiere gran cantidad de energía para operar.
- **Diámetro del Eje de Agitación** En la obtención del diámetro del eje, se consideró el esfuerzo permisible del material, factor de seguridad y el momento al que estaría sometido. Se obtuvo un diámetro del eje de **9.058 mm**, utilizando acero inoxidable 304. Este diámetro es suficiente para soportar el torque aplicado, lo que garantiza que el eje no fallará bajo las condiciones de operación.
- **Evaluación del Soporte de la Viga I** La viga IPR de acero A-36 que soporta el motor y el eje de agitación mostró un esfuerzo máximo de **3.9785 MPa**, muy por debajo del esfuerzo permisible de **250 MPa**. El factor de seguridad de **62.83** indica que la viga es altamente resistente.
- **Evaluación de las Aspas del Mezclador** Las aspas de acero inoxidable mostraron un esfuerzo máximo de **7.2615 MPa**, con un factor de seguridad de **33.188**, además, un desplazamiento máximo de **0.085604 mm**.
- **Evaluación del Eje del Mezclador** El eje de acero inoxidable mostró un esfuerzo máximo de **8.9291 MPa**, con un factor de seguridad de **26.99**. El desplazamiento máximo del eje fue de **0.26891 mm**, lo cual es aceptable para las condiciones de operación.
- **Evaluación de la Columna Principal** La columna de perfil C de acero A-36 mostró un esfuerzo máximo de **3.279 MPa**, muy por debajo del esfuerzo permisible de **82 MPa**. Esto indica que la columna es adecuada para soportar las cargas aplicadas.
- **Evaluación de la Viga Central** La viga de perfil rectangular de acero A-36 mostró un esfuerzo máximo a flexión de **10.24 MPa** y un esfuerzo cortante máximo de **1.60 MPa**, ambos por debajo de los esfuerzos permisibles. La deflexión máxima de **0.2243 mm** es mínima.

Los factores de seguridad elevados en el diseño se deben a que se optó por materiales comercialmente disponibles, aun cuando implicara un sobredimensionamiento respecto a los esfuerzos calculados. Además, se tomó como referencia el diseño de máquinas similares, en las cuales se utilizaron componentes de características similares que, al ser evaluados en esta máquina, resultaron estructuralmente más robustos de lo necesario. Dado que la mezcladora es móvil y puede estar sujeta a condiciones variables de uso, se priorizó la confiabilidad estructural y la durabilidad a largo plazo.

En la Tabla 1, se sintetizan los esfuerzos y deformaciones en los elementos de máquina principales.

Tabla 1. Resumen de datos, cálculos del eje mezclador y componentes asociados

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia del eje mezclador			
Número de potencia	Np	1.1	-
Número de Froude Mott (2006)	NFr	0.02066	-
Velocidad del agitador	n	1	rev/s
Diámetro del agitador	Da	0.2027	m
Densidad del producto	ρ	1100	kg/m^3
Viscosidad dinámica McCabe et al. (1991)	μ	0.0162	kg/(m·s)
Relación del número de potencia	m	-0.061139	-
Potencia del eje	P	0.52488	W
Torque del eje mezclador			
Torque del eje	T	5.0122	N·m
Velocidad angular	w	0.104719	rad/s
Diámetro del eje mezclador			
Esfuerzo permisible a torsión	τ_{Per}	68.685	MPa
Radio del eje	R	0.004529	m
Diámetro del eje	D	9.058	mm
Selección del motorreductor			
Velocidad de agitación	-	60	RPM
Torque requerido	T	5.0122	N·m
Evaluación del soporte viga I			
Esfuerzo permisible viga IPR	σ_{perm}	250	MPa
Esfuerzo máximo viga IPR	σ_{VM}	3.9785	MPa
Factor de seguridad viga IPR	$F.S.$	62.83	-
Desplazamiento máximo viga IPR	δ	0.011668	mm
Evaluación de las aspas del mezclador			
Esfuerzo máximo aspas	σ_{VM}	7.2615	MPa
Factor de seguridad aspas	$F.S.$	33.188	-
Desplazamiento máximo aspas	δ	0.085604	mm
Evaluación del eje del mezclador			
Esfuerzo máximo del eje	σ_{VM}	8.9291	MPa
Factor de seguridad del eje	$F.S.$	26.99	-
Desplazamiento máximo del ejeMSG-Incorporated (2023)	δ	0.26891	mm
Columna principal			
Fuerza aplicada	P	490.5	N
Momento máximo	M	246.0583	N·m
Esfuerzo máximo	$\sigma_{\max}$	3.279	MPa
Esfuerzo admisible	σ_{adm}	82	MPa
Viga central			
Fuerza aplicada	P	490.5	N
Momento máximo	M	156.96	N·m
Deflexión máxima MSG-Incorporated (2023)	$\delta_{\max}$	0.2243	mm
Esfuerzo a flexión máximo TRAMEC (2022)	$\sigma_{\text{flexión}}$	10.24	MPa
Esfuerzo cortante máximo	$\tau_{\text{máx}}$	1.60	MPa

4.3 Simulaciones de movimiento

Se simuló el movimiento del eje mezclador con un motor que opera a 70 RPM. Durante la simulación, se observó el comportamiento del eje y las aspas, obteniendo las siguientes gráficas:

- **Desplazamiento angular**: La gráfica de desplazamiento de la Figura 3 muestra que el eje mantiene un desplazamiento angular constante durante toda la simulación.
- **Velocidad de giro**: La gráfica de velocidad (Figura 3) confirma que el eje gira a una velocidad constante de 70 RPM, lo que indica un funcionamiento estable.

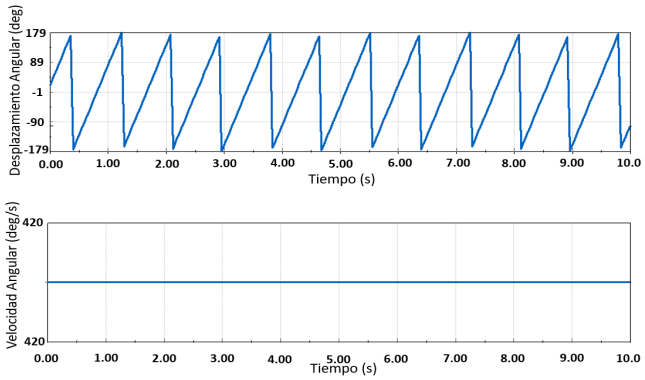


Fig. 3. Análisis de la simulación de movimiento del eje mezclador.

4.4 Análisis de elemento finito

La Figura 4 muestra el análisis por elemento finito que corrobora el valor del esfuerzo máximo del soporte de la viga I.

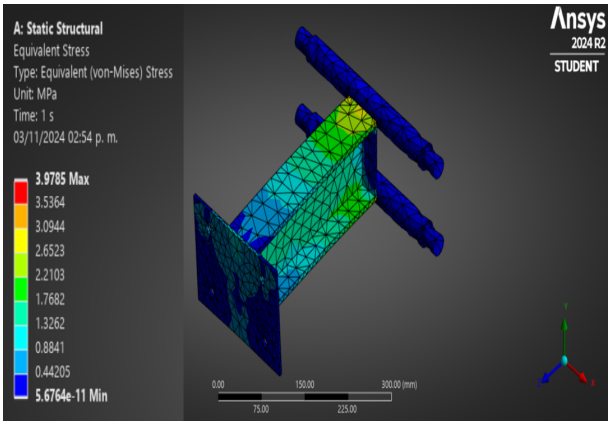


Fig. 4. Análisis de elemento finito de la viga I.

4.5 Análisis de frecuencias naturales del eje mezclador

Para el análisis de frecuencias, se realizó un mallado del modelo completo del mezclador y se restringieron los grados de libertad del sistema. El cople superior de la flecha se fijó como soporte fijo, mientras que el movimiento del eje se limitó a la rotación alrededor del eje Z como se representa en la Figura 5.

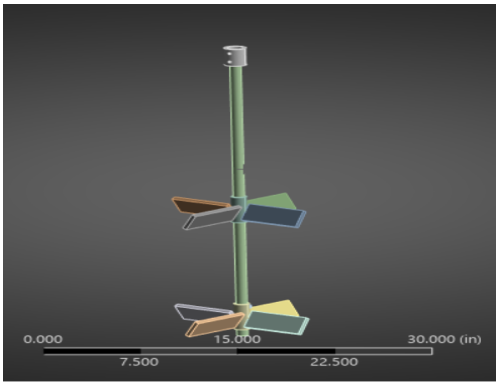


Fig. 5. Frecuencias naturales de vibración del modelo del mezclador.

La frecuencia natural obtenida mediante la simulación es:

$$f_n = 97.321\,\text{Hz}$$

Convertida a velocidad angular:

$$w_n = 611.485\,\text{rad/s} = 5839.2\,\text{RPM}$$

La velocidad máxima de giro del eje mezclador es de 70 RPM, el sistema no alcanzará la primera frecuencia natural ni entrará en resonancia. Esto garantiza que el mezclador operará de manera segura.

La simulación de las Figuras 4 y 5 se realizó empleando el software de Ansys Workbench™v 2024 R2 en un procesador AMD Ryzen 5 5600X.

4.6 Selección de Actuadores y Sensores: diseño electrónico.

Los aspectos clave del diseño electrónico y las simulaciones realizadas para el sistema de control de motores y automatización de una máquina mezcladora semiautomática se describen a continuación.

- **Motor Trifásico con Variador**: Selección del variador en función de los parámetros del motor.
- **Motor Monofásico**: Se diseñó un circuito para cambiar el giro del motor. El circuito incluye la alimentación, bobinas de trabajo y arranque, un condensador y un interruptor de tres posiciones.
- **Circuito de Control con Marcha y Paro**: Incluye pulsadores de marcha y paro, con prioridad para el paro de emergencia. Un interruptor termomagnético y guardamotores protegen el circuito contra cortocircuitos y sobrecargas.
- **Conexiones con la Tarjeta ESP 32**: Diseño para activar los motores y electroválvulas mediante relevadores controlados por la tarjeta ESP32.

4.7 Simulaciones del comportamiento eléctrico

- **Simulación del variador de frecuencia**: Usando el software J1000 Programming Simulator en la versión 1.9.0.0, se configuró y verificó el variador para el motor trifásico.
- **Simulación de arranque directo del motor trifásico**: Usando CADe_SIMU Versión 4.0, se simuló el arranque y paro del motor trifásico.
- **Simulación del motor monofásico**: Se simuló el cambio de giro del motor monofásico para subir y bajar la plataforma.

Las simulaciones del comportamiento eléctrico se realizaron en un equipo con un procesador AMD Ryzen 7 6800H.

4.8 Simulaciones del comportamiento del microcontrolador

Para la simulación de las entradas y salidas del ESP32, se empleó el servidor web de Wokwi, la simulación llevada a cabo permitió verificar el comportamiento del sistema de manera exhaustiva, lo que resultó crucial para identificar posibles errores o inconsistencias en el código antes de su implementación en el hardware físico.

5. PLANIFICACIÓN DE LA MANUFACTURA

Para la construcción del prototipo se propuso el plan de manufactura que se muestra en la Figura 6. Posteriormente, se comenzó con la construcción de la máquina y las pruebas de funcionamiento.



Fig. 6. Diagrama de planificación de manufactura.

6. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

En la Figura 7, se muestra la estructura principal de la máquina, la cual incorpora el brazo soporte para un bote de 200 L, el ensamble del motor trifásico y el sistema de elevación de la bancada que incluye la bancada, el sistema de poleas y el motor monofásico.

6.1 Conexión del sistema de control

En la Figura 8 se muestra el gabinete con los pulsadores, interruptores y un botón de paro de emergencia. Los dispositivos de protección (guardamotores, interruptores termomagnéticos y contactores) se montaron en rieles DIN a dos niveles. La ESP32 se conectó a las entradas digitales y a la alimentación de los relevadores, mientras que los pulsadores, interruptores y el selector gestionan la alimentación y los modos de operación. El motor trifásico fue controlado mediante un variador de frecuencia, operado directamente por la ESP32.

6.2 Programación y diseño de interfaz

La programación del ESP32 se hizo usando Arduino IDE en una laptop HP con procesador Core i3. Se emplearon

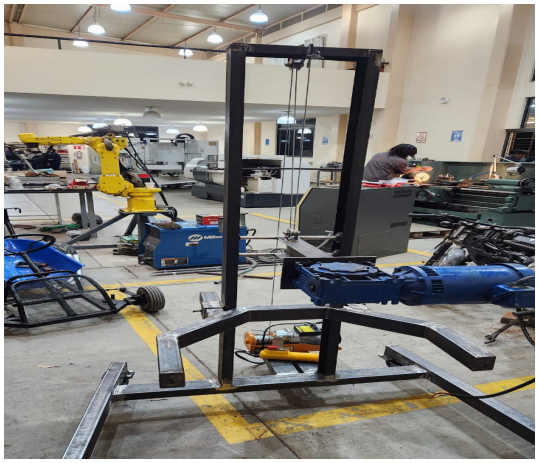


Fig. 7. Pruebas de funcionamiento de la bancada con peso.

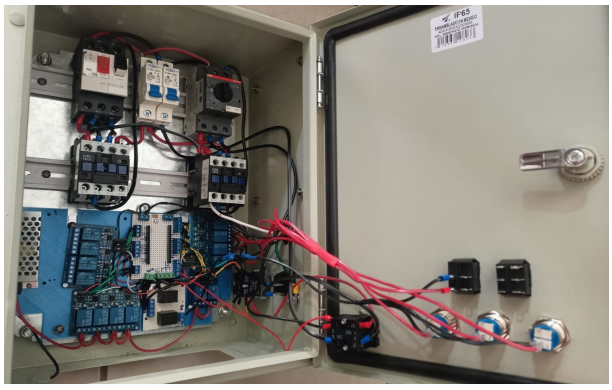


Fig. 8. Gabinete de control de la máquina.

librerías que permitieron conectar el ESP32 por Wi-Fi a un dispositivo móvil, crear un servidor web y usar temporizadores no bloqueantes para ejecutar tareas sin detener el programa. Esto permitió controlar la máquina en el modo de operación automático. La interfaz hecha en HTML se conecta al ESP32 desde un celular utilizando una dirección IP y una clave. A través de la interfaz se puede definir la mezcla a realizar, controlar los motores, monitorear en tiempo real y de forma visual el estado del proceso y de la máquina, permitiendo un control preciso y seguro del sistema, como se muestra en la Figura 9.

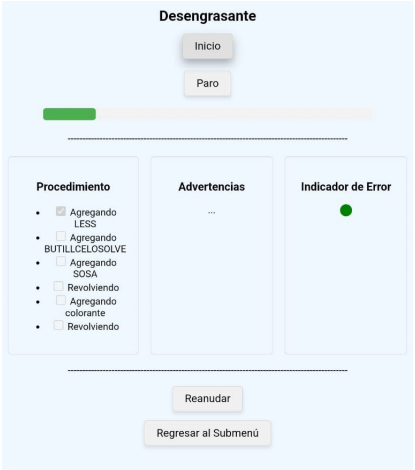


Fig. 9. Interfaz de proceso: Desengrasante.

6.3 Prototipo final

El resultado obtenido se muestra en la Figura 10, en la que se observa la implementación de los sistemas mecánicos, electrónicos y de programación.



Fig. 10. Prototipo final.

6.4 Pruebas Físicas

Con el propósito de verificar el funcionamiento básico del sistema, se realizaron pruebas físicas del prototipo en condiciones controladas. En la Figura 11 se muestran los ensayos realizados. Se evaluó el mecanismo de elevación



Fig. 11. Pruebas realizadas al prototipo físico.

de la bancada en los modos de operación manual y automático. Junto con el usuario se realizaron pruebas de mezclado de diferentes productos, con el fin de validar el giro estable del eje y la distribución homogénea en el contenedor. Por último, se enviaron rutinas desde la interfaz gráfica desarrollada en HTML, conectada vía Wi-Fi al ESP32.

7. CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo de máquina mezcladora semiautomática para productos de limpieza líquidos cumplió con los objetivos establecidos, ofreciendo una solución eficiente a las necesidades de una microempresa. Mediante una metodología de diseño mecatrónico se optimizó el proceso de mezclado, reduciendo tiempos y mejorando la precisión. Los cálculos y simulaciones realizados en las áreas de mecánica y electrónica confirmaron que los componentes seleccionados, como el motor trifásico, el variador de frecuencia y la tarjeta ESP32, operan de manera segura y eficiente. El análisis de frecuencias naturales del eje mezclador garantizó que el sistema no entrará en resonancia, asegurando estabilidad durante la operación. Además, las pruebas físicas del prototipo validaron su funcionalidad, demostrando que es capaz de manejar volúmenes de hasta 200 litros con un control manual y automático. Este trabajo representa una solución viable para mejorar los procesos de producción en las microempresas; además, establece una base para futuras mejoras, consolidándose como una herramienta clave en la automatización de procesos industriales a pequeña escala.

REFERENCIAS

Huancas, P.S. (2020). Diseño de una mezcladora de alimento balanceado de 1 tn/hora para mejorar la homogenización en la empresa avícola casas s.a.c. – 2020. Disponible en `https://hdl.handle.net/20.500.12692/58209`.

Lugo-González, E., Velarde-Galván, A., and Arias-Montiel, M. (2020). *Diseño mecatrónico implementado en el desarrollo de prototipos virtuales y físicos*, 22–39. ECORFAN. doi:10.35429/h.2020.5.22.39.

McCabe, W.L., Smith, J.C., and Harriott, P. (1991). *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*. McGraw-Hil, España.

Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. Pearson, México.

MSG-Incorporated (2023). Biblioteca de catálogos de coples. `https://es.martinsprocket.com` [Accedido: (11 de marzo de 2025)].

Peña, J. and Morales, A. (2024). Prototipo a escala de una máquina mezcladora automatizada para la producción de dulce de membrillo utilizando un sistema plc. Disponible en `http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28056`.

Rincón Guerrero, J.E. (2017). Diseño de una máquina mezcladora, automática, de materias primas para la elaboración de jabones líquidos, suavizantes y desengrasantes industriales, para la empresa químicos zorel. Disponible en `http://hdl.handle.net/20.500.11839/6501`.

Ruiz, F. and Moreno, C. (2024). Diseño e implementación de un prototipo de máquina mezcladora, envasadora de pinturas con control automático para que elabore un color con la tonalidad deseada en vehículos menores en planta de ensamblaje. Disponible en `https://hdl.handle.net/20.500.12867/8428`.

TRAMEC (2022). Catálogos y manuales de motoreductores. `https://tramec.mx/descargas/` [Accedido: (11 de marzo de 2025)].

Implementation of Aerospace Standard 9145 in New Product Development

Acuña Ruiz, Enrique S.*, Velázquez Victorica Karla I.*, López Guerrero Aída *, Olivares Fong Luz*, Montoya Alcaraz Marco A.*

**Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez S/N CP 21280, Mexicali, Baja California, México.*
(email:enrique.acuna, isabel.velazquez, aida.lopez, luz.olivares, marco.montoya@uabc.edu.mx)

Abstract: In the increasingly competitive aerospace industry, it is crucial for organizations to incorporate the latest industry standards and requirements into their quality management systems to remain competitive within the aerospace supply chain and market. Therefore, this article aims to analyze the Advanced Product Quality Planning (APQP) methodology, which has been integrated into the aerospace standard 9145 (AS9145 - Requirements for Advanced Product Quality Planning and Production Part Approval Process), within the product development process (PDP) of the aerospace industry. The research methodology is based on an analysis of the significance and applicability of the APQP methodology, followed by a description of the requirements for its implementation in aviation, space, and defense organizations. In addition, this article delineates the impacts and benefits that this methodology can have on the development of new products within the aerospace industry; finally, it concludes with key points that organizations in the sector should consider when implementing the APQP methodology, drawing on the experience gained from an applied case study in this industry.

Keywords: aerospace industry, APQP, AS9145, new product development, quality.

1. INTRODUCCIÓN

La industria aeroespacial siempre ha tenido el desafío de mejorar su cadena de suministro y sus costos. Desde el inicio de esta industria en el sector comercial, esta se ha apoyado en la estandarización, mejora continua y control estadístico, lo que le ha permitido, junto a una exigencia de seguridad rigurosa, a establecer controles de calidad superiores a otras industrias, además de mejorar sus procesos de planeación, diseño y manufactura en sus componentes y ensambles. Para integrar y estandarizar estas herramientas, las organizaciones aeroespaciales bajo el Grupo Internacional de Calidad Aeroespacial (International Aerospace Quality Group, por sus siglas en ingles IAQG) se han focalizado en el éxito de otras industrias, como la automotriz, en el desarrollo e implementación la metodología APQP; por lo que han elaborado el estándar aeroespacial 9145 (AS9145) para adaptar esta metodología a su industria con el propósito de transformar la manera en que sus productos se desarrollan, validan y lanzan al mercado (International Aerospace Quality Group [IAQG], 2025).

En relación con el proceso de desarrollo de productos, este ha sido un tema de gran importancia tanto en la economía global como en la industria manufacturera ya que, de acuerdo con Jing et al., (2017), representa la vía principal de innovación tecnológica para las organizaciones manufactureras. Esto puede trasladarse perfectamente a la industria aeroespacial, puesto que esta tiene como objetivo diseñar y fabricar aeronaves que reduzcan los gastos operativos y de mantenimiento, disminuir sus emisiones, reducir el peso (de las aeronaves) y mejorar sus parámetros generales de rendimiento (McAdam, 2008); por lo que estandarizar y controlar el proceso de desarrollo de productos es fundamental para que la innovación en la industria aeroespacial siga siendo relevante y rentable en sus organizaciones.

2. METODOLOGÍA

2.1 Importancia y aplicabilidad del estándar aeroespacial 9145

En el año 2016, la metodología APQP fue adaptada y aplicada en la industria aeroespacial bajo el documento AS9145; esta normativa forma parte de los estándares que están integrados en el estándar aeroespacial 9100 (Sistemas de Calidad - Modelo de Aseguramiento de la Calidad en el Diseño, Desarrollo, Producción, Instalación y Servicio). Titu y Cupsan (2022) mencionan que, ya que la industria aeroespacial cuenta con requisitos y necesidades distintas a las demás industrias, la IAQG ha creado esta versión normalizada de la metodología APQP diseñada para ajustarse a esta. De acuerdo con Merriman (2022) “los mayores fabricantes de equipos originales de aviones comerciales y militares están comenzando a imponer estos requisitos a su cadena de suministro” por lo que la integración de este estándar es un tema de gran interés para las organizaciones que deseen ser considerados en la cadena de suministro de la industria aeroespacial.

En 2013, la IAQG publicó el Manual Aeroespacial APQP/PPAP (Aerospace APQP/PPAP Manual) en el que se establecen las directrices para la aplicación de la metodología APQP. En el año 2017, se lanzó la revisión B de este manual que implicó modificaciones significativas, las cuales incluyen cambio de nombres y fusión de algunos de sus elementos, a su vez de una reorganización de estos y de sus entregables. Lo

anterior, con el objetivo de alinear el manual con el documento AS9145.

Acorde al Manual Aeroespacial APQP/PPAP (2017), el estándar aeroespacial 9145 fue desarrollado por representantes de los tres sectores que integran la asociación IAQG, los cuales se definen como: Grupo de Calidad Aeroespacial de las Américas (Americas Aerospace Quality Group, por sus siglas en inglés, AAQG), Grupo de Calidad Aeroespacial Europeo (European Aerospace Quality Group, por sus siglas en inglés, EAQG) y el Grupo de Calidad Aeroespacial de Asia Pacifico (Asia Pacific Aerospace Quality Group, por sus siglas en inglés, APAQG). Esto con el objetivo de reducir riesgos antes de la liberación y uso de productos o servicios desarrollados de acuerdo con las características únicas de la industria aeroespacial tales como bajo volumen, ciclos de vida largos, así como altos niveles de regulación.

De acuerdo con Titu y Cupsan (2019), los Fabricantes de Equipo Original (Original Equipment Manufacturer, por sus siglas en inglés, OEM) de la industria aeroespacial han reconocido los logros obtenidos mediante la metodología APQP implementada por los fabricantes pioneros de la industria y han solicitado a sus proveedores que adopten dicha metodología. Mediante esta acción, fabricantes como Airbus que utilizan la metodología APQP, han logrado generar una conciencia sólida en torno a la metodología respaldada por la demostración de éxitos, y han asegurado un continuo crecimiento y desarrollo de esta en la industria aeroespacial.

El estándar aeroespacial 9145 es aplicable tanto al desarrollo de productos nuevos como a aquellos productos existentes que requieren cambios que deben ser planeados, esto puede considerarse en el acuerdo contractual entre el cliente y el proveedor donde se establece el alcance de su aplicabilidad (AS9145, 2016). Los requisitos establecidos en el estándar tienen como finalidad estandarizar requerimientos en el desarrollo, fabricación y aprobación de un producto, mejorar la calidad, evitar retrabajos, así como reducir costos y tiempos de entrega. Por consiguiente, la importancia del estándar aeroespacial 9145 radica en alinear los requerimientos en el proceso de desarrollo de productos desde su inicio hasta su finalización; así como las expectativas técnicas y de gestión entre las organizaciones que actúan como proveedores y clientes en la industria aeroespacial.

2.2 Requerimientos de la metodología APQP para su implementación en la industria aeroespacial

Como estipula el documento AS9145 (2016), la correcta implementación de la metodología APQP debe de contar con el respaldo y compromiso de la alta gerencia de la organización desde el inicio del proceso de desarrollo del producto; así como con la conformación de equipos en el proyecto que incluyan a todas las funciones y partes involucradas, además de procurar que se cumpla con el plan de proyecto acordado para llevar a cabo las actividades necesarias. Por consiguiente, esta implementación debe de estar sustentada como menciona el Manual Aeroespacial APQP/PPAP (2017), en tres pilares tal como se muestra en la siguiente figura 1.

Fig. 1 Pilares necesarios para una efectiva implementación de los principios de APQP.



Nota. Adaptado de Manual Aeroespacial APQP/PPAP (2017) (p.5).

Los pilares presentados en la figura anterior tienen como objetivo la satisfacción del cliente, ayudando a crear las condiciones necesarias para la entrega del producto o servicio con la calidad esperada y en el tiempo de entrega acordado. Estos pilares se definen como:

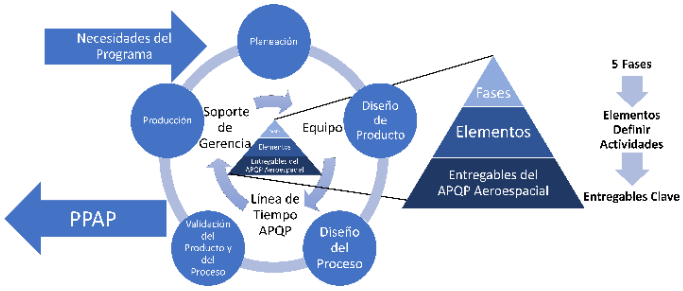
Compromiso organizacional y soporte de gerencia. La aplicación de la metodología APQP es una elección estratégica liderada por gerencia que depende del respaldo de toda la organización. Los datos producidos a lo largo del proceso APQP permite a la administración supervisar y controlar el progreso de las actividades relacionadas con el desarrollo de productos nuevos o que requieran modificaciones. Al identificar los riesgos y dar seguimiento al estado de los elementos y entregables de la metodología, se fomenta la toma de acciones y decisiones necesarias para superar los retos que puedan impedir el cumplimiento de los requerimientos necesarios para garantizar la entrega puntual del producto.

Equipo multifuncional. La utilización de equipos multifuncionales fomenta la unidad en los objetivos en la organización; fortalece el compromiso y la sincronización con el plan del proyecto, y asegura una comunicación eficaz entre las distintas funciones. Estos equipos deben contar con representantes de los departamentos o funciones relevantes y de las partes interesadas correspondientes. Al definir de manera clara las funciones y responsabilidades, se asegura cumplir con las actividades del proyecto puntualmente.

Planeación del proyecto efectiva. El plan o cronograma del proyecto se fundamenta en los requerimientos del cliente y en las fechas de los objetivos establecidos. Toda la información y actividades claves se deben documentar de manera formal en el plan de proyecto. El avance de este debe supervisarse y revisarse de acuerdo con las necesidades del cliente y su proveedor.

De manera conjunta con los pilares de la metodología APQP, el Manual Aeroespacial APQP/PPAP (2017), puntualiza los principios de esta metodología como fases, elementos y entregables; de los cuales se muestra su estructura en la siguiente figura 2.

Figura 2. Principios de la metodología APQP.



Nota. Adaptado del Manual Aeroespacial APQP/PPAP (2017) (p.6).

En la figura anterior se observa como las necesidades del programa (o unidad de negocio) son procesadas a través de estos principios, compuestos por fases, elementos y entregables; dando como resultado de este proceso el documento Proceso de Aprobación de Piezas de Producción (Production Part Approval Process, por sus siglas en inglés, PPAP) en el cual se garantiza que los productos cumplan con los requerimientos y necesidades del cliente. Las definiciones de estos principios, de acuerdo con el Manual Aeroespacial APQP/PPAP (2017) son:

Fases. El enfoque principal de la metodología APQP implica la segmentación en cinco fases clave del desarrollo del producto en las cuales actividades específicas deben de llevarse a cabo; estas fases se definen como: Planeación, Diseño y Desarrollo del Producto, Diseño y Desarrollo del Proceso, Validación del Producto y del Proceso, y Producción en Curso, Uso y Servicio Posterior a la Entrega. Esta división en fases establece roles y responsabilidades diferenciados entre departamentos como Gerencia de Programas, Ingeniería de Diseño e Ingeniería de Manufactura. Es importante mencionar que, en ocasiones, algunas de estas etapas pueden llevarse a cabo de manera simultánea dependiendo de las necesidades del proyecto y de los acuerdos con el cliente. La conclusión de cada fase está establecida por la terminación de hitos o actividades claves que apoyan el cumplimiento del proyecto.

Elementos. Cada fase se descompone en elementos como subetapas, que suelen seguir un flujo lineal de acuerdo con los requerimientos de cada una de las mismas; aunque en ocasiones, es necesario permitir desviaciones en sus interacciones. Los elementos se definen como las actividades que deben ser completadas para el cierre de las fases.

Entregables. Tienen el objetivo de recopilar información generada por los elementos y deben ser documentados, ya que tienen la función de servir como evidencia ante auditorías. Los entregables son evidencia que las actividades y requerimientos necesarios para cumplir con los elementos han sido completados.

De acuerdo con los documentos AS9145 (2016) y al Manual Aeroespacial APQP/PPAP (2017). Las fases del APQP se describen de la siguiente manera:

Fase 1: Planeación. El propósito de esta fase es establecer la estructura del proyecto, sus objetivos (técnicos, de calidad y de costo) así como las actividades necesarias para su éxito. Esto mediante la identificación y documentación de las entradas del proyecto tales como requerimientos del cliente, datos históricos, conocimientos previos, regulaciones aplicables, especificaciones técnicas y experiencia organizacional. Durante esta etapa, se define el concepto del producto y del proceso, además se constituye el equipo multifuncional y se establece el plan del proyecto.

Fase 2: Diseño y desarrollo del producto. En esta fase se convierten los requerimientos técnicos, de calidad y de costos en un diseño de producto controlado, verificado y validado por el cliente y su proveedor. La validación del diseño se alcanza mediante el desarrollo y uso de prototipos, o partes de producción en pruebas que simulan la instalación del cliente y exponen el producto a condiciones extremas que pueden ser requeridas por contrato o regulaciones. Durante esta fase, se identifican los procesos de producción preliminares, proveedores potenciales y se evalúa la factibilidad de que el producto pueda ser fabricado de acuerdo con los requerimientos establecidos en el tiempo y cantidad acordados.

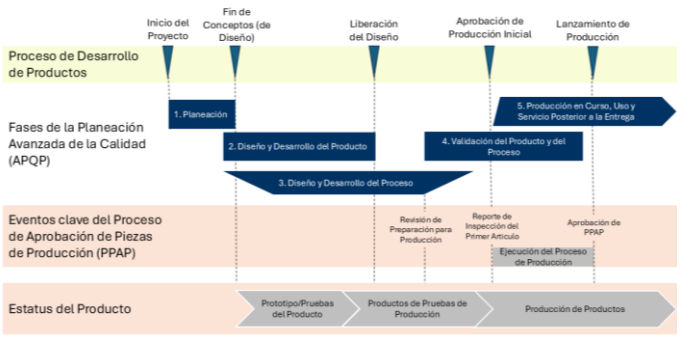
Fase 3: Diseño y desarrollo del proceso. A lo largo de esta fase es necesario planear, diseñar y desarrollar los procesos y métodos de producción necesarios para que la fabricación del producto sea constante y que satisfaga los requerimientos técnicos, de calidad y de costos mientras se cumple el ritmo de demanda requerido por el cliente. En esta etapa se debe asegurar que los proveedores relevantes en la cadena de suministro entiendan los requerimientos del programa.

Fase 4: Validación del producto y del proceso. El objetivo de esta fase es verificar que el producto cumple con los requerimientos de diseño, y que los procesos de producción demuestren su capacidad para fabricar de manera constante el producto de acuerdo con la demanda del cliente. La validación del producto y su proceso se lleva a cabo mediante la aprobación del cliente del elemento clave PPAP.

Fase 5: Producción en curso, uso y servicio posterior a la entrega. En esta fase final, se asegura que los requerimientos del cliente se cumplan a través del tiempo mediante el uso de herramientas como control de procesos, lecciones aprendidas y mejora continua. Del mismo modo, en esta fase se incluyen actividades que deben ser realizadas después del PPAP como reducción de defectos y costos, así como mejoras en el proceso, producto y su tiempo de ciclo.

Referente al proceso de desarrollo de productos, el estándar aeroespacial 9145 (2016) ilustra este proceso de manera general y la integración de la metodología APQP a través de sus fases a este tal como se expone en la siguiente figura 3.

Figura 3. Proceso de desarrollo de productos y APQP.



Nota. Adaptado del documento AS9145 (2016) (p.4).

Se puede observar en la figura anterior que la metodología APQP abarca cada una de las etapas del proceso de desarrollo y lo extiende más allá del lanzamiento de producto con actividades relacionadas a servicios posteriores que incluyen mantenimientos, reparaciones y revisiones del producto en servicio, así como supervisión y evaluación de indicadores claves de calidad.

Con relación a los elementos, estos aseguran el correcto desarrollo del proyecto al supervisar que los entregables claves y sus requerimientos sean proporcionados de acuerdo con las expectativas del cliente y en cumplimiento con los tiempos requeridos por el plan del proyecto. La finalización de los estos debe supervisarse como parte del proceso de gestión del proyecto, puesto que cuando estos se ejecutan de manera oportuna y conforme a los requerimientos de la metodología APQP, se garantiza una entrega del producto con la calidad y en el tiempo esperados por el cliente. La aplicabilidad de estos elementos se establece, según el documento AS9145 (2016): "cuando este estándar (AS9145) se transmite como un requisito contractual general, el alcance de aplicabilidad se establece entre la organización y el cliente". Por lo que la aplicabilidad de cada uno de los elementos de la metodología APQP pueden ser acordadas según sean las necesidades del cliente y de su proveedor.

Los entregables de acuerdo con el Manual Aeroespacial APQP/PPAP (2017), son los resultados específicos definidos para cada elemento y estos representan los resultados reales derivados de las actividades del equipo multifuncional, los cuales sirven como base para evaluar la calidad de los elementos de la metodología APQP. Cada elemento puede necesitar uno o varios entregables para su finalización y es recomendable utilizar formatos estandarizados siempre que sea posible.

La evaluación de los entregables garantiza el termino y cumplimiento de las actividades de los elementos por lo que para cada uno de estos, existen una serie de listas de verificación recomendadas por la IAQG incluidas en los siguientes documentos SCMH (Supply Chain Management Handbook): SCMH 7.2.4 (fase 1), SCMH 7.2.5 (fase 2), SCMH 7.2.6 (fase 3), SCMH 7.2.7 (fase 4) y SCMH 7.2.8 (fase 5) (IAQG, 2021). Estas listas incluyen un conjunto de preguntas simples diseñadas para obtener respuestas afirmativas o negativas y establecer una escala de calificación. Estas listas de verificación se emplean como método de evaluación de la calidad de los entregables y como vía para documentar evidencia de desviaciones y acciones correctivas.

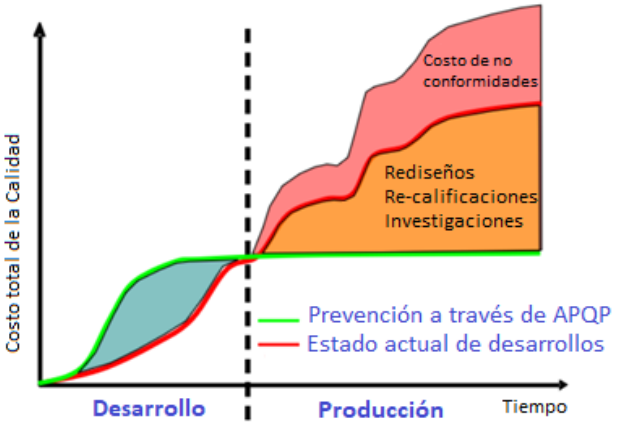
2.3 Impactos y beneficios de la metodología APQP en el desarrollo de productos nuevos

El Manual Aeroespacial APQP/PPAP (2017) menciona que el objetivo general de la metodología APQP es garantizar que los productos nuevos cumplan con las necesidades y expectativas del cliente, por lo que su alcance abarca el cumplimiento tanto de los requerimientos del producto como el plazo y la entrega de este. De igual manera, el documento AS9145 (2016) añade a este objetivo el establecer en la realización de productos, requerimientos comunes aplicables en todos los niveles de la cadena de suministro, esto para reducir las exigencias propias de cada organización y la variabilidad que conlleva la coexistencia de múltiples expectativas dentro de los sectores de aviación, espacio y defensa.

Como sistema, la metodología APQP "se basa en la optimización de la calidad del producto y tiene un enfoque preventivo" (Titu y Pop, 2021), ya que, al seguir el orden de fases y elementos de la metodología, se asegura que el desarrollo del producto este siguiendo un proceso adecuado que reduzca el riesgo de errores y retrasos.

En términos de costos, al tener un enfoque en la calidad desde las etapas iniciales de la planeación del proyecto y del desarrollo del producto, se produce una considerable disminución en el costo derivado de no conformidades una vez que el producto ha sido lanzado y a lo largo de su vida útil. La siguiente gráfica (figura 4) muestra una comparativa entre la aplicación de la metodología APQP (marcada en línea verde) y la omisión de esta (marcada en línea roja) en el desarrollo de productos nuevos; además de mostrar la función entre el costo total de la calidad a través del tiempo.

Figura 4. Gráfica que muestra la comparativa entre el uso de la metodología APQP y su no uso, en función del costo total de la calidad en el tiempo.



Nota. Adaptado de EATON, Advanced Product Quality Planning (APQP) and Production Part Approval Process (PPAP) (2015) (p.13).

En base a la gráfica anterior, se concluye como se mencionó anteriormente, que el objetivo de la metodología APQP en la industria aeroespacial es garantizar la calidad en el desarrollo de productos nuevos, causando una reducción de costos desde su diseño hasta su producción, evitando rediseños, recalificaciones (de materiales o de características de diseño) e investigaciones adicionales; esto para satisfacer las expectativas de rentabilidad del cliente y de su proveedor.

3. RESULTADOS

3.1 Recomendaciones generales en la implementación del estándar aeroespacial 9145 para el desarrollo de productos nuevos

Para una correcta implementación de la metodología APQP y, por lo tanto, una exitosa finalización en el desarrollo de un producto nuevo; se sugiere tomar en cuenta las siguientes recomendaciones para mitigar las limitantes y errores que puedan surgir en los objetivos estratégicos y operativos descritos a continuación.

Análisis del sistema de gestión de calidad de la organización (objetivo estratégico). La organización debe contar un robusto sistema de gestión de calidad que integre la documentación y procedimientos necesarios para la correcta realización de los elementos y entregables. En caso de tener la limitante de no contar con los procedimientos necesarios, se sugiere realizar estos antes del inicio del desarrollo del producto o del proyecto; si esto no es posible, es aceptable realizar esta actividad en paralelo siempre y cuando el cliente este de acuerdo. Por último, es recomendable que la organización cuente con un documento o procedimiento interno que establezca una estrategia para el desarrollo de productos nuevos el cual debe de incluir al menos los pasos sistemáticos, responsabilidades y actividades necesarias para cumplir con los requerimientos técnicos y administrativos durante el desarrollo; este procedimiento debe de estar de acuerdo con los lineamientos y requerimientos el estándar aeroespacial 9145, su manual de referencia y las listas de verificación asociadas a cada elemento.

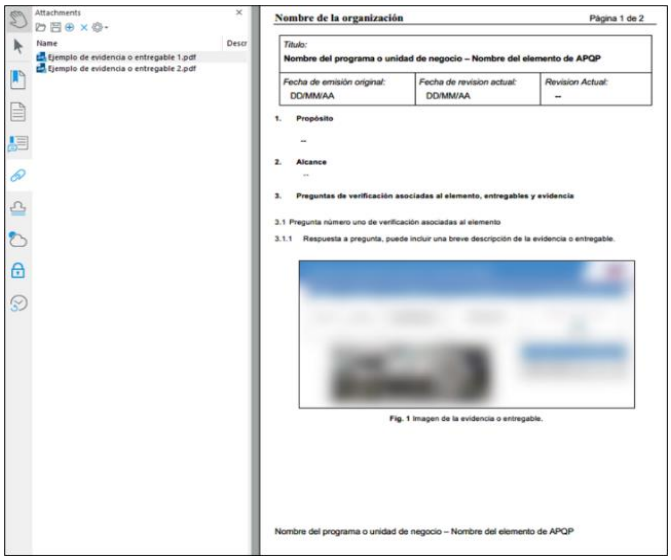
Entrenamiento e integración del equipo multifuncional (objetivo operativo). Al ser un pilar para una efectiva implementación de la metodología APQP, la correcta selección del equipo multifuncional debe de estar en línea con los procedimientos internos de la organización y las recomendaciones de Manual Aeroespacial APQP/PPAP (2017); no obstante, usualmente en los procedimientos se comete el error de establecer solamente a los departamentos responsables y no a las funciones específicas del equipo encargado de cada elemento, entregable y actividad según sea necesario. Para asignar a la persona idónea para cada actividad, es recomendable asegurar que todos los miembros de los departamentos asignados al proyecto estén entrenados en la metodología APQP así como en sus requerimientos y documentos asociados, ya que el no contar con un conocimiento adecuado, puede llevar a omisiones, retrabajos y una baja calidad de los elementos y entregables entregados al cliente, por lo que es importante que el equipo conozca las expectativas y alcance de la metodología para una correcta realización de estos. Además, se debe asegurar que cuenten con los entrenamientos necesarios en los procedimientos internos de la organización asociados a los elementos y entregables de la metodología APQP. Para los elementos o entregables que no estén cubiertos en ese momento por estos procedimientos internos, es posible realizar entrenamientos especiales para el entendimiento de sus requerimientos de acuerdo con el estándar aeroespacial 9145, al Manual Aeroespacial APQP/PPAP, a las listas de verificación de cada elemento y a otros estándares aeroespaciales asociados.

Análisis de requerimientos (objetivo operativo). Es crucial comprender y documentar los requerimientos y expectativas del cliente para establecer y acordar en conjunto la aplicabilidad de los elementos de la metodología APQP en el desarrollo del producto nuevo; esto para evitar errores u omisiones que conlleven a volver a fases anteriores del proyecto; al igual que ayudar a tener una planeación efectiva de los recursos, asegurando el cumplimiento del proyecto dentro de los límites de estos.

Plan o cronograma del proyecto (objetivo operativo). Como se mencionó anteriormente, la planeación efectiva del proyecto es parte de los requerimientos de la implementación de la metodología APQP; sin embargo, es conveniente remarcar la importancia de su correcta realización a través de un plan del proyecto documentado y aprobado por el cliente que integre todas las actividades y sus subtareas asociadas, dependencias, hitos, personas y departamentos responsables, etapas del proyecto, así las como fases, elementos y entregables de la metodología APQP. Estimar erróneamente la duración de las tareas puede generar sobrecarga y conflictos de recursos, retrasos, dificultad para gestionar riesgos, así como pérdida de credibilidad y confianza del cliente. Por lo cual es recomendable tener en cuenta para la asignación del tiempo y recursos de cada tarea; actividades comparables, experiencias y datos técnicos previos de otras unidades de negocio o productos similares para establecer la duración del proyecto lo más realista posible al comienzo de este y así evitar correcciones posteriores al cronograma.

Documentación del cumplimento de elementos, entregables y listas de verificación asociadas (objetivo operativo). Al contar cada elemento con una lista de verificación asociada, puede ser complicado organizar y documentar de manera efectiva cada una de las evidencias necesarias para cumplir con los requerimientos de la metodología. De acuerdo con las lecciones aprendidas en un caso de estudio, se recomienda tener un documento controlado por elemento que albergue cada respuesta, entregable y evidencia asociada a este; tal como se presenta en la siguiente figura 5.

Figura 5. Formato recomendado para la integración y documentación de entregables y evidencias de los elementos APQP.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura anterior, es necesario adjuntar al documento los entregables o evidencias asociadas a las repuestas de las listas de verificación; estos archivos adjuntos deben de estar debidamente especificados en una lista de referencias controladas dentro de este documento. Es importante mencionar que este formato y método de trabajo debe ser aprobado por el cliente.

4. CONCLUSIONES

La implementación del estándar aeroespacial 9145 en la industria de aviación, espacio y defensa puede tener una ligera variación de organización a organización o dependiendo del producto a desarrollar. Por lo que este articulo provee una vista sintetizada y general de los requerimientos de la metodología APQP y su uso en el desarrollo de productos nuevos apoyado en una serie de recomendaciones que fueron tomadas de experiencias previas en un caso de estudio aplicado de manera exitosa en esta industria. Estos lineamientos y recomendaciones generales pueden ser aplicados en diferentes desarrollos y en diversas industrias ya que, aunque la metodología APQP este estandarizada en la industria aeroespacial y automotriz; la necesidad de estandarizar y controlar el proceso de desarrollo de productos permite que su alcance sea aplicable a cualquier organización que desee tener un proceso de desarrollo de productos enfocado al cliente, a la calidad y a su rentabilidad.

REFERENCIAS

EATON (2015). Advanced product quality planning (APQP) and production part approval process (PPAP). CQD-116, Rev 1 (no publicado).

IAQG (2017). Aerospace APQP/PPAP Manual Rev B. SCMH section 7.2.3 APQP. Disponible en: https://scmh.iaqg.org/wpfd_file/scmh-7-2-3-aerospace-apqp-ppap-manual-rev-b-dated-10may2017/ (Consulta: 8 Mayo 2025).

IAQG (2021). SCMH – IAQG. Disponible en: https://scmh.iaqg.org/plan-manage/ (Consulta: 8 Mayo 2025).

IAQG (2025). Unlocking Aerospace Excellence: AS9145's APQP and PPAP Standards – IAQG. Disponible en: https://iaqg.org/unlocking-aerospace-excellence-as9145s-apqp-and-ppap-standards/ (Consulta: 8 Mayo 2025).

Jing, S., Li, R., Yan, J., Yang, F. and Chen, C.-C. (2017). Research on optimization of product development value stream. Cluster Computing, 22(S4), pp.10053–10061. https://doi.org/10.1007/s10586-017-1068-0

McAdam, R., O'Hare, T. and Moffett, S. (2008). Collaborative knowledge sharing in composite new product development: an aerospace study. Technovation, 28(5), pp.245–256. https://doi.org/10.1016/j.technovation.2007.07.003

Merriman, R.A. (2022). Statistical process control implementations within the aviation industry. Journal of Management and Engineering Integration, 15, pp.100-109. https://doi.org/10.62704/10057/24829

SAE International (2016). Aerospace standard AS9145™ Disponible en: https://www.sae.org/standards/content/as9145/ (Consulta: 8 Mayo 2025).

Titu, A.M. and Cupsan, V.C. (2022). Breakdown of the product quality assurance flow within the advanced product quality planning (APQP) methodology in the aerospace industry. Lecture Notes in Networks and Systems, pp.100–107. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05230-9_11

Titu, A.M., and Cupsan, V. C. (2019). Review of advanced product quality planning (APQP) in the aerospace industry. 11th Research/Expert Conference with International Participation "QUALITY 2019", ISSN 1512-9268. Disponible en: www.quality.unze.ba/zbornici/QUALITY%202019/index.php (Consulta: 8 Mayo 2025).

Titu, A.M., and Pop, A., (2021). Improving the quality of the analysis process of technical documentation in aerospace organization. In international journal of mechatronics and applied mechanics, 2021, Issue 9, pp. 175-181. Disponible en: https://ijomam.com/wp-content/uploads/2021/07/pag.-175-181_IMPROVING-THE-QUALITY-OF-THE-ANALYSIS-PROCESS-OF-TECHNICAL-DOCUMENTATION-IN-AEROSPACE-ORGANIZATION.pdf (Consulta: 8 Mayo 2025).

From Waste to Fuel: Softening Polymer Purges for Pyrolysis

Arias San Elías, Alejandra *, Becerra Rodríguez, María Blanca*

** Instituto Tecnológico de Querétaro, Av. Tecnológico esq. Mariano Escobedo s/n, col. Centro, cp 76000.*

(e-mail: alejandra.as@queretaro.tecnm.mx, maría.br@queretaro.tecnm.mx).

Abstract: This work addresses the challenge of polymer recycling, with an emphasis on polymer purges, which are waste materials generated during cleaning or material change in the injection molding process. These purges are typically discarded due to lack of reuse within the company, representing a loss of material with recovery potential due to their high calorific value. The main objective of this study is to reduce the effort required to cut purges into particles smaller than 2 cm, in order to facilitate their later use in pyrolysis processes. Through this technique, the goal is to obtain an oil with properties similar to fuel oil, promoting a viable energy alternative. The project's relevance lies in reducing the energy consumption associated with purging grinding, thus achieving a more cost-effective and efficient process. Since these residues are composed of hydrocarbons, they can be degraded by similar substances. For this reason, glycerin and soybean oil were selected as exposure agents. Nine purge samples were used, exposed for 48 hours to these fluids. Although the exact composition of each purge is unknown, the presence of polypropylene (PP) and high-density polyethylene (HDPE) was identified. The results showed that in some cases, the cutting effort increased instead of decreasing, as occurred with the black purges. However, the orange purge showed better behavior with soybean oil, while the red one responded better to glycerin. Although all samples showed changes in density after exposure, these did not have a clear effect on reducing the effort required for fragmentation.

Keywords: polypropylene, high density polyethylene, stress

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día el plástico juega un papel importante en la vida haciendo casi imposible poder vivir sin ellos, esto se ha dado a notar por la alta demanda que se ha tenido, en el 2013 la producción fue de 299 millones de toneladas (Omol et al., 2020) y ésta se ha seguido incrementando. En México el procesamiento de los plásticos se realizan en alrededor de 582 empresas las cuales no solo están dedicadas a ellos sino también al hule (*Banco de Información Económica (BIE)*, n.d.), por lo que trabajan con diferentes materiales, en estado virgen o reciclado y por varios procesos, uno de ellos la inyección.

La limpieza que se debe hacer en el cañón, es cuando hay cambios de material, color o que se haya quedado material de un día anterior, a dichos desperdicios de la inyección de plástico se les conoce como purgas, los cuales son un gran reto para las empresas, éstas se desea minimizar porque son perdidas monetarias para ellos debido a que algunos tiran las masas irregulares que obtienen de las máquinas y otros más las venden como basura, porque ya no pueden ser usadas dentro de su proceso por la degradación o el uso excesivo para su limpieza, separación y molienda

Por lo anterior, es que la generación de residuos plásticos ha originado que deba existir un manejo adecuado de sus residuos, siendo actualmente un gran reto al que la sociedad y la industria se está enfrentando para una sustentabilidad del planeta, porque además la presencia del plástico se incrementa continuamente y se estima que el 50% de ellos son elaborados para un solo uso (Hopewell et al., 2009).

1.1 Pirólisis

La pirolisis es un proceso termoquímico, Al-salem et al.(2017) mencionan que es un proceso de degradación térmica, la cual se lleva a cabo en una atmosfera inerte libre de oxígeno para que no se formen dioxinas ni reacciones producidas por éste y puede o no usar un catalizador, también hacen referencia a que es económico, porque restaura la energía contenida en la materia prima utilizada y resuelve la contaminación al degradar todo lo que entra en el sistema (Jerzak et al., 2021, Xikui Zhang et al., 2021).

También puede ser considerada una técnica terciaria de reciclaje en donde los polímeros son convertidos en aceite, carbón y gases mediante una descomposición térmica originada por las altas temperaturas a las que fueron sometidos (Miandad et al., 2017), es decir que es un reciclaje químico, pero donde la fuente de alimentación al proceso debe venir de un petroquímico (Lerici et al., 2015).

Para que se pueda realizar el proceso, es importante conocer sobre la influencia del tamaño de partícula en la transferencia de calor, debido a que la pirólisis ocurre principalmente en la superficie de los residuos (Luo et al., 2010), por lo que mientras más grandes sean las partículas, éstas tendrán mayor

resistencia a la transferencia de calor y generando que dentro de ellas la temperatura sea inferior, resultando en una pirólisis incompleta, la cual ocasionaría que hubiera una generación excesiva de carbón residual.

Lo anterior obliga a buscar la forma de utilizar menos energía en la molienda, para que el proceso sea eficiente y redituable, pero que no altere el proceso ni los resultados de la pirólisis.

1.2 Degradación de polímeros

Luo, Shupin et al. (2013) reportan en uno de sus estudios la mezcla de polipropileno (PP) con biomasa, utilizando glicerina como agente plastificante. Al incorporarla, observaron una disminución en la rigidez del material y un aumento en su ductilidad, lo que evidencia un reblandecimiento de la matriz polimérica. Un aspecto destacable del estudio es el uso de temperatura como variable de apoyo para mejorar los resultados. Sin embargo, en el presente proyecto no se aplicará temperatura, ya que el objetivo es reducir el consumo energético asociado al proceso de corte y reblandecimiento de las purgas.

Otro agente reblandecedor es el aceite de soya, el cual contiene ácido oleico, el cual puede actuar como agente plastificante tanto en el polipropileno como polietileno. Sander et al., (2012) pudieron observar una reducción significativa en la rigidez y resistencia a la tracción de ambos polímeros, acompañada de un aumento en su elongación a la rotura, lo que indica una mayor flexibilidad. Por lo que los cambios reflejaron un reblandecimiento efectivo de la matriz polimérica, favoreciendo el procesamiento de sus muestras. Además, detectaron una ligera disminución en la temperatura de fusión, lo que les sugirió una alteración en la estructura cristalina de los materiales. Por último, se pudo demostrar que este tipo de plastificantes puede modificar sustancialmente las propiedades mecánicas de éstos.

Actualmente no existe mucha información en la literatura que hable sobre el reblandecimiento de las purgas poliméricas, debido a las combinaciones que éstas tienen, por lo que existe un reto que se presenta para el reusó en la industria, debido a su dureza y forma irregular obligando a utilizar demasiada energía para su transformación. La idea detrás de este trabajo es simple: si logramos ablandarlas, podríamos cortarlas más fácil y procesarlas mediante la pirólisis para así poder obtener algunos aceites o carbón con un alto poder calorífico.

De acuerdo a lo anterior, el trabajo pretende trabajar sobre los principios de la economía circular al proponer una estrategia para valorizar las purgas poliméricas, el cual actualmente representa una pérdida económica para la industria y un problema ambiental por la generación de gases de efecto invernadero, de acuerdo a Royer (2018) menciona que el polietileno es el más prolifero a emitirlos llegando a formar hasta 190 pmol/g de etileno y por su parte el polipropileno al momento de descomponerse genera gas metano hasta en un 170 pmol/g al día. Por otro lado los materiales al tener formas y espesores irregulares hacen que sean difíciles de reprocesar, lo que lleva a su descarte o venta como basura. La propuesta de reblandecer estas purgas mediante agentes plastificantes sin recurrir a temperaturas elevadas busca disminuir el consumo energético y facilitar su transformación. Esto permitiría su trituración eficiente y posterior aprovechamiento por pirólisis entregando un nuevo producto con alto contenido energético cerrando así el ciclo de vida del plástico, minimizando la generación de desechos. Además, esta alternativa podría integrarse fácilmente en las plantas de transformación actuales, aportando beneficios económicos y ambientales. De esta manera, el proyecto promueve la circularidad al reintegrar residuos al sistema productivo, disminuyendo el impacto ambiental del plástico e impulsando un modelo de producción más sostenible.

2. METODOLOGÍA

En el laboratorio de ingeniería industrial del Tecnológico de Querétaro, se tiene una máquina de inyección de plástico de 130 toneladas, ésta ha trabajado con polipropileno y polietileno de alta densidad, generando así diferentes purgas, debido al cambio de molde o limpieza del cañón por haber quedado material almacenado de una noche anterior.

Las purgas (Fig 1) están compuestas por material reciclado (PP y PEHD) junto a las coladas del proceso, por lo que se desconoce la composición de éstas, debido a que no han sido clasificadas si no simplemente almacenadas cuando se generan.



Fig. 1 Muestra de una purga

Después de haber sido seleccionadas las purgas, fueron sometidas a agentes de degradación para verificar si su esfuerzo al corte es modificado; una vez realizados los cortes, las muestras fueron evaluadas para verificar si hubo cambio en su densidad.

2.1 Probetas

Se seleccionaron 6 purgas, las cuales están divididas en 2 negras, 2 naranjas y 2 rojas con negro, por lo que se sabe que hay una combinación de HDEP y PP (negra), PP (naranja) y HDPE (roja), aunque se desconoce la cantidad de material reciclado por las coladas que fue empleado.

Una vez seleccionadas, se maquinaron en una fresa convencional cada una para poder obtener 3 barras con el mismo espesor y ancho entre ellas, lo anterior es debido a que como se pudo ver en la figura 1, son masas bastante irregulares y es necesario tenerlas al menos con el

mismo espesor para la prueba de corte, las probetas quedaron como se muestran en la figura 2.



Fig 2 Probetas

Las probetas se identificaron con la nomenclatura compuesta por 3 posiciones. La 1ra es la letra del color; negro N, naranja A y rojo R, la 2do el agente al que fueron sometidos; natural (n), aceite de soya (a) y glicerina (g); por último la 3er posición es el número 1 o 2.

El tiempo al que fueron sometidas a los agentes fue por 48 horas, para que éste pudiera interactuar con el polímero, antes de ser cortadas, esperando modificación en su esfuerzo al corte.

2.2 Esfuerzo cortante

La cizalla utilizada es una manual de palanca, la cual necesita de 5.9 K para vencer el reposo, por lo cual fue restado de la lectura de corte, en la figura 3 se muestra el diagrama de ésta junto con sus dimensiones. Con respecto a la medida de "e" la dimensión es solo hasta la base porque cada muestra tiene un espesor diferente.

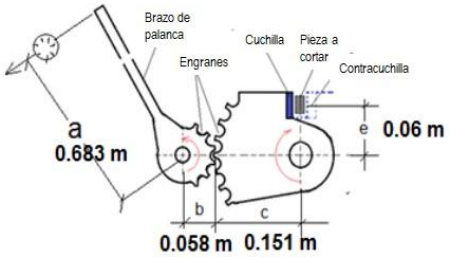


Fig 3 Cizalla de palanca

Los espesores, áreas y N requeridos para la realización del corte se muestran en la tabla 1,los datos anteriores serán sustituidos en las Ec 1 y Ec 2 para obtener la fuerza de corte empleada en el sistema y después poder obtener el esfuerzo cortante.

$$Fa = Pb \qquad (1)$$
$$Pc = Qe \qquad (2)$$

Tabla 1 "Datos de las probetas"

Muestras	Espesor (m)	Área (m^2)	Fuerza en cizalla (N)	Q (Pa)
Nn1	0.006	$1.32X10^{-4}$	215.8	5814.0
Nn2	0.013	$1.82X10^{-4}$	425.7	10369.3
Na1	0.006	$1.32X10^{-4}$	230.53	6210.9
Na2	0.013	$1.82X10^{-4}$	460.1	11207.2
Ng1	0.006	$1.32X10^{-4}$	348.3	9383.8
Ng2	0.013	$1.82X10^{-4}$	695.6	16943.6
An1	0.013	$2.6X10^{-4}$	171.5	4177.4
An2	0.009	$1.62X10^{-4}$	120.3	3100.2
Aa1	0.013	$2.6X10^{-4}$	160.3	3904.6
Aa2	0.009	$1.62X10^{-4}$	110.6	2850.2
Ag1	0.013	$2.6X10^{-4}$	184.1	4484.4
Ag2	0.009	$1.62X10^{-4}$	125.9	3244.5
Rn1	0.01	$1.3\ X10^{-4}$	103.7	2634.2
Rn2	0.01	$1.3\ X10^{-4}$	103.5	2629.1
Ra1	0.01	$1.3\ X10^{-4}$	106.5	2705.3
Ra2	0.01	$1.3\ X10^{-4}$	106.5	2705.3
Rg1	0.01	$1.3\ X10^{-4}$	94.22	2393.4
Rg2	0.01	$1.3\ X10^{-4}$	95.5	2425.9

2.3 Densidades

Por último, al ver algunas degradaciones visibles en las probetas se realizó la medición de su densidad para verificar si en realidad había disminución de masa, aumentando así la porosidad de las probetas en todo el interior de ellas.

Dicha prueba se realizó en una Balanza Metter Toledo XS104, primero se realizaron mediciones al aire, lo que consistía en tomar 5 mediciones, haciendo un cambio ligero de posición de la pieza o de orientación, la temperatura del cuarto era de 26°C.

Una vez terminada la prueba al aire, se realizó una en agua, por lo que se empleó agua desionizada, de acuerdo al manual de uso ésta debía estar a una temperatura de 21.6°C para poder obtener las densidades de las muestras, aquí solo se realizó una medición. Al termino del muestreo la máquina presentaba la densidad de cada una de ellas.

Cabe destacar que al tener los recursos limitados es importante primero poder verificar si habrá cambios en las muestras para poder realizar más estudios y contar con los equipos necesarios

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Los resultado obtenidos después de haber expuesto las purgas al aceite de soya y la glicerina, no fueron del todo lineales y mucho menos como se esperaba. Lo anterior se menciona debido a que algunas purgas se volvieron más resistentes al corte y otras redujeron muy poco, originando que no valga la pena el gasto del agente y el tiempo invertido en su degradación, además no existe una tendencia clara.

A continuación, en la tabla 2 se presenta cual es el esfuerzo al corte obtenido para cada una de las muestras, así como el porcentaje de reducción o de ganancia que presentan en comparación con las muestras al natural. Para la obtención de dicho resultado se utilizó la ec3 donde se muestra la relación de la fuerza aplicada y el área de las muestras

$$\tau = \frac{F}{área} \qquad (3)$$

Como se puede observar, las purgas denominadas "negras" no redujeron el esfuerzo, sino que lo incrementaron de manera considerable, siendo especialmente notorio en el caso del agente con glicerina, donde el aumento superó el 50%, lo cual contradice el comportamiento esperado en este tipo de materiales.

En lo referente a las purgas denominadas “naranjas”, sí se observó un cambio favorable al utilizar aceite de soya; sin embargo, la mejora fue mínima, por lo que no se considera una opción factible. Esto se debe tanto al tiempo invertido en el proceso como a la pérdida del aceite, ya que, aunque las purgas no lo absorben completamente, éste queda impregnado en su superficie, generando pérdidas a largo plazo.

Por último, se encuentran las purgas denominadas “rojas”, las cuales mostraron un mejor desempeño al utilizar glicerina como agente, logrando una reducción máxima del 9.13%. No obstante, al igual que en el caso de las “naranjas”, dicha disminución no resulta representativa, ya que el agente no se absorbe significativamente, pero permanece en la superficie del material y se va perdiendo de forma gradual. A esto se suma el tiempo prolongado de exposición requerido, lo que limita su viabilidad práctica.

Tabla 2 Esfuerzo cortante y su comportamiento

Muestras	τ (MPa)	%
Nn1	44.05	
Na1	47.05	106.83
Ng1	71.09	161.42
Nn2	56.97	
Na2	61.58	108.09
Ng2	93.1	163.42
An1	16.07	
Aa1	15.02	6.53
Ag1	17.25	107.34
An2	19.14	
Aa2	17.59	8.10
Ag2	20.03	104.65
Rn1	20.26	
Ra1	20.81	102.71
Rg1	18.41	9.13
Rn2	20.22	
Ra2	20.81	102.92
Rg2	18.66	7.72

En el caso de las purgas “naranjas” se presentó visiblemente el cambio que existió en la parte interna de ellas después de haber estado expuestas a los agentes, pues como se puede apreciar en la figura 4, se generó mayor porosidad, nombradas de izquierda a derecha es aceite, glicerina y natural. Por lo que se puede ver a simple vista es la cantidad de poros generados en las muestras de glicerina, perdiendo masa, pero incrementado su esfuerzo al corte, lo cual debería debilitar la probeta.



Fig 4 Porosidad en probetas

Tras detectar la presencia de porosidad, se decidió realizar una prueba de densidad en las probetas, para poder observar la pérdida de masa en cuanto a su volumen. Esta prueba se llevó a cabo en el laboratorio de CIDESI, lo cual limitó el análisis únicamente a las muestras identificadas con el dígito 1. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 Densidades

Muestra	ρ (g/cm3)	% de reducción
Nn1	0.9142	
Na1	0.9134	0.12
Ng1	0.9144	0.01
An1	0.9197	
Aa1	0.9034	1.77
Ag1	0.8878	3.47
Rn1	0.9501	
Ra1	0.9467	0.36
Rg1	0.9431	0.74

Algo que, si es notorio, es que los agentes si influyen en la densidad de las probetas, en una porción pequeña, pero todas presentaron disminución y algo importante de analizar es que

la purga "naranja" que tuvo mayor impacto en su densidad con la glicerina, ésta hizo que el esfuerzo al corte se incrementara.

A pesar de que la prueba de densidad no es la óptima para poder conocer el comportamiento de las purgas, porque será importante ver si hay degradación real en el material o cambio en su estructura cristalina, es importante mencionar que se tenía que ver si existían cambios, para poder justificar el uso de los equipos.

Siendo estos resultados preliminares necesarios para poder continuar con el estudio de reducir el esfuerzo al corte, para que al realizar la trituración de las purgas no se necesite mayor energía que la que se pueda entregar en los resultados de la pirólisis.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos no fueron los esperados, debido a que los agentes no cumplieron la función de reblandecer las purgas poliméricas para que el esfuerzo al corte fuera menor, debido a que en algunos casos se presentó un aumento, como fue el de las purgas negras tratadas con glicerina, haciendo con esto que no se justifique el uso de ellos.

Por otro lado, un punto importante del estudio es saber que existen agentes que pueden alterar tentativamente la composición de las purgas por lo que sería conveniente ver si ampliando el tiempo de exposición, se podría llegar a utilizar menos energía para su procesamiento.

Por lo anterior es importante poder realizar una prueba DSC para ver realmente que le está pasando al material en su parte interna en cuanto a degradación y cambio de estructura, que son las que están involucradas para el esfuerzo al corte.

También podría ser pertinente hacer una prueba TGA para ver los cambios químicos y sobre todo si los agentes podrán afectar la composición de los aceites pirolíticos.

Otro punto importante es que se podrían mezclar substancias para poder realmente hacer un cambio en las purgas y con esto utilizar menos energía para su trituración, por lo que este estudio representa un primer paso relevante hacia el aprovechamiento energético de estos residuos difíciles de procesar contribuyendo así al desarrollo de soluciones más sostenibles dentro del marco de la economía circular.

REFERENCIAS

Al-salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste. Journal of Environmental Management, 197(1408), 177–198

Banco de Información Económica (BIE). (n.d.). Retrieved January 30, 2020, from https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?tm=0#divFV436206

Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364(1526), 2115–2126. https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311

Jerzak, W., Gao, N., Kalemba-Rec, I., & Magdziarz, A. (2021). Catalytic intermediate pyrolysis of post-extraction rapeseed meal by reusing ZSM-5 and Zeolite Y catalysts. Catalysis Today, xxxx. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.10.023

Lerici, L. C., Renzini, M. S., & Pierella, L. B. (2015). Chemical Catalyzed Recycling of Polymers: Catalytic Conversion of PE, PP and PS into Fuels and Chemicals over H-Y. Procedia Materials Science, 8, 297–303. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.076

Luo, Shupin, Cao, Jinzhen, Peng, Yao (2013). Properties of glycerin-thermally modified wood flour/polypropylene composites. Polymer Composites, 35, 201-207. https://doi.org/10.1002/pc.22651

Luo, S., Xiao, B., Hu, Z., Liu, S., Guan, Y., & Cai, L. (2010). Influence of particle size on pyrolysis and gasification performance of municipal solid waste in a fixed bed reactor. Bioresource Technology, 101(16), 6517–6520. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.060

Miandad, R., Barakat, M. A., Rehan, M., Aburiazaiza, A. S., Ismail, I. M. I., & Nizami, A. S. (2017). Plastic waste to liquid oil through catalytic pyrolysis using natural and synthetic zeolite catalysts. 69, 66–78.

Omol, D. K., Acaye, O., Okot, D. F., & Bongomin, O. (2020). Production of Fuel Oil from Municipal Plastic Wastes Using Thermal and Catalytic Pyrolysis. Journal of Energy Research and Reviews, January, 1–8. https://doi.org/10.9734/jenrr/2020/v4i230120

Sander, M. M., Nicolau, A., Guzatto, R., & Samios, D. (2012). Plasticiser effect of oleic acid polyester on polyethylene and polypropylene. Polymer Testing, 31(8), 1077–1082. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.08.006

Thahir, R., Altway, A., & Juliastuti, S. R. (2018). Production of liquid fuel from plastic waste using integrated pyrolysis method with refinery distillation bubble cap plate column. 5, 70–77.

Zhang, Xikui, Yu, Z., Lu, X., & Ma, X. (2021). Catalytic co-pyrolysis of microwave pretreated chili straw and polypropylene to produce hydrocarbons-rich bio-oil. Bioresource Technology, 319(September 2020). https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124191

Open-Source Technology for Industrial Automation of a Hydraulic Cylinder Driven by a Servovalve

Vazquez Aguilar, Juan Alejandro*, Torres del Carmen, Felipe de Jesús*, Plascencia Mora, Héctor*, Cano Lara, Miroslava, Balvantín García, Antonio de Jesús***

** Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca. Carretera Federal Salamanca-Valle de Santiago km, 3.8 +1.5, Comunidad Palo Blanco, Salamanca, Guanajuato, C.P. 36885. (e-mail: {ja.vazquezaguilar, fdj.torres, hplascencia, antonio.balvantin}@ugto.mx)*

*** TecNM/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Departamento de Ingeniería Mecatrónica. Silao-Irapuato km 12.5 El Copal, Irapuato, Guanajuato, C.P. 36821. (e-mail: miroslava.cano@tecnm.itesi.edu.mx)*

Abstract: The use of open-source technology has acquired great relevance in engineering projects that pursue educational objectives related to automation within undergraduate programs. Commonly these projects are limited to using electronic devices, such as actuators and sensors, of low cost. In this work, open-source technology is used as the main controller for the automation of a hydraulic system formed by a double-acting cylinder, a 4/3-way proportional servo control valve and a hydraulic motor pump unit to operate high pressures for industrial purposes. Thus, a Raspberry Pi Pico microcontroller is used to manipulate the servo valve that requires a $\pm 15\ V\ DC$ power supply and 0 to $\pm\ 10\ V\ DC$ for the command signal, which is handled by a board that produces an analog voltage when a pulse width modulation coded in MicroPython is programmed. In addition, the microcontroller obtains digital values of displacement from a Keyence industrial laser sensor powered with 10 to $30\ V\ DC$ via an external analog-to-digital converter that is used due to the output voltage span of the sensor. The experimental results highlight the feasibility of using open-source technology for industrial automation of a hydraulic system where the transparency of the design would enable the recyclability of products.

Keywords: Open-source technology; industrial automation; Raspberry Pi Pico; hydraulic system; MicroPython.

1. INTRODUCCIÓN

La automatización industrial es un área de estudio, investigación y desarrollo tecnológico en constante innovación debido a las necesidades de aumentar la producción mientras se disminuyen costos y se minimizan los efectos nocivos al medioambiente, resultando en una pieza clave dentro del desarrollo sostenible de la sociedad.

Por otro lado, la tecnología open-source, tanto de software como de hardware, enfatiza en su principio fundamental de ser abierta y de implementación práctica, lo cual significa que debe ser usada en diseños públicamente disponibles, posibilitando su estudio y modificación, a lo que se le denomina la transparencia del diseño (Blind et al., 2021). Los avances en el uso de tecnología de código abierto han propiciado una inmensa variedad de aplicaciones de automatización que se desarrollan a nivel de prototipo educativo dentro de los programas de distintas ingenierías de nivel licenciatura (Veliu et al., 2024).

Sin embargo, existe aún una brecha cuando se trata de equipos industriales que se emplean en sistemas mecánicos y que requieren de automatización que sea implementada por medio de tecnología open-source. En particular, los sistemas hidráulicos siguen siendo ampliamente usados en los procesos de manufactura industrial debido a la gran capacidad de desarrollar fuerza por medio de la potencia hidráulica que se genera por el aceite sometido a alta presión. Un sistema hidráulico, básicamente está compuesto por la unidad de suministro de potencia que consiste en el equipo motor-bomba y válvula de regulación de presión, el elemento de control que es la servoválvula de vías y el elemento de salida que se refiere al cilindro de doble efecto.

En estos sistemas hidráulicos, la automatización se ha logrado comúnmente a través de tecnología de relevadores y de controladores lógicos programables. En la era de la digitalización de la automatización, esta se ha obtenido por medio de equipos de cómputo de gran capacidad de hardware que ejecutan rutinas de programación en softwares bajo licencia. Por ejemplo, en Won et al., (2020) se implementó el control no lineal con observador de estados del seguimiento de trayectoria de un equipo electrohidráulico compuesto por una servoválvula de tipo flapper (M454, Star Hydraulic Ltd.) y un cilindro de doble efecto que tiene una longitud de carrera efectiva de $\pm 0.043\ m$. La configuración experimental fue implementada a través de un transformador diferencial variable lineal para medir la posición del cilindro y una celda de carga para obtener la fuerza de empuje usando una computadora personal a una frecuencia de muestreo de $1\ kHz$ por medio de un convertidor analógico a digital (ADC) de 12 bits de resolución y un convertidor digital a analógico (DAC) con una interfaz EtherCAT y un procesador de doble núcleo a

2.16 GHz (C6920, Intel) bajo el sistema de automatización extendido TwinCAT3. En Wang et al., (2021) el banco experimental incluye un cilindro asimétrico, una estación de bombeo, una masa de carga, una servoválvula y un sensor de desplazamiento. La servoválvula es una Rexroth 4WRPH10C3B100L, ancho de banda superior a 80 Hz, con una señal del $\pm 10\%$ y caudal nominal de 100 L/min. El sensor de desplazamiento es Heidenhain LS628C cuya precisión es de $\pm 5\ \mu m$. La tarjeta de adquisición de datos es PCI-6229 de National Instruments con convertidores A/D de 16 bits y D/A de 16 bits. El algoritmo de control se aplica en el entorno en tiempo real de MATLAB/Simulink con un equipo de cómputo Advantech 610 L y una computadora host Dell Vostro 3460. En Zhou et al., (2021) se utiliza una bomba de propulsión, válvula de retención de control hidráulico, válvula direccional de control electrohidráulico, cilindro hidráulico, válvula de seguridad, disyuntor de retorno y válvula de corte en el sistema, así como sensores de presión de 40 MPa, un sensor láser de 1.5 m de alcance y un sensor magnetoestrictivo para medir el desplazamiento del vástago. La frecuencia de adquisición de datos del sistema de prueba es de 2 kHz por medio de una computadora personal. En Guo et al., (2022) el servosistema hidráulico controlado por una computadora de escritorio como controlador principal permite manipular al cilindro hidráulico, sensor de desplazamiento, servoválvula, bomba de engranajes, cilindro de aceite y servomotor.

Como ya se mencionó en líneas anteriores, la problemática consiste en que se tienen numerosas aplicaciones de automatización con tecnología open-source en sistemas compuestos por elementos electrónicos de baja escala como actuadores y sensores de bajo costo que requieren alimentación de 5 V CD en su mayoría, mientras que en los casos donde se logra la automatización de sistemas con equipo industrial, se hace uso de computadoras con gran capacidad de hardware y equipo relacionado con software bajo licencia. Por tanto, en este trabajo se presenta la automatización industrial de un sistema hidráulico compuesto por un cilindro de doble efecto y servoválvula de control proporcional que trabajan a alta presión hidráulica, así como un sensor laser de distancia de tipo industrial; a través de tecnología open-source dada por módulos electrónicos que sirven como convertidor digital-analógico (DAC), convertidor analógico-digital (ADC) y el microcontrolador Raspberry Pi Pico programado en MicroPython con el requerimiento de trabajar con distintos niveles de voltaje.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se detalla el sistema hidráulico, en la sección 3 se describen los componentes usados, en la sección 4 se explica la programación en Python, en la sección 5 se muestran los resultados obtenidos y en la sección 6 se dan las conclusiones.

2. SISTEMA HIDRÁULICO

El sistema hidráulico que se muestra en la Fig. 1, está compuesto por:

- 0V → unidad de suministro de potencia hidráulica conteniendo al equipo motor-bomba, válvula reguladora de presión, manómetro, tanque y conexiones para línea de presión y retorno.
- 1V1 → servo válvula proporcional de control de 4/3 vías que manipula el movimiento del actuador final.
- 1P → acumulador hidráulico.
- 1A → cilindro hidráulico de doble efecto.

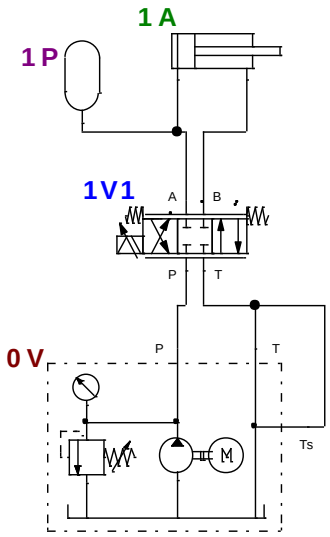


Fig. 1. Sistema hidráulico simbólico para la automatización.

Físicamente, el sistema hidráulico para la automatización se encuentra ubicado en el Laboratorio de Manufactura de la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, como se visualiza en la Fig. 2. Todos estos elementos están conectados eléctricamente desde un panel de usuario de la Fig. 3 donde se localizan las distintas fuentes de voltaje con las que se alimentan a cada uno de los equipos.

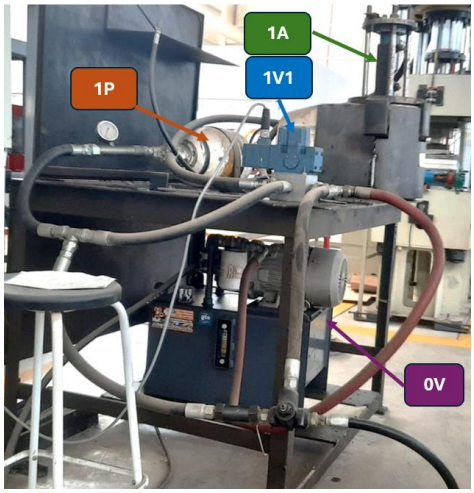


Fig. 2. Sistema hidráulico para la automatización con componentes físicos.

3. DESCRIPCIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN

Debido a que la problemática de automatización consiste en controlar el avance y retroceso del cilindro de doble efecto a través de la servoválvula de control proporcional por medio de una tarjeta de desarrollo de tecnología open-source, la cual será el microcontrolador Raspberry Pi Pico, que también

gestionará el sistema de monitoreo de distancia con el uso del sensor laser, a continuación, se darán los detalles técnicos de estos elementos.



Fig. 3. Panel de usuario para las conexiones eléctricas del sistema hidráulico.

3.1 Microcontrolador Raspberry Pi Pico.

La Raspberry Pi Pico, mostrada en la Fig. 4, es una tarjeta de desarrollo diseñada por la fundación Raspberry Pi que contiene un microcontrolador RP2040, y es considerada como un dispositivo de cómputo pequeño que permite la interfaz con hardware externo a través de "escribir/leer" los pines de entrada/salida Staple (2023).

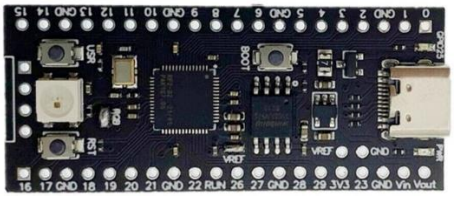


Fig. 4. Placa de desarrollo Raspberry Pi Pico.

Aunque el auge de las aplicaciones educativas de automatización se ha tenido con el uso de placas de desarrollo como el Arduino Uno, la Raspberry Pi Pico ofrece mejores consideraciones técnicas que permiten obtener un mayor desempeño como se aprecia en la Tabla 1. Sin embargo, existen características técnicas dadas en la Tabla 2 que limitan su uso de manera directa cuando se conecta a hardware externo.

3.2 Servo válvula de control proporcional.

La servoválvula de control proporcional de la Fig. 5, de la marca MOOG-D661, útil para posición electrohidráulica, velocidad, presión o sistemas de control de fuerza con requerimientos de alta respuesta dinámica. Esta válvula requiere una fuente de alimentación de ± 15 V CD y una señal de comando para su activación de 0 a ± 10 V CD. Su principio de funcionamiento consiste en la activación del carrete que es accionado por un mecanismo de aleta y tobera, para lo cual la señal de comando es rectificada por un demodulador y devuelta al amplificador de control que acciona proporcionalmente el desplazamiento del carrete hasta que el voltaje de la señal de mando y el voltaje de realimentación son iguales Sandin (2003).



Fig. 5. Servoválvula MOOG-D661.

Tabla 1. Especificaciones de la Raspberry Pi Pico y Arduino UNO.

Especificación	Raspberry Pi Pico	Arduino Uno
Pines digitales entrada/salida	26	14
Pines análogos entrada/salida	4	6
Procesador	Dual-core RP2040 a 133 MHz	Single-core ATmega328 a 16 MHz
Flash (almacenamiento)	2 MB	32 KB
RAM	264 KB	2 KB
Convertidor analógico-digital	12 bits de resolución	10 bits de resolución

Tabla 2. Características técnicas relacionadas con el voltaje de la Raspberry Pi Pico.

Característica técnica	Nivel de voltaje
Alimentación	1.8 – 5.5 V CD
Salida/entrada de pin digital	3.3 V CD
Salida/entrada máxima de pin analógico	3.3 V CD

La consideración técnica del funcionamiento de la servoválvula proporcional está en relación con sus conexiones eléctricas, de acuerdo con la hoja de datos existen 2 pines llamados U_D y U_E en los cuales se introduce la señal de comando para formar el amplificador diferencial. De esta manera, la carrera del carrete de la válvula es proporcional al voltaje diferencial $U_D - U_E$. El 100% de apertura de la válvula es lograda cuando $U_D - U_E = +10\ V\ CD$, es decir, en esta condición el cilindro se extiende. Cuando el voltaje diferencial es $U_D - U_E = -10\ V\ CD$, el carrete de la válvula se desplaza de manera que permite que el cilindro se retraiga. Por último, cuando el voltaje diferencial $U_D - U_E = 0\ V\ CD$, el carrete se ubica en la posición central de la válvula.

3.3 Módulo convertidor digital-analógico (DAC).

Debido a que el microcontrolador Raspberry Pi Pico maneja una salida digital de $3.3\ V\ CD$ constante, por lo que se puede producir una señal de modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) con una amplitud máxima de $3.3\ V$, no es posible usar directamente la Raspberry Pi Pico para

manipular a la servoválvula y se requiere de un convertidor digital-analógico (DAC) que sea la interfaz entre el microcontrolador y la servoválvula. El módulo electrónico GP8101S de la Fig. 6 convierte la señal PWM generada por la Raspberry Pi Pico a una señal analógica de voltaje entre 0 y $10\ V\ CD$, en una relación directamente proporcional con el ciclo de trabajo de la señal PWM, a una frecuencia entre $50\ Hz$ y $50\ KHz$.

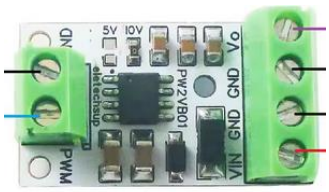


Fig. 6. Módulo GP8101S convertidor de señal PWM a voltaje analógico.

3.4 Sensor laser de distancia.

El sensor laser análogo CMOS multifunción Keyence de la serie IL es un sensor de desplazamiento compacto y ligero de tipo industrial que tiene alta repetibilidad de $2\ \mu m$, para uso en ambientes rudos, y consiste básicamente de un amplificador multifunción IL-1000 (Fig. 7a) y de un cabezal de medición cuyo modelo depende del rango de medición, el cual para este trabajo se utilizó el IL-065 (Fig. 7b) con un rango desde el cabezal de 55 a 105 mm. El cabezal de medición IL-065 se conecta al amplificador multifunción IL-1000, el cual debe ser alimentado con un voltaje de 10 a $30\ V\ DC$ y es posible seleccionar una de cuatro salidas analógicas: $\pm 5\ V\ DC$, 1 a $5\ V\ DC$, 0 a $5\ V\ DC$, o de 4 a $20\ mA$.



a) b)

Fig. 7. a) Amplificador IL-1000. b) Sensor de medición IL-065

3.5 Módulo convertidor analógico-digital (ADC).

La tarjeta Raspberry Pi Pico es usada para adquirir los datos de medición del sensor laser, por lo que se requiere de un convertidor analógico-digital. Notar que la propia Raspberry Pi Pico cuenta con un ADC integrado de 12 bits de resolución, sin embargo, tiene la limitante que en sus pines analógicos de entrada puede recibir hasta un voltaje de $3.3\ V$ como máximo.

Bajo esta condición existen varias alternativas para convertir la señal analógica que entrega el sensor laser en datos digitales, una de ellas es seleccionar la salida del sensor laser que genere una señal analógica de voltaje de 0 a $5\ V\ CD$ y utilizar un ADC externo a la Raspberry Pi que sea compatible con este rango de voltaje. Por tanto, se ha requerido del módulo ADS1115 de la Fig. 8, el cual tiene una resolución de 16 bits, cuenta con comunicación serial I2C y se alimenta con un voltaje de 2 a $5.5\ V\ CD$, por lo que convierte señales analógicas que se encuentren en ese rango en cualquiera de sus 4 canales de entrada.

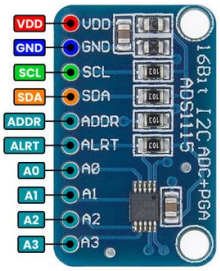


Fig. 8. ADS1115, convertidor analógico-digital de 16 bits.

4. PROGRAMACIÓN DE LA RASPBERRY PI PICO.

La programación del microcontrolador Raspberry Pi Pico no se puede realizar de manera directa con lenguaje Python debido a su capacidad de memoria, por tal motivo, en 2014 fue lanzado el lenguaje de programación MicroPython, el cual es compatible con Python. MicroPython ha sido desarrollado específicamente para microcontroladores, incluye muchas de las características principales de Python, además de que se han ido sumando funciones nuevas que permiten aprovechar las ventajas que ofrece el microcontrolador Raspberry Pi Pico Halfacree, (2021).

El entorno de programación o ambiente integrado de desarrollo (IDE, por sus siglas en inglés) usado en este trabajo es Thonny, el cual es ampliamente popular para las programaciones de las tarjetas desarrolladas por la fundación Raspberry Pi y además se encuentra disponible para Linux, Windows y Mac. Para el control de la servoválvula se usaron dos pines de la Raspberry Pi Pico para generar una señal PWM y así utilizar dos módulos convertidores de PWM a voltaje. El código mostrado en la Fig. 9 genera la señal PWM y, además, se incluye una sencilla interfaz de usuario para que el operador, por medio del teclado, elija la opción que le permita:

Opción 1 → carrete de la servoválvula se desplaza completamente hacia su lado izquierdo, el cilindro avanza.

Opción 2 → carrete de la servoválvula se desplaza completamente hacia su lado derecho, el cilindro regresa.

Opción 3 → carrete de la servoválvula se ubica en la posición central, el cilindro no se mueve en ninguna dirección.

El otro código desarrollado ha sido empleado para obtener los datos del desplazamiento a través de la señal analógica que genera el sensor laser. Este código se muestra en la Fig. 10.

5. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la puesta en marcha del sistema hidráulico bajo un esquema de control ON-OFF por medio del manejo de la servoválvula proporcional que opera con un voltaje diferencial, el cual es generado a partir de la señal PWM de la Raspberry Pi Pico y el convertidor PWM a voltaje.

```python
import machine
import utime

ledrojo = machine.PWM(machine.Pin(28))
ledamarillo = machine.PWM(machine.Pin(20))

ledrojo.freq(100)
ledamarillo.freq(100)

while True:

    Opción = int(input('Opción a realizar: '))

    if Opción == 1:
        ledrojo.duty_u16(65536)
        ledamarillo.duty_u16(0)

    elif Opción == 2:
        ledrojo.duty_u16(0)
        ledamarillo.duty_u16(65536)

    elif Opción == 3:
        ledrojo.duty_u16(0)
        ledamarillo.duty_u16(0)

    else:
        print('No existe ésta opción')
```

Fig. 9. Código para control de la servoválvula.

```python
import utime
from machine import I2C, Pin

class ADCDevice:
    def __init__(self, i2c_bus, address=72):
        self.i2c = i2c_bus
        self.address = address

    def read_config(self):
        self.i2c.writeto(self.address, bytearray([1]))
        result = self.i2c.readfrom(self.address, 2)
        return result[0] << 8 | result[1]

    def read_value(self):
        self.i2c.writeto(self.address, bytearray([0]))
        result = self.i2c.readfrom(self.address, 2)
        config = self.read_config()
        config &= ~(7 << 12) & ~(7 << 9)
        config |= (4 << 12) | (1 << 9) | (1 << 15)
        config = [int(config >> i & 0xff) for i in (8, 0)]
        self.i2c.writeto(self.address, bytearray([1] + config))
        return result[0] << 8 | result[1]

    @staticmethod
    def val_to_voltage(val, max_val=32767, voltage_ref=5.16):
        return val / max_val * voltage_ref

i2c_bus = I2C(1, freq=400000, scl=Pin(15), sda=Pin(14))
devices = i2c_bus.scan()

for device in devices:
    print(device)

adc = ADCDevice(i2c_bus)
print(bin(adc.read_config()))

while True:
    val = adc.read_value()
    voltage = adc.val_to_voltage(val)
    distancia=voltage*10
    print("ADC Value:", val, "Voltage: {:.3f} V".format(voltage),...
          "Distancia: {:.3f} mm".format(distancia))
    utime.sleep(0.5)
```

Fig. 10. Código para adquisición de datos de distancia del sensor laser.

En la Fig. 11, se muestran los resultados del proceso de caracterización del módulo DAC que convierte una señal PWM a voltaje analógico, en la cual se observa que tiene un comportamiento lineal, por lo que no es necesario hacer ningún ajuste o regresión. En las Fig. 12, Fig. 13a y Fig. 13b se presenta evidencia de las pruebas realizadas para el control de la servoválvula, donde se visualiza que el cilindro ha sido completamente retraído y avanza completamente. El video completo de esta prueba puede encontrarse en el enlace PosicionesActuador.mp4.

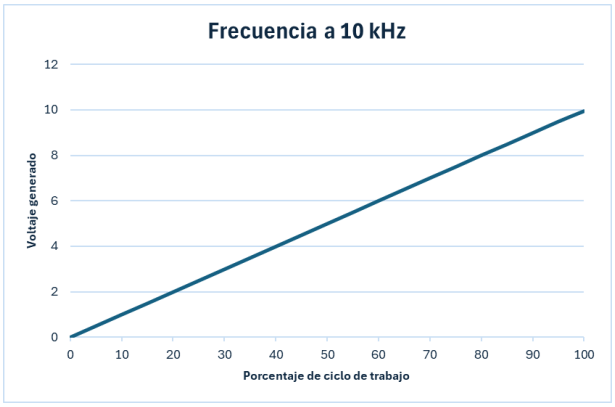


Fig. 11. Relación lineal del convertidor de PWM a voltaje.

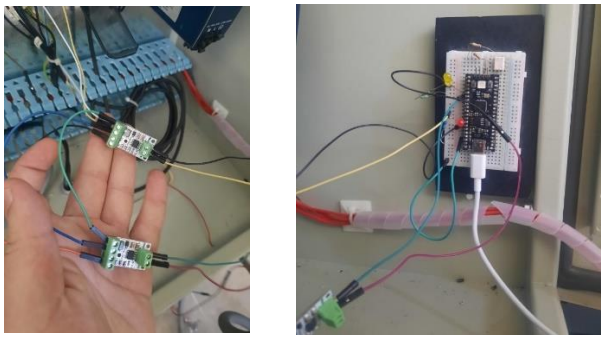
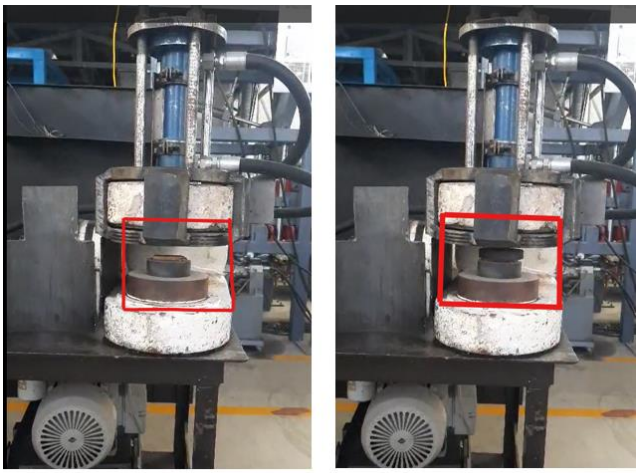


Fig. 12. Módulo convertidor de PWM a voltaje para formar el amplificador diferencial de la servoválvula.



a) b)

Fig. 13. a) Cilindro completamente retraído. b) Cilindro completamente extendido.

De manera paralela se ha caracterizado el sensor laser de desplazamiento en conjunto con el ADC externo y la propia Raspberry Pi Pico para formar un sistema de adquisición de datos. Para el sensor laser Keyence IL-1000 e IL-065 se hicieron las pruebas de caracterización como se presenta en las Fig. 14 y Fig. 15 donde se ha utilizado la Raspberry Pi Pico en conexión serial con el ADC ADS1115 que es compatible con el nivel de voltaje entregado por el sensor. En la Fig. 16 se muestra la gráfica de los datos obtenidos dentro del rango de

medición del cabezal IL-065 en la cual se determina que el sistema de adquisición tiene un comportamiento lineal, aunque reduce el rango de medición de 0 a 40 mm.

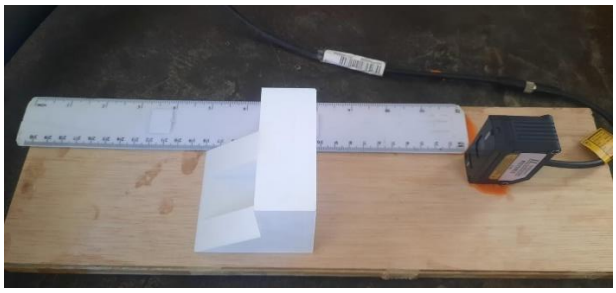


Fig. 14. Caracterización del sensor laser usando el cabezal IL-065.

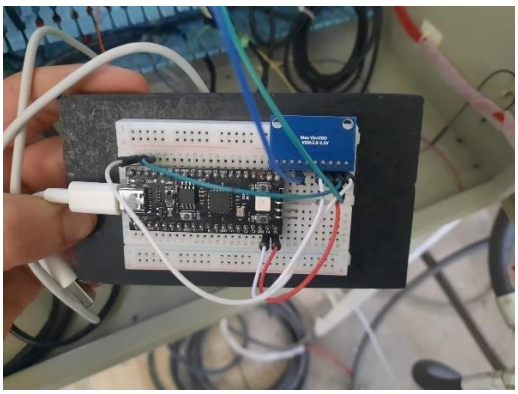


Fig. 15. Sistema de adquisición de datos con la Raspberry Pi Pico y el ADC externo ADS1115.

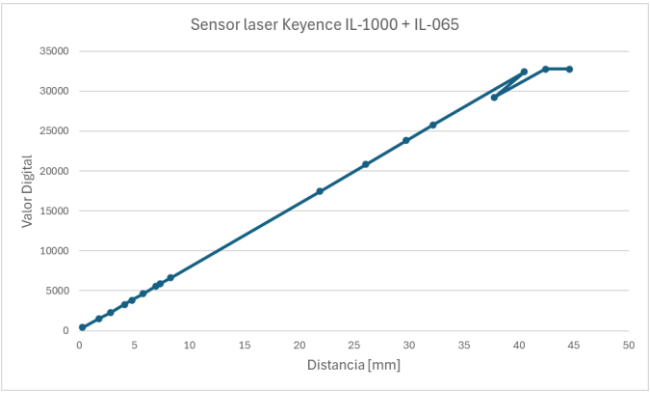


Fig. 16. Resultados del sistema de adquisición de datos del desplazamiento.

6. CONCLUSIONES

Se desarrolló una aplicación de automatización industrial con tecnología open-source donde el componente principal de control y adquisición de datos es un microcontrolador Raspberry Pi Pico, el cual, en conjunto con módulos electrónicos como el convertidor de señal PWM a voltaje y el convertidor analógico-digital ADS1115 permitieron el control de un cilindro hidráulico de doble efecto manejado por una servoválvula proporcional que se activa bajo el principio de un amplificador diferencial de voltaje. Respecto a la adquisición de datos, esta se logró tomando la señal de voltaje análogo generada por un sensor laser de desplazamiento Keyence que está compuesto por un amplificador multifunción IL-1000 y un cabezal de medición IL-065, el cual es de tipo industrial. Ambas aplicaciones, la conversión de señal PWM a voltaje analógico, así como la adquisición de datos, mostraron tener un comportamiento lineal, lo cual es de requerimiento importante para llevar a cabo distintas acciones de control y monitoreo.

En trabajos futuros se espera obtener datos que permitan relacionar la variación de la señal PWM y el caudal o tasa de flujo que circula por el circuito hidráulico para obtener una función de transferencia del sistema completo.

REFERENCIAS

Bacca-Bastidas, G. A., Vásquez-Valencia, I., y Pérez-Ordóñez, J. (2015). Diseño, construcción y caracterización de sistema neumático para la medición de rugosidad. *TecnoLógicas*, 18(35), 45-55.

Blind, K., Böhm, M., Grzegorzewska, P., Katz, A., Muto, S., Pätsch, S., & Schubert, T. (2021). The impact of Open Source Software and Hardware on technological independence, competitiveness and innovation in the EU economy. *Final Study Report. European Commission, Brussels, doi*, *10*, 430161.

Guo, Y. Q., Zha, X. M., Shen, Y. Y., Wang, Y. N., y Chen, G. (2022). Research on PID position control of a hydraulic servo system based on Kalman genetic optimization. *Actuators,* 11 (6), p. 162.

Halfacree, G., y Everard, B. (2021). *Get Started with MicroPython on Raspberry Pi Pico: The Official Raspberry Pi Pico Guide.* Raspberry Pi Press, Reino Unido.

Sandin, P. E. (2003). *Robot mechanisms and mechanical devices illustrated* (p. 134). McGraw-Hill, USA.

Staple, D. (2023). *Robotics at Home with Raspberry Pi Pico: Build autonomous robots with the versatile low-cost Raspberry Pi Pico controller and Python*. Packt Publishing Ltd, Birmingham, Mumbai.

Veliu, C., Petzold, V., Reichelt, D., Stange, M., e Ihlenfeldt, S. (2024). A case study on the use of open source hardware in mechanical engineering. *Procedia CIRP*, *128*, 680-685.

Wang, Y., Zhao, J., Ding, H., y Zhang, H. (2021). Output feedback control of electro-hydraulic asymmetric cylinder system with disturbances rejection. *Journal of the Franklin Institute*, *358*(3), 1839-1859.

Won, D., Kim, W., y Tomizuka, M. (2020). Nonlinear control with high-gain extended state observer for position tracking of electro-hydraulic systems. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, *25*(6), 2610-2621.

Zhou, R., Meng, L., Yuan, X., y Qiao, Z. (2021). Research and experimental analysis of hydraulic cylinder position control mechanism based on pressure detection. *Machines*, 10 (1), 1.

Digital Platforms: An Adoption of Technologies to Promote Tourism in the Huetamo Region of Michoacán

Dra. Mariela Yanin Magaña Gutiérrez*. Dr. Carlos Reyes Dueñas.* Mtro. José Antonio Sotelo Aguirre*

**Instituto Tecnológico Superior de Huetamo, Michoacán, México (e-mail: mariela.mg@huetamo.tecnm.mx, carlos.rd@huetamo.tecnm.mx, jose.sa@huetamo.tecnm.mx).*

Abstract: This article demonstrates the importance of using digital platforms to access services such as lodging and accommodation, among others, for tourist areas in certain regions. It shows percentages of their use and growth. However, at the same time, they lack comprehensive information on the various places available for vacationing or visiting near the sites they offer. The content consists of an introduction, development, results and analysis, and conclusions. It analyzes the benefits of adopting technologies in the Tierra Caliente region of Huetamo, Michoacán, which lacks a means to showcase its attractive products and services. This documentary research provides guidelines for concentrating these tourism services and activities within a platform to improve their economic impact, taking advantage of the benefits that technologies provide.

Keywords: *Tourism Platform, Regional Economy, Development, Tierra Caliente, Economic Potential, Documentary Research*

1. INTRODUCCIÓN

El turismo es una de las actividades que mayor derrama económica permite generar en cualquier región del país, impactando en varios aspectos como la mejora de servicios y la inclusión de mayores atractivos para los visitantes. Así como mejores condiciones de vida de los locatarios, quienes, motivados por los beneficios, buscan innovar y mejorar con el fin de obtener más y mejores ingresos captando la mayor cantidad de turistas posibles.

Al mismo tiempo, el aprovechar la implementación de tecnologías web para el fomento de dicha actividad permite tener un mayor alcance e influencia en los viajeros que desconocen los diversos lugares posibles a visitar por trabajo u ocio. Permitiendo mientras su estancia, la posibilidad de visitar de más de un lugar en la localidad que se encuentra.

Para ello se ha notado que, desde sus inicios, las herramientas aplicadas al turismo como las plataformas digitales de asistencia, han propiciado un mayor conocimiento hacia los interesados en vivir la experiencia con mayor control de información sobre los sitios que se van a visitar. Proporcionando algunos datos de relevancia para el turista, procurando enterarlo de sitios con algunos productos y servicios que se ofertan.

Actualmente existen sitios que se enfocan en proporcionar servicios como hospedaje, vuelos, renta de algunos bienes, entre otras actividades de asistencia. Dichas plataformas como Trivago, Booking, Airbnb, entre otras, concentran este tipo de información que permite al usuario realizar una planeación sobre su viaje.

Sin embargo, es importante considerar la adopción de dichas plataformas y tecnologías para permitir generar nuevas herramientas que implementen elementos de manera similar, pero que al mismo tiempo proporcionen información de la zona y diversos sitios de la región como ya se ha mencionado.

Específicamente en la región de tierra caliente del municipio de Huetamo Michoacán, no se cuenta con una herramienta tecnológica de impulso hacia los posibles turistas o visitantes ocasionales, tema en el que se centra el presente artículo. Puntualizando también que hay información muy general del municipio en diversas publicaciones y con muchas áreas de oportunidad, mismos que impiden dar a conocer novedades de infraestructura o negocios que incluso existen desde hace mucho tiempo o algunos otros de reciente creación por la falta de actualización de los contenidos que se muestran.

Con la implementación de la plataforma va a permitir beneficiar el desarrollo y productividad de la población calentana. Quienes cuentan con productos y servicios, así como zonas arqueológicas, siendo atractivos para dar a conocer su cultura y tradiciones tanto a población local como visitantes de cualquier parte del mundo.

Por dicha causa, se dio a la tarea de realizar una investigación documental en fuentes de gobierno, artículos, algunas bibliotecas y diarios con material fehaciente, con el fin de localizar elementos que no se han considerado en las plataformas existentes y que se han tomado en cuenta para incluir en plataforma web propuesta.

2. ANTECEDENTES

Desde hace mucho tiempo, es importante para el gobierno crear programas que permiten que zonas con marcadas riquezas sean mostrados al público para atraer visitantes, incrementar la cantidad de estos y permitir mayores ingresos para las localidades que cuentan con ellos.

Notando la relevancia a nivel nacional por los ingresos económicos que representan para la población dichos programas, procuran enriquecer cada vez más de oportunidad a diferentes poblaciones.

Algunas de las propuestas más marcadas son los Pueblos Mágicos. Quienes a través de ciertas consideraciones son integrados en la lista y que cumple con símbolos y leyendas, poblados con historia que en muchos casos han sido escenario de hechos trascendentes para nuestro país, son lugares que muestran la identidad nacional en cada uno de sus rincones, con una magia que emana de sus atractivos; visitarlos es una oportunidad para descubrir el encanto de México(Turismo 2020)

Al mismo tiempo, existen muchas áreas de oportunidad para recabar datos o establecer información de muchas zonas que pueden incluirse en ese concentrado. Tal es el caso del municipio Huetamo Michoacán, donde particularmente se centra este objetivo. Ya que no cuenta con un sitio de promoción o un espacio donde se permita promocionar sus riquezas regionales y presencia por su pasado histórico.

2.1 Alcance de las plataformas digitales

La era digital ha venido a derribar barreras que antes limitaban mostrar datos a otros sitios lejanos al origen, es decir que, gracias al alcance de las personas por acceder a información mediante la web, ha permitido proporcionar divulgaciones de interés para muchos tipos de productos y servicios. El uso de las plataformas también queda muy marcado desde el 2017, cuando ya se considera en el estudio de Calderón (2017) reconociendo la importancia que tiene el turista en el control de la información de lugares a visitar. Utilizando para dicha actividad varios elementos que en su momento le permitían tener datos de interés para considerar en su viaje por medio de fotos, comentarios y algunos otros elementos que de alguna manera brindaran información para tomar en cuenta al iniciar su travesía.

Por parte del gobierno del estado publicado por Social (Social, 2023) se han identificado datos del año 2022, siendo relevantes en ingresos por turismo, tomando en cuenta datos de hospedaje e ingresos por dicha actividad. Además, la Secretaría de Turismo durante el año 2024 se ha notado una diferencia superior al año 2023 (Primera Plana MX, 2025). Indicando con esto, los números crecientes en indicadores que benefician dichas actividades de turismo en el estado. Si se incluye el apoyo de la plataforma web con secciones administrables que permitan la actualización y se establecen aquellos negocios de los alrededores, el impacto económico ingresado será mayor. Contribuyendo al desarrollo regional y la mejora en sus instalaciones.

El gobierno municipal, quien en su Plan de Desarrollo Municipal (Huetamo, 2021) indica las actividades principales de la región de Huetamo, demostrando así que cuenta con muchos elementos de atracción para la población local o visitantes. Mismas que pueden ser publicadas para promocionar la oferta turística en la región.

Además, se realizó la investigación en informes del INEGI, resaltando datos de relevancia para el turismo, como el empleo y la ocupación de la población.

Es muy marcado el resaltar la importancia de uso de las herramientas para permitir mejoras en la calidad de vida de la población, entre otros impactos que serán abordados en la siguiente sección.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

De acuerdo con lo que expone Calderón (2017), el surgimiento de las plataformas con apoyo hacia las actividades turísticas permiten que la información de los sitios sea mejor conocido por los posibles clientes de acuerdo a los datos que proporciona, como ubicación, el servicio, la calidad, la visualización de las imágenes que se proporcionan; así como los beneficios de las herramientas al ser atendidas por viajeros, familiares o amigos de las personas que viven en la zona, quienes pueden aprovechar su estancia y visitarlos.

Para Flores Gamboa (Gamboa, 2020.) en su publicación Uso de plataformas digitales y aplicaciones en línea para reservar servicios de hospedaje en Mazatlán, México; en un muestreo que se aplicó a 377 turistas en el periodo vacacional de semana santa, indica que el uso de las plataformas desde el 2019 ha ido en aumento, concentrando a través de su estudio los resultados en la siguiente gráfica:

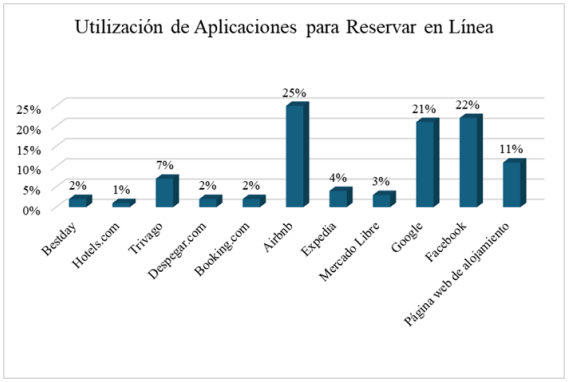


Figura 1. Resultados del estudio sobre aplicaciones para reservar en línea. Fuente: Flores Gamboa (2020).

En los resultados de la gráfica que se muestra en la imagen 1, se resalta que Airbnb ocupa el primer lugar con el 25% como aplicación para reservar en línea, en seguida se encuentra Facebook con un 22%, posteriormente Google con un 21%, notando la diferencia muy marcada con el 11% de quienes tomaron en cuenta la página web del hotel.

Entre otras de las que aparecen son Trivago con 7% y Expedia con 4%, aunque los porcentajes son bajos, si se acumulan los valores de los porcentajes de Bestday, Hotels.com, Trivago, Despegar, Booking, y Expedia, nos encontramos que resulta en un 18%, lo que nos permite identificar incremento del uso de dichas plataformas digitales y el auge que tienen sobre la población para vacacionar o visitar desde el 2019.

Por otra parte, en un informe por parte del gobierno del estado de Michoacán publicado por Social (Social, 2023) se comenta que en año 2022 se observó un incremento en la preferencia por plataformas digitales para la contratación de hospedaje. En ese sentido, un 44% reportó hospedarse en casa familiar; un 40%, en hoteles y un 17% en alojamiento contratado vía plataforma digital. También, se menciona que la captación de ingresos por concepto de turismo en el año 2022 fue un 12 por ciento mayor que en el 2019, al registrar más de 12 mil 665 millones de pesos de acuerdo con ese informe.

Además, se detectó una derrama de 14 mil millones de pesos en el estado. Alrededor de 10 millones de turistas y visitantes llegaron a Michoacán en el 2024. (Primera Plana MX, 2025)

Se considera de gran relevancia en permitir adoptar e implementar a la medida tecnologías como estas, personalizándolas e implementar no solo los servicios que se ofrecen en ciertas regiones como la de tierra caliente de Huetamo en el estado de Michoacán. Sino las zonas de que para los turistas se encuentran disponibles, mejorando la derrama económica para los negocios y la población. Y es que en ocasiones las personas que radican ahí mismo desconocen con lo que cuentan para actividades vacacionales o recreaciones.

De acuerdo con el Plan de Desarrollo Municipal de Huetamo 2021-2024(2021) los principales sectores de productivos giran en torno a agricultura, comercio y servicios, artesanías y minería. Mismos que pueden ser aprovechados para darse a conocer, colocando información relevante y de interés para el público. Beneficiando la actualización de los datos de cada sitio. Ya que desafortunadamente, mucha de la información que se encuentra sobre la región en diversos sitios se encuentra desactualizada y la mayoría de los lugares turísticos no se mencionan.

Si bien Omar Becerra (2023) en su artículo El papel del turismo cultural en el desarrollo social de pueblos originarios de Michoacán: Una exploración de oportunidades y desafíos. Indica la relevancia de proporcionar la cultura de los pueblos en el estado. Destacando los beneficios que se tienen al mostrar la identidad de los pueblos.

Dado el beneficio que se permiten tener a través de las redes sociales, se pueden conocer algunas partes. Pero al mismo tiempo no se concentra el enfoque de lo que se desea transmitir, ya que las perspectivas que se manifiestan pueden ser otras distintas a las que nos ayuden impactando de manera más precisa en las personas para lograr influir en la afluencia de visitantes locales y foráneos.

Incluyendo en los hallazgos, se ha encontrado una página publicada por Realméxico (Realmpexico 2013), donde se aprecian datos que indican el significado de la palabra Huetamo, así como su localización, algunas palabras comunes que se mencionan en el lugar, con información del año 2005, mostrando la siguiente imagen:



Figura 2. Quiosco en el jardín Principal de Huetamo Michoacán. Huetamo (2013)

Como se puede apreciar en la imagen 2, la pérgola del jardín principal se muestra. Sin embargo, se reconoce que en la actualidad ya luce muy distinto. Notando la falta de actualización del sitio.

Además, dentro de la misma página se encuentra también un video, del cual se muestra una captura a continuación:

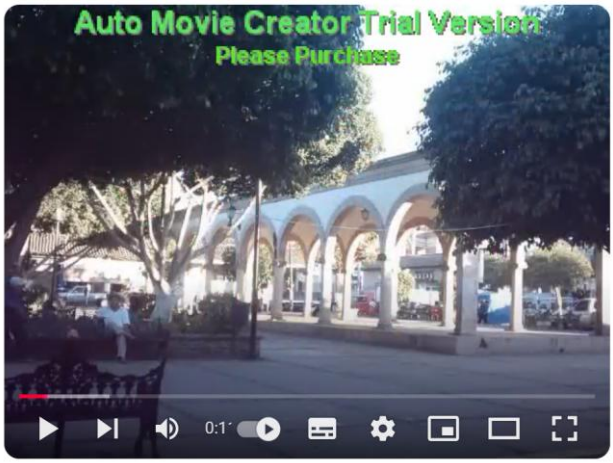


Figura 3. Captura de video mostrando la pérgola de la plaza principal de Huetamo Michoacán. Huetamo (2013)

Como se aprecia en la imagen 3, el jardín principal nuevamente se muestra una pérgola que en la actualidad ha sido sustituida por remodelación. Dejando de lado la constante actualización del contenido.

Es de relevancia mencionar que, analizando la información encontrada, se ha corroborado que no se cuenta con los elementos actualizados y suficientes para dar a conocer las atracciones regionales de Huetamo, limitando hasta el momento la posibilidad de aprovechar dichas herramientas existentes.

De manera puntual se analiza la posibilidad de conjuntar el beneficio de las plataformas mencionadas como Airbnb, Trivago, entre otras; con los diversos lugares o atracciones para locales o visitantes, con el fin de beneficiar al público en

sitios de acceso a los turistas con los que se cuenta. Es decir, permitir que la región de tierra caliente se conozca en un sitio que proporcione los diferentes servicios y productos que oferta para que las personas que accedan a la información estén al tanto de la diversidad de lugares, es decir incluyendo sitios turísticos. Ya que se cuenta con espacios de índole histórico, cultural y social. Capturando el interés de aprovechar su estancia por transeúntes que constantemente se encuentran en la zona o algunos con intereses afines pueden iniciar sus visitas, impactando directamente en la derrama económica que representa.

Cabe aclarar que, la Plataforma web propuesta va a ser totalmente administrable, con el beneficio de permitir las adecuaciones de acuerdo con las novedades o actualizaciones de los establecimientos. Así como la posibilidad de incluir aquellos nuevos negocios que surjan. Es decir no solo hospedaje y renta de servicios, sino también espacios históricos, minería y gastronomía de la region calentana.

4. CONCLUSIONES

Las plataformas digitales para actividades turísticas permiten proporcionar datos de relevancia para los posibles visitantes. Si bien desde el inicio de su implementación se ha notado el uso, así como la cantidad y variedad que existe de ellas. Tomando en cuenta que los viajeros cuenten con datos de relevancia para su travesía y notando que se incluyen solo información para hospedaje, vuelos, renta de algunos bienes, entre otras actividades de asistencia. Dejando de lado el concentrado de sitios turísticos en la zona donde se ofertan.

De acuerdo con los datos recopilados, se hace notar que la región de tierra caliente de Huetamo Michoacán no figura en las plataformas digitales como otros destinos de mayor dimensión. Además de eso, la información que se logró recabar indica que se encuentra sin actualizarse, impidiendo que se conozcan novedades desde hace mucho tiempo. Resaltando también los informes generales en cuanto a turismo de igual manera en la zona calentana.

Se detecta la oportunidad de desarrollar una aplicación hecha a la medida, aprovechando los beneficios de las plataformas digitales para turismo, donde se incluyan elementos de zonas turísticas de la región, servicios y negocios. Enfocándose en proporcionar a los posibles visitantes las distintas opciones que tienen para aprovechar su estancia, resaltando el conocimiento de la cultura, la gastronomía, la artesanía de Huetamo, entre otros elementos que se permitan incluir, enriqueciendo la oferta regional.

Propiciando un impacto económico de manera favorable que beneficie de manera directa e indirecta a los negocios y la población en los siguientes aspectos:

1. Mejoras en la oferta turística.

Desde el momento en el que la ofertan las atracciones, productos o servicios, se estructura y se estandarizan datos para permitir el conocimiento de esta ante el público para los negocios y servicios de la región mediante la plataforma activa, con información actualizada. Proporcionando un concentrado atractivo a cualquier persona que visite el sitio web.

2. Atracción de turistas a la región.

Permitiendo el beneficio de conocer sitios de interés hacia las personas con ciertas aficiones, como por ejemplo la minería o la parte cultural. Propiciando una mejor experiencia a cada uno de los visitantes.

3. Incremento de circulación económica.

Gracias a la afluencia de visitantes, el ingreso económico se va a ver reflejado en los servicios o productos que se adquieren o utilizan por parte de los turistas. Mejorando la situación económica de las familias locales y sus negocios.

4. Incremento en el hospedaje y servicios disponibles.

Favoreciendo la organización de la información sobre los servicios de la región, los visitantes van a ubicar los lugares de acuerdo con sus intereses, pero siempre gracias a la disponibilidad y actualización de datos que van a ubicar en la plataforma web.

5. Mejoramiento de empleo en trabajadores locales.

En beneficio del crecimiento de los visitantes, mayor será la ocupación de personal para atender a los turistas en los negocios o servicios. Logrando que los índices de empleo gracias al turismo se incrementen. Y de igual manera los ingresos familiares sean mejores.

6. Aprovechamiento y difusión de la cultura en la región.

Mediante la organización de la plataforma, se va a permitir que se den a conocer la cultura de la región con los productos y servicios que de manera artesanal se realizan y promueven. Así como la identificación de la identidad de la zona hacia los turistas.

7. Aprovechamiento de programas de apoyo a negocios locales.

Es importante reconocer que existen programas de apoyo a negocios. Con el ingreso de turistas, los negocios van a permitirse realizar mejoras en beneficio del servicio o producto que se oferta. Aprovechando la colaboración entre negocios para establecer estrategias de ganar – ganar.

8. Potenciación de Inversión en infraestructura local.

De acuerdo con el incremento de ingresos hacia la zona calentana gracias al turismo, la mejora en establecimientos se verá reflejada para proporcionar mejores estancias en diversos sitios de la ciudad y sus alrededores.

9. Generación más estructurada de datos estadísticos.

Mediante la conexión de datos que se va a permitir tener en negocios y servicios de la región, se va a propiciar la generación de datos estadísticos actualizados. Conociendo comportamiento de las afluencias a la zona calentana. Mismas que van a servir como referente para mediciones y toma de acciones en determinados planes que se puedan realizar en beneficio de estos.

Algunas de las limitaciones que se detectaron en la investigación fue justamente la falta de información respecto a datos sobre turismo por regiones específicamente, así como la información localizada que está desactualizada y la ausencia de datos que impiden realizar mediciones dentro del municipio de Huetamo. Se recurrió a tomar valores del gobierno del estado, así como algunos sitios que fueron publicados hace más de 10 años. Confirmando la necesidad de herramientas como plataformas digitales para beneficiar de manera notable los indicadores en productos y servicios que se ofertan.

5. RECOMENDACIONES

Para los sitios que promueven lugares turísticos se recomienda establecer elementos que indiquen una ubicación clasificada de los lugares que estarán presentes con su descripción establecida para mejores experiencias en los visitantes de la plataforma. Así como la creación de puntos de referencia en información que permita la recolección de datos puntuales para el establecimiento de estadísticas como cantidad de visitantes por mes, periodos de mayor visita, entre otros que indiquen el aprovechamiento de los recursos a implementar y los comportamientos de afluencia en los sitios locales.

Propiciando que la utilización de la plataforma digital sea una experiencia de apoyo a los comerciantes para mejorar sus ventas y servicios; y por supuesto a los visitantes que tengan la oportunidad de saber y conocer por dicho medio las riquezas sociales y culturales, permitiendo mejorar la derrama económica de la región.

REFERENCIAS

Gamboa, Silvestre Flores, César Miguel Maldonado Alcudia, y Martín León Santiesteban. 2020. Uso de plataformas digitales y aplicaciones en línea para reservar servicios de hospedaje en Mazatlán, México. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información* 8(15):85-95.

Huetamo. 2021. 2. PLAN DE DESARROLLO MUNICIPAL 2021 - 2024. https://www.huetamo.com.mx/Transparencia/Normatividad/NORMATIVIDAD/2.%20PLAN%20DE%20DESARROLLO%20MUNICIPAL%202021%20-%202024.pdf

Primera Plana MX. 2025. Turismo generó derrama de 14 mil millones en 2024 en Michoacán: Monroy. *Primera Plana MX*. https://primeraplana.mx/archivos/1036845

Realmpexico. 2013. Ecoturismo Arte y Cultura en México viaje de aventura, playas, Zonas arqueológicos, parques ecológicos Deporte extremo y más turismo alternativo Realméxico. http://www.realmexico.info/2013/09/huetamo-michoacan.html

Turismo, Secretaría de. 2020. Pueblos Mágicos de México. *gob.mx*. http://www.gob.mx/sectur/articulos/pueblos-magicos-206528

Analyzing Burnout in Higher Education: A Case Study by Academic Discipline Using Generative AI Techniques.

Ruiz Jurado, Aldo Carlos*, Romero Flores, Edna Araceli*, Elizabeth Eugenia Díaz Castellanos*, Ruiz Ochoa, Arturo*, Aguire y Hernández, Fernando*, Omar Juarez, Rivera, Ruiz Jurado, Arturo*****

* *Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9, Emiliano Zapata,* 94320. Ver., México.
(e-mail: m01010562@orizaba.tecnm.mx, edna.rf, elizabeth.dc@orizaba.tecnm.mx, arturo.ro@orizaba.tecnm.mx, fernando.ay@orizaba.tecnm.mx).

** Universidad Veracruzana, Carretera Estatal Sumidero-Dos Ríos Km.1, Ixtaczoquitlán C.P. 94450, Ver., México.

(e-mail: ojuarez@uv.mx)

*** Instituto Mexicano del Seguro Social, Clínica 1. Av. Oriente 3 # 784, Orizaba C.P. 94300, Ver., México.

(e-mail: arturo.ruizj@imss.gob.mx)

Abstract: University burnout syndrome affects students' academic performance and mental health. This study examines its relationship with the field of study using the Maslach Burnout Inventory – General Survey for Students (MBI-GSS) and advanced statistical analysis techniques. To collect, process, and analyze data, the ANALITIQ SURVEYS platform was specifically developed for this study. This system automates survey data collection, performs data cleaning and preprocessing, generates descriptive and inferential statistics, and interprets results using generative artificial intelligence. Statistical tests such as ANOVA were applied to identify significant differences among disciplines. Findings reveal that Medicine students exhibit the highest levels of emotional exhaustion but maintain a healthier level of professional efficacy compared to Engineering and Business Administration students, who show a greater impact in this dimension. AI-driven analysis enabled the identification of key patterns and the generation of personalized recommendations, facilitating preventive and intervention strategies in educational institutions.

Keywords: University burnout, generative artificial intelligence, statistical analysis, Maslach Burnout Inventory – General Survey for Students, higher education.

1. INTRODUCCIÓN

El síndrome de burnout, tradicionalmente vinculado al ámbito laboral, ha cobrado creciente relevancia en el entorno universitario por su impacto negativo en el bienestar emocional y el rendimiento académico (Chen, 2025). Este fenómeno, caracterizado por agotamiento emocional, cinismo y baja eficacia personal, puede derivar en deserción escolar y deterioro de la salud mental (Gómez, Vivas & Cervantes, 2024). Estudios previos han evidenciado que el área de estudio es un factor clave en la manifestación del burnout, siendo más prevalente en carreras con alta carga académica y emocional, como Medicina (Rosales Ricardo & Rosales Paneque, 2013).

En este contexto, el presente estudio utiliza el Maslach Burnout Inventory - General Survey for Students (MBI-GSS) para evaluar el burnout en estudiantes de Administración, Ingeniería Industrial, Ingeniería en Gestión Empresarial y Medicina. A través de la plataforma AnalytIQ Surveys (figura 1) la cual fue diseñada para este propósito, se automatizó la captura de encuestas, el procesamiento estadístico y la interpretación de resultados mediante inteligencia artificial generativa, con el fin de identificar patrones significativos y generar recomendaciones personalizadas para la prevención del burnout (Tropiano & Noguera, 2024).



Fig 1. Interfaz Gráfica de Usuario plataforma AnalytIQ Surveys.

2. METODOLOGÍA

Para medir los niveles de burnout en estudiantes universitarios, se utilizó el Maslach Burnout Inventory – General Survey for Students (MBI-GSS), instrumento validado (Xxi *et al.*, 2012) que evalúa tres dimensiones en la población estudiantil: agotamiento emocional (EE), cinismo (CY) y eficacia académica (AE) como se oberva en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Subescalas MBI-GSS.

Subescala	Ítems	# ítems	Puntaje por ítem	Puntos por subescala	Indicios de Burnout
Agotamiento emocional	1, 4, 7, 10, 13	5	De 0 a 6	De 0 a 30	Más de 14
Cinismo	2, 5, 11, 14	4	De 0 a 6	De 0 a 24	Más de 9
Eficacia académica	3, 6, 8, 9, 12, 15	6	De 0 a 6	De 0 a 36	Menos de 23

Cada subescala consta de ítems puntuados de 0 a 6 en escala tipo Likert, lo que permite clasificar a los estudiantes según el grado de burnout. A continuación, se muestran los enunciados exactos utilizados en el instrumento aplicado **(Tabla 2)**, los cuales exploran emociones, actitudes y percepciones asociadas a la vida académica.

Tabla 2. Ítems Instrumento MBI-GSS.

Ítem 1	Las actividades académicas me tienen emocionalmente agotado.	Ítem 2	He perdido interés en mis estudios dede que empecé la universidad.
Ítem 3	Puedo resolver de manera eficaz los problemas relacionados con mis estudios.	Ítem 4	Me encuentro agotado físicamente al final de un día en la universidad.
Ítem 5	He perdido entusiasmo por los estudios.	Ítem 6	Creo que contribuyo efectivamente con las clases a las que asisto.
Ítem 7	Estoy exhausto de tanto estudiar.	Ítem 8	En mi opinión, soy buen estudiante.
Ítem 9	He aprendido muchas cosas interesantes durante mis estudios en la universidad.	Ítem 10	Me siento cansado en la mañana cuando me levanto y tengo que afrontar otro día en la universidad.
Ítem 11	Me he distanciado de mis estudios porque pienso qe no son realmente útiles.	Ítem 12	Me estimula conseguir objetivos en mis estudios.
Ítem 13	Estudiar o ir a clases todo el día es muy estresante para mi.	Ítem 14	Dudo de la Importancia y el valor de mis estudios.
Ítem 15	Durante las clases tengo la seguridad de que soy eficaz haciendo las cosas.		

Los puntajes obtenidos fueron interpretados según niveles predefinidos (muy bajo, bajo, medio, alto, etc.) para identificar el riesgo en cada dimensión (Moreno Jimenez & Rodriguez-Carvajal, 2001). La herramienta AnalytIQ Surveys automatizó la captura de encuestas, la validación de datos y la aplicación de filtros estadísticos como el IQR para detectar valores atípicos (Bobbit, 2020), garantizando la calidad del análisis.

La muestra fue conformada por 224 estudiantes pertenecientes a las carreras de Medicina, Administración, Ingeniería Industrial e Ingeniería en Gestión Empresarial, seleccionados por conveniencia con autorización de docentes siguiendo un muestreo no probabilístico (Hernández Sampieri, Hernández Collado & Pilar Bautista, 2014).

→ Medicina (n = 8)
→ Administración (n = 33)
→ Ingeniería en Gestión Empresarial (42)
→ Ingeniería Industrial (n = 140)

Los participantes fueron seleccionados en función de la disponibilidad de sus grupos. Se incluyeron únicamente estudiantes que cumplieran con los siguientes criterios:

- Ser estudiante universitario activo en alguna de las cuatro disciplinas.
- Tener al menos un semestre cursado en la universidad.
- Aceptar participar en el estudio mediante consentimiento informado.

El proceso inició con la firma de consentimiento informado digital, validado éticamente bajo los principios de investigación en seres humanos (Armando Ortiz & Patricio Burdiles, 2010), seguido de la aplicación del cuestionario vía código QR. El sistema registró un tiempo promedio de respuesta de 298 segundos, asegurando comprensión adecuada de los ítems. Posteriormente, se evaluó la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene (Bisquerra Alzina, 1987), los resultados mostrados en la **Tabla 3** permitieron definir el uso de ANOVA de Welch o tradicional según correspondiera a cada dimensión.

Tabla 3. Resultados prueba de Levene.

Dimensión	Stat	p-value	Interpretación
Agotamiento Emocional	4.8227	0.0024	Varianzas heterogéneas (usar ANOVA de Welch)
Cinismo	1.7495	0.1553	Varianzas homogéneas (cumple ANOVA)
Eficacia Académica	0.4342	0.7286	Varianzas homogéneas (cumple ANOVA)

Finalmente, se aplicaron pruebas de ANOVA para comparar los niveles de burnout entre disciplinas, complementadas por medidas descriptivas y verificación de resultados en Minitab. La plataforma también integró inteligencia artificial generativa

para interpretar los datos, utilizando una API basada en JSON que detectó patrones relevantes y formuló recomendaciones automatizadas. Esta combinación de estadística tradicional y tecnologías emergentes permitió analizar el fenómeno de burnout desde una perspectiva más profunda, robusta y eficiente.

Complementariamente, se integró inteligencia artificial generativa mediante la API de OpenAI Chat GPT modelo 4 turbo. Esta herramienta fue utilizada en la etapa de interpretación de resultados para detectar patrones complejos entre variables académicas y sociodemográficas. Se desarrolló un sistema de ingeniería de prompt, en el cual se le dio acceso a la IA a los resultados estadísticos obtenidos tanto en formato tabular como en imágenes gráficas a través de un backend programado en Python, empleando librerías especializadas como Pandas, NumPy, SciPy y Matplotlib. El llamado al script en Python fue gestionado mediante archivos intermedios desde un entorno en PHP, lo cual permitió la automatización del flujo de datos desde la plataforma web hacia el motor de análisis como se muestra en la **Figura 2**. La interacción con la IA se diseñó en ciclos iterativos utilizando la metodología de las 4P's del prompt (Propósito, Precisión, Personalización y Parámetros), con el fin de optimizar la claridad, profundidad y utilidad de las recomendaciones generadas.

```php
<?php
$graficas_dir = "graficas/tstudent";
$csv_resultado = "$graficas_dir/tstudent.csv";
$imagen_grafica = "$graficas_dir/tstudent.png";
$api_key = "**********************************************";
$chatgpt_response = "";

// Variables sociodemográficas disponibles
$variables_categoricas = ["Sexo", "Trabajo"];
$selected_variable = $_POST['variable'] ?? "Sexo";

// Ejecutar el script de Python cuando se presione el botón
if (isset($_POST['calcular_tstudent'])) {
    exec("python3 tstudent.py " . escapeshellarg($selected_variable));
}

// Leer el CSV con los resultados de la prueba t
$tabla_tstudent = [];
if (file_exists($csv_resultado)) {
    $file = fopen($csv_resultado, "r");
    while (($data = fgetcsv($file, 1000, ",")) !== FALSE) {
        $tabla_tstudent[] = $data;
    }
    fclose($file);
}

// Si se presiona el botón de análisis con ChatGPT
if (isset($_POST['analizar_ia'])) {
    $csv_content = file_get_contents($csv_resultado);

    $prompt = "Eres un analista de datos experto en estadística aplicada a la salud mental en grupos estudiantiles de diversas áreas.
Se ha realizado una prueba t de Student para comparar los valores de burnout en función de la variable ".$selected_variable.".
Los datos analizados provienen de un cuestionario basado en el Maslach Burnout Inventory (MBI-GS) aplicado a estudiantes.

El siguiente CSV contiene los resultados de la prueba t:

$csv_content
```

Fig. 2. Algoritmo de Prompt para análisis de estadística mediante IA Generativa.

A partir del análisis de medias, ANOVA, correlaciones y visualizaciones, la IA formuló recomendaciones automatizadas orientadas a la prevención y mitigación del burnout, personalizadas por área académica, género y semestre. Esta integración no solo agilizó el análisis, sino que fortaleció la dimensión interpretativa del estudio, convirtiéndose en una herramienta estratégica para la toma de decisiones basadas en evidencia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del estudio mostrados en la **Figura 3**, revelan diferencias significativas en las tres dimensiones del síndrome de burnout (agotamiento emocional, cinismo y eficacia académica) según la carrera, el semestre y el género de los estudiantes. Los alumnos de Medicina presentaron los niveles más altos de agotamiento emocional, seguidos por los de Ingeniería Industrial, Administración y Gestión Empresarial.



Fig 3. Resultados globales Escalas MBI-GSS.

El análisis de varianza (ANOVA de Welch) confirmó que la carrera y el semestre influyen significativamente en esta dimensión **(Figura 4)**, siendo más pronunciado el desgaste en semestres avanzados. En cuanto al cinismo, los hombres reportaron mayores niveles de desapego académico y pérdida de entusiasmo, con diferencias notables también entre carreras, destacando Medicina y Administración con las puntuaciones más elevadas. Además, se identificó que el cinismo tiende a aumentar a medida que los estudiantes progresan en su formación, lo que sugiere una pérdida progresiva de motivación.

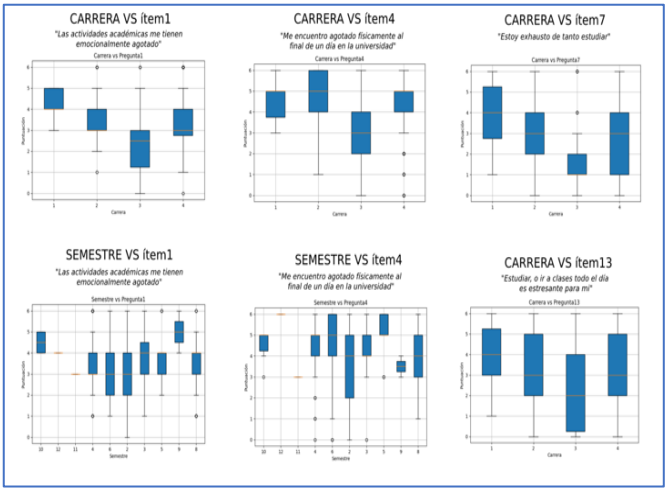


Fig 4. Boxplots ANOVA Carrera/Semestre vs Ítems instrumento.

Respecto a la eficacia académica, aunque las diferencias entre disciplinas fueron menos marcadas, se observó que los estudiantes de Medicina y Administración perciben mayor autoeficacia, mientras que los de Gestión Empresarial reportaron la más baja. También se detectaron diferencias por promedio y género, siendo las mujeres quienes mostraron una mayor motivación para alcanzar sus objetivos académicos. El coeficiente de correlación de Pearson mostrado en la **Figura 5** indicó una relación negativa débil entre la carrera y la percepción de autoeficacia, lo que sugiere que los estudiantes de carreras más exigentes tienden a sentirse más seguros en su rendimiento. En contraste, los estudiantes de carreras con

menor carga emocional podrían experimentar una menor confianza en sus habilidades.

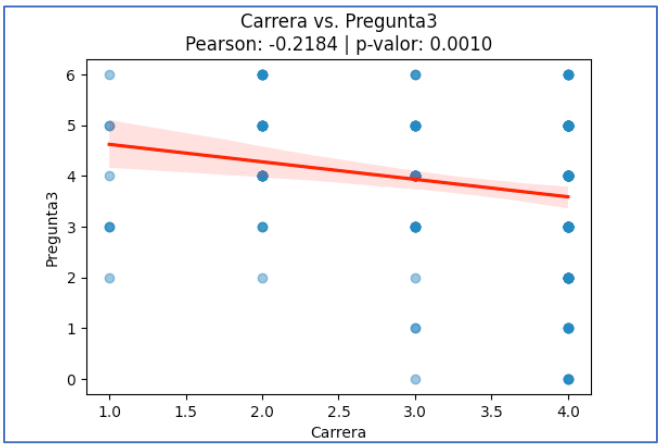


Fig 5. Gráfica correlación Pearson Carrera vs ítem 3.

Además, el análisis de correlación de Pearson mostró que el agotamiento emocional se incrementa conforme los estudiantes avanzan en su trayectoria académica (**Tabla 4**). Las correlaciones significativas entre el semestre y varios ítems del MBI-GSS (como agotamiento físico, emocional y estrés diario) refuerzan esta tendencia. Estos hallazgos evidencian la necesidad de estrategias de prevención específicas según la disciplina, el avance académico y el género, para mitigar el impacto del burnout y promover el bienestar estudiantil en contextos universitarios.

Tabla 4. Correlación de Pearson por Semestre.

Ítem	Texto del Ítem	Subescala	Coef. de Pearson	P-Value
1	Las actividades académicas me tienen emocionalmente agotado.	Agotamiento Emocional	0.172	0.0099
4	Me encuentro agotado físicamente al final de un día en la universidad.	Agotamiento Emocional	0.1715	0.0101
7	Estoy exhausto de tanto estudiar.	Agotamiento Emocional	0.1814	0.0065
13	Estudiar o ir a clases todo el día es muy estresante para mí.	Agotamiento Emocional	0.1692	0.0112

4. CONCLUSIONES

El presente estudio analizó la relación entre el burnout universitario y diversas variables académicas y sociodemográficas. Se identificaron diferencias significativas en las dimensiones de agotamiento emocional, cinismo y eficacia académica, evaluadas mediante el MBI-GSS. Los estudiantes de Medicina mostraron mayores niveles de agotamiento emocional, mientras que los de Administración destacaron por su cinismo académico, y los de Gestión reportaron menor percepción de autoeficacia. Además, se evidenció que el avance en el semestre académico está asociado con un aumento en el agotamiento y el cinismo, aunque no necesariamente con una menor percepción de eficacia, lo que sugiere que el desgaste emocional se intensifica conforme avanza la carrera universitaria.

El promedio académico mostró una correlación positiva con la autoeficacia, pero no se asoció con menores niveles de agotamiento o cinismo, indicando que un buen rendimiento no necesariamente protege contra el burnout. Por otro lado, se encontraron diferencias de género, siendo las mujeres quienes reportaron mayor motivación académica, mientras que los hombres evidenciaron una mayor desconexión emocional. Estos hallazgos destacan la necesidad de diseñar estrategias diferenciadas de intervención y acompañamiento que consideren tanto la disciplina académica como el género y el avance escolar.

Finalmente, la integración de la plataforma digital AnalytIQ Surveys y el uso de inteligencia artificial generativa permitieron automatizar la captura y análisis de datos, así como la generación de recomendaciones adaptadas. Esta tecnología no solo optimiza la interpretación estadística, sino que también representa un recurso innovador para el diseño de políticas de prevención y bienestar en contextos universitarios. En conjunto, los resultados refuerzan la urgencia de implementar acciones específicas y tecnológicamente asistidas para mitigar el burnout en la población estudiantil.

REFERENCIAS

Armando Ortiz, P. and Patricio Burdiles, P. (2010) 'Consentimiento informado', *Revista Médica Clínica Las Condes*, 21(4), pp. 644–652. Available at: https://doi.org/10.1016/S0716-8640(10)70582-4

Bisquerra Alzina, R. (1987) 'La prueba de Levene para la homogeneidad de varianzas en el BMDP', *Revista de investigación educativa, RIE, ISSN-e 1989-9106, ISSN 0212-4068, Vol. 5, No 9, 1987, págs. 79-85*, 5(9), pp. 79–85. Available at: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=91367&info=resumen&idioma=ENG (Accessed: 25 February 2025).

Bobbit, Z. (2020) *How to Calculate The Interquartile Range in Python*. Available at: https://www.statology.org/interquartile-range-python/ (Accessed: 25 February 2025).

Chen, J. and Chen, G. (2025) 'Academic burnout among Chinese college students: A study based on FSQCA method', *Acta Psychologica*, 253, p. 104701. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2025.104701

Gómez, O.S.M., Vivas, M.Á.L. and Cervantes, N.G. (2024) 'Prevalencia de burnout y factores asociados en personal de salud durante la pandemia COVID-19', *Medicina e Investigación Universidad Autónoma del Estado de México*, 12(2), pp. 61–66. Available at: https://doi.org/10.36677/MEDICINAINVESTIGACION.V12I2.22953

Hernández Sampieri, R., Hernández Collado, C. and Pilar Bautista, L. (2014) *Metodologia de la Investigacion Hernandez Sampieri 6a Edicion | Enhanced Reader*.

Moreno Jimenez, B. and Rodriguez-Carvajal, R. (2001) *La Evaluación del Burnout profesional. Factorialización del MBI-GS. Un análisis preliminar*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/230596331_La_Evaluacion_del_Burnout_profesional_Factorializacion_del_MBI-GS_Un_analisis_preliminar (Accessed: 25 February 2025).

Rosales Ricardo, Y. and Rosales Paneque, F.R. (2013) 'Burnout estudiantil universitario: Conceptualización y estudio', *Salud mental*, 36(4), pp. 337–345. Available at: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33252013000400009&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Tropiano, Y. and Noguera, A. (2024) 'La inteligencia artificial en la prevención de la seguridad y salud laboral en América', *Revista Internacional y Comparada de Relaciones Laborales y Derecho del Empleo, ISSN-e 2282-2313, Vol. 12, No. 1, 2024*, 12(1), p. 8. Available at: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9416338&info=resumen&idioma=ENG

Xxi, V. *et al.* (2012) 'Estructura Factorial y Confiabilidad del Inventario de Burnout de Maslach en Universitarios Chilenos'. Available at: https://www.redalyc.org/pdf/2819/281929021006.pdf

Development of an Educational Robot for Teaching Basic Mathematics

Quero Alavez, Alan Artemio * **Bravo Ortiz, Alberto** *
Aguilar León, Cristian Jair *
Navarro Martínez, Fernando Abel **
Lugo González, Esther ***

* *Ingeniería en Mecatrónica,Universidad Tecnológica de la Mixteca.Huajuapan de León, Oaxaca, México. (e-mail: aulc020923, baoa020605, quaa000721@gs.utm.mx).*
** *División de Estudios de Posgrado. Universidad Tecnológica de la Mixteca.Huajuapan de León, Oaxaca, México. (e-mail: fernando305.fm@gs.utm.mx).*
*** *Instituto de Electrónica y Mecatrónica, Universidad Tecnológica de la Mixteca.Huajuapan de León, Oaxaca, México. (e-mail: elugog@mixteco.utm.mx).*

Abstract: As technology is currently a complementary tool in education, a prototype of a teaching robot is presented, designed to demonstrate basic mathematical exercises, as well as the use of the English language to learn common words. It has been designed as a pet, looking like a dog, to inspire confidence and appeal to children. It communicates through a screen that acts as a medium to interact with users and uses a camera to capture images needed for English language practice. The base is designed to be a mobile vehicle and has sensors to avoid collisions with obstacles. The prototype was developed using the VD12206 mechatronic design methodology, so it has a mechanical system, a control system, electronics and an interface. The design requirements were obtained through interviews and research based on educational robotics for primary school children. The mechanical system is built using 3D printing to give the pet robot its shape and make it easy to manipulate. The electronic system was created using an ESP32 card for physical projects and an Arduino card for the virtual project due to the compatibility of the components. The control was done using the Sliding Modes technique because it is a non-linear system. The animations were done in PixelArt style. The prototype includes functions with the clustering technique based on centroids to analyze the data. To verify the calculations and simulations, a virtual and a physical prototype were made. The latter was used by children who found it intuitive and easy to use.

Keywords: Educational robotics, mechatronics design, virtual prototype, physical prototype.

1. INTRODUCCIÓN

La robótica educativa es una disciplina pedagógica que utiliza robots y actividades para promover el aprendizaje y el desarrollo de habilidades en los estudiantes. Su objetivo principal es educar de manera interactiva y atractiva, utilizando robots como herramientas para enseñar conceptos de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM por sus siglas en ingles), así como habilidades transversales como el pensamiento crítico, la resolución de problemas, la creatividad y la colaboración,(Ramírez (2023)). Derivado de esto, en Europa surgió el proyecto INBOTS (Inclusive Robotics for a Better Society), que considera la robótica educativa como una herramienta para aprender dentro de un salón de clases y beneficiar a todos los niños, independientemente de su futura orientación educativa o profesional, (Alimisis (2021)).

Algunos de los fabricantes y distribuidores más importantes de robots educativos son Parallax ®, MakeBlock®, Fischertechnik ®, BQ ®, Clementoni ®, Fische Price ® y Lego Robotix ®. Todas estas empresas tienen en común que ofrecen soluciones consolidadas en el sector educativo. En cuanto al *software*, existen distribuidores de gran prestigio, entre los que se destacan por sus características a Arduino ®, Scratch 3.0 ®, Picaxe ® o Phyton ®, este último, también se utiliza en el procesamiento de datos por medio de la Inteligencia Artificial (Raquel y Dani (2025)).

Alsina y Inchaustegui (2018) han realizado un estudio enfocado en el uso de robots programables por niños de tres a cuatro años y proponen cinco recomendaciones en el contexto de la educación STEAM para incrementar el impacto de estas herramientas: presentar fenómenos relevantes, estimular el razonamiento, fomentar la interacción, integrar una visión multidimensional de los problemas y utilizar la representación visual y física.

Rosero-Yugsi y Yanangómez-Yaguachi (2009), desarrollaron un robot mascota en forma de gato, diseñado para interactuar con niños mayores de tres años y personas en

general, con el objetivo de estimular habilidades cognitivas como la inteligencia visual, sensorial, interpersonal y auditiva mediante el entretenimiento. Presentan los fundamentos teóricos de la robótica, el microcontrolador y los sensores empleados, así como los sistemas de adquisición de datos y actuadores que permiten al robot detectar estímulos externos y responder de forma autónoma.

Carrasco-Martínez et al. (2024), proponen un sistema inspirado en el juego Tamagotchi y la Logoterapia, creando un robot que funciona como un avatar que el usuario debe cuidar. El modelo simula aspectos de alimentación, hidratación, higiene, afecto, entretenimiento, energía, interacción social y salud del robot, promoviendo una evolución temporal similar a la humana para que su comportamiento resulte familiar y natural para el usuario. Se incorporan estrategias psicológicas y de enganche mediante acciones frecuentes para fomentar la interacción. Los resultados muestran como el usuario debe atender al robot para mantener su bienestar, reforzando el vínculo y el uso constante del sistema.

Colom-Rodríguez (2023) desarrolla el robot cuadrúpedo Bittle de Petoi, utilizando una Raspberry Pi y un algoritmo de control en Python, para que el robot se dirija automáticamente hacia una pelota basándose solo en la información de una cámara. Utiliza el aprendizaje automático, con un enfoque en redes neuronales artificiales aplicadas a la visión por computadora.

Por otro lado, según González-Gómez et al. (2012) y Alimisis (2020) el paradigma del movimiento "hacer", menciona que no se debe limitar a los estudiantes a trabajar con robots prefabricados, sino que se les debe apoyar para que construyan sus propios robots utilizando materiales y herramientas de bajo coste, con mecánica y electrónica de código abierto, módulos impresos en 3D y entornos de programación visuales basados en bloques. Con esto se extiende el constructivismo de Papert a un nuevo "construccionismo", en el cual el aprendizaje es mejor cuando el estudiante construye los objetos de conocimiento significativos (González-Fernández (2021)).

Con base en lo anterior, se muestra que la robótica educativa es necesaria y sirve como apoyo en la docencia siempre y cuando se tengan objetivos para su uso en el nivel educativo adecuado. En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo robótico educativo con el propósito de apoyar el aprendizaje de quien lo construye y de quien lo utiliza. El diseño inicia con la obtención de requerimientos para el aprendizaje de nivel básico y posteriormente se realiza el diseño mecatrónico y consrucción del prototipo, finalizando con algunas pruebas realizadas por infantes de nivel educativo básico.

2. METODOLOGÍA

En la investigación de Riveiro-Recio (2023), para utilizar un robot educativo adecuadamente en nivel básico, se deben cumplir objetivos como comparar diferentes procedimientos que resuelven las mismas tareas y determinar cual es el más apropiado, crear programas que usen varia-bles para almacenar y modificar datos o describir las elecciones tomadas durante el desarrollo de un programa. Tomando como referencia estos para plantear los requerimientos, se desarrolla el prototipo de robot educativo.

2.1 Diseño mecatrónico

A través de investigación documental, entrevistas y trabajo de campo, incluyendo el uso de la herramienta del QFD, se consideraron además de los objetivos propuestos por Riveiro-Recio (2023), también el que sea ligero para ser fácil de transportar, que sea resistente, programar las actividades de forma sencilla, mantenimiento por el usuario y que la alimentación eléctrica sea por un conector estándar como el USB. Todos estos requerimientos se plantean para que los prototipos realizados por los estudiantes de nivel superior sean utilizados como apoyo en el aprendizaje de estudiantes de nivel básico.

Para el desarrollo se utiliza la secuencia de actividades utilizadas en mecatrónica presentadas en Lugo-González et al. (2020) y la metodología VDI-2206 de Gausemeier y Moehringer (2003), iniciando por identificar el problema, generar conceptos, hacer un diseño preliminar, posteriormente crear y simular un prototipo virtual, determinar los componentes, realizar la construcción del prototipo, programar el sistema de control, la interfaz, evaluar y finalmente validar la funcionalidad del sistema.

2.2 Prototipo virtual

El diseño final es simple, mecánicamente consta de siete piezas generales, esto con el objetivo de reparar fácilmente las piezas en caso de llegar a dañarse, además de tener un mantenimiento sencillo. El prototipo generado se muestra en la Figura 1.

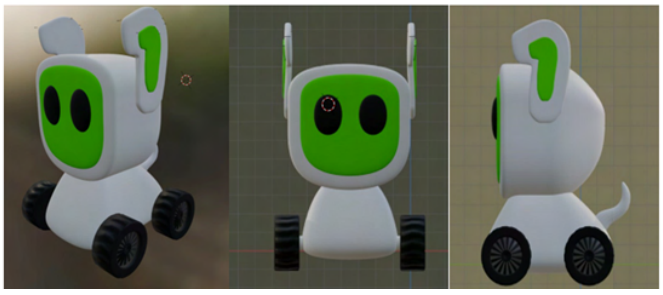


Fig. 1. Modelo del prototipo

Para la versión virtual, se utilizan diversos *software*: para la animación se utiliza *Pixel art Online*®, para las pruebas de control, Matlab®; para el desarrollo de la interfaz, *QT Designer*® y el entorno de programación, *Anaconda software*®. Con este se verifican las características físicas necesarias para resistir movimientos bruscos, caídas o alguna acción que pueda dañarlo, además del comportamiento de la interfaz y la respuesta en general del sistema al estar en funcionamiento.

La primer simulación que se hace es del sistema mecánico, y para ello se propone un peso total de $1.5kg$ considerando una caída desde una altura de $50cm$. Para determinar el daño estructural se considera una fuerza promedio de caída F, que se calcula con Ec. 1

$$F = \frac{mv}{t} \quad (1)$$

donde m es el peso total del prototipo, v la velocidad en caída libre y t es el tiempo en que realiza la caída. Asumiendo una velocidad de caída libre de acuerdo con Ec. 2:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

donde g es la constante de gravitación universal y h la altura máxima a la que puede caer el prototipo, los resultados son:

$$v = \sqrt{2(9.81m/s^2)(0.5m)} = 3.13m/s$$

Debido a que el tiempo promedio en que se cae un objeto sucede en una fracción de segundo, el tiempo propuesto para esta asunción es de $0.1s$, por lo tanto, reemplazando términos:

$$F = \frac{(1.5kg)(3.13\frac{m}{s})}{0.1s} = 46.95N$$

Para las pruebas mecánicas se aplican fuerzas de 47 N en las esquinas del prototipo, que usualmente son las áreas propensas a recibir impactos. En la Figura 2 se observa la simulación de deformación total del material bajo carga aplicada directamente a la pieza de la carcasa, en donde se analizan los factores de seguridad para evitar fracturas en el material que en este caso es PLA. Como se observa la deformación del material es de $(1.623e^{-4})$, lo que es aceptable para no generar un daño carcasa.

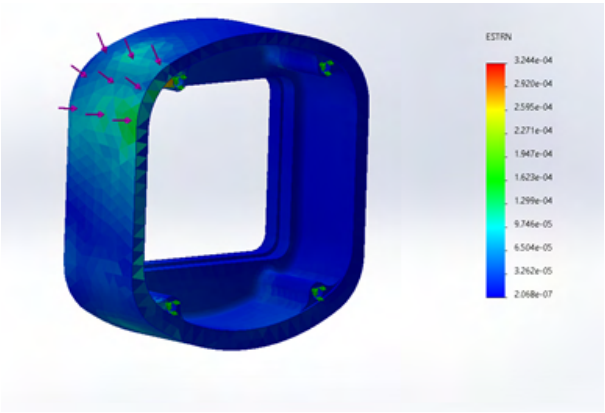


Fig. 2. Análisis de esfuerzo-deformación en la carcasa

Para este caso, el sistema de control y la electrónica se basan en una tarjeta de desarrollo (ESP32) que conecta y gestiona los motores, sensores y otros componentes esenciales del robot. Esta tarjeta es el centro de control, permitiendo interpretar las señales de entrada provenientes de los sensores y ejecutar las órdenes necesarias para el movimiento y las acciones del robot. La ESP32 procesa las señales y coordinar los algoritmos de control, mientras que los *drivers* (puente H TB6612FNG) aseguran el suministro de energía a los motores, permitiendo los cambios de dirección. Estas conexiones se pueden visualizar en la Figura 3.

La tarjeta ESP32 recibe la señal de una Rasberry pi 4. El modelo utilizado es una Rasberry pi 4 B de 4 GB de RAM a la cual se instalo el sistema operativo Rasberry OS de 64

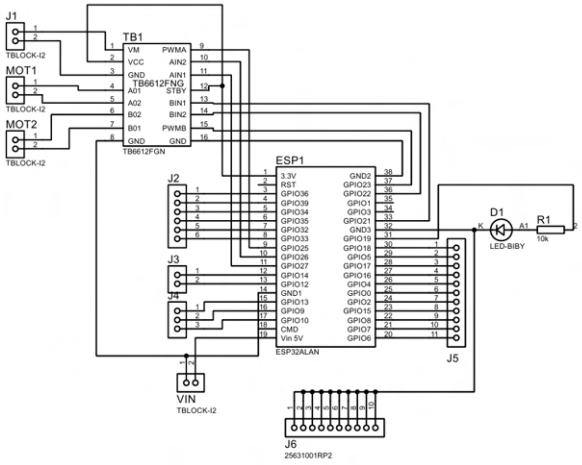


Fig. 3. Diagrama esquemático de conexiones electrónicas

bits, mientras que el almacenamiento fue con una tarjeta SD de 32 GB. La señal enviada por la Rasberry indica el cambio de dirección, al igual que especifica la velocidad de movimiento en el prototipo. La velocidad es regulada por el sistema de control, y procesada por la ESP32. Para el control, el lazo se cierra con la retroalimentación del *encoder* que contiene el motor.Con el diagrama de la Figura 3, elaborado en el *software* Proteus®, se desarrolla el modelo 3D de la placa PCB. En la Figura 4 se observa el modelo 3D como una representación aproximada del sistema físico.

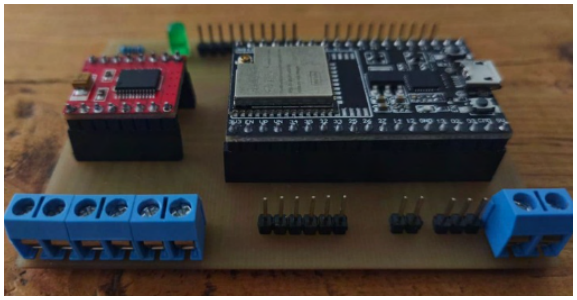


Fig. 4. Modelo del circuito electrónico

La simulación se realiza con la tarjeta de desarrollo Arduino debido a que en Proteus® no es posible conectar la consola virtual a la tarjeta ESP32. De igual forma se utilizan dos motores que ya tienen el *encoder* incluido, tal como se muestra en el diagrama de conexiones de la Figura 5.

En la simulación se utiliza el *driver* puente H L298N, sin embargo, en la práctica se usa el puente H Tb6612fng, por ser una versión compacta del L298N.

Por otro lado, el control que rige el comportamiento del dispositivo es el de modos deslizantes, que es una técnica robusta ampliamente utilizada para sistemas no lineales e inciertos. Esta se basa en forzar al sistema a revolucionar sobre una superficie de deslizamiento previamente diseñada, garantizando así, un comportamiento deseado independiente de ciertas perturbaciones o incertidumbres. El modelo dinámico de segundo orden que describe la posición y velocidad del motor de CD se expresa como la Ec.3:

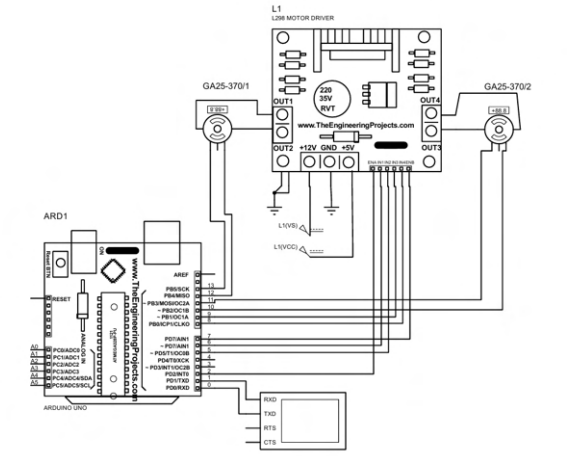


Fig. 5. Diagrama de conexiones para el *driver* L298N

$$\begin{aligned} \dot{x_1} &= -\frac{R}{L}x_1 - \frac{k_e}{L}x_2 + V \\ \dot{x_2} &= \frac{k_t}{J}x_1 - \frac{B}{J}x_2 \end{aligned} \tag{3}$$

x_1 es la corriente que atraviesa la armadura, x_2 es la velocidad del eje del motor, k_e, k_t, B (fricción) y J (momento de inercia) son constantes mecánicas del motor y R (resistencia de armadura) y L(inductancia de armadura) son las constantes elétricas. donde el controlador por modos deslizantes queda de la siguiente forma (Ec.4):

$$u = Cx_2 + ksign(\Delta) \tag{4}$$

Las ecuaciones del modelo dinámico de los motores y el control por modos deslizantes se resolvieron con el *software* MATLAB-Simulink® obteniendo el sistema como se muestra en la Figura 6.

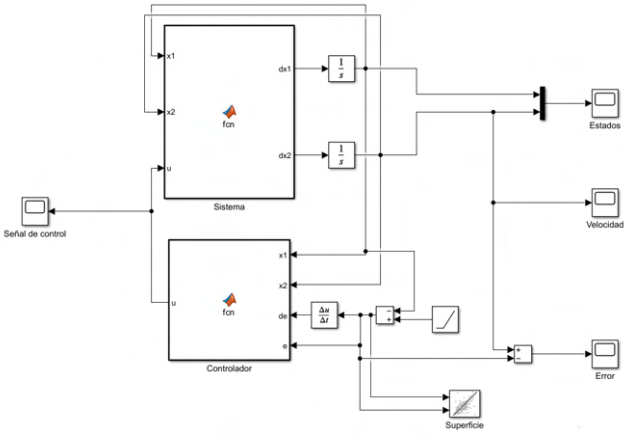


Fig. 6. Diagrama de bloques de control

Para la interfaz se utilizan animaciones hechas con el estilo PixelArt® que se hacen *frame* por *frame* para ejecutarse durante el modo de espera del dispositivo. Esta animación tiene la forma de la cara de un perro y se puede observar en la Figura 7. El código implementado está documentado y s ele puede dar un seguimiento haciéndolo de fácil entendimiento.

El robot tiene programado un modelo de *clustering* basado en centroides, donde se analizan datos bidimensionales y se



Fig. 7. Animación del modo de espera

obtiene el punto medio entre estos, regulando la dificultad de los problemas seleccionados.

La interfaz para ejecución se observa en la Figura 8. Al activar el prototipo se accede a la pantalla principal y una vez que se toque esta, aparecen dos botones en la parte central de la pantalla y uno en la esquina inferior derecha. La función del botón "X" es para cerrar el programa regresando a las animaciones del rostro. La función del botón "Estadísticas" lleva a una nueva ventana que muestra los resultados obtenidos de los estudiantes durante la última semana, datos que son previamente clasificados por un algoritmo de clustering para determinar si el alumno ha tenido un buen desempeño.



Fig. 8. Interfaz de usuario principal

Al pulsar el botón inicio, aparecen dos botones, donde el funcionamiento de cada permite seleccionar algún área, en este caso matemáticas e inglés. Para matemáticas se generan diez problemas aleatorios y para inglés se tiene una base datos de ciertas frutas con su respectivo nombre.

En la Figura 9 se muestra la interfaz de un ejercicio de matemáticas con tres posibles soluciones, al elegir una, se presiona el botón de siguiente para avanzar a otro ejercicio. Mientras se encuentre en la misma pantalla del ejercicio, es posible cambiar la respuesta, sin embargo, una vez que se presione el botón "Siguiente", no se puede regresar al ejercicio anterior.

Una vez realizados los diez ejercicios se muestra un resultado con la cantidad de aciertos obtenidos por el usuario junto con un mensaje que varía con base en el número de respuestas correctas, como se observa en la Figura 10. También se tiene la opción de volver a hacer la ronda de ejercicios para mejorar la nota o regresar al menú principal.

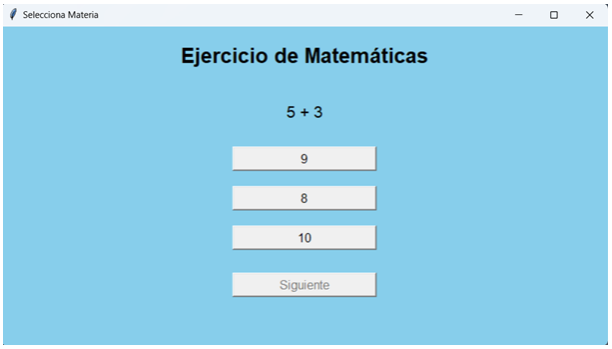


Fig. 9. Interfaz de ejercicio de matemáticas

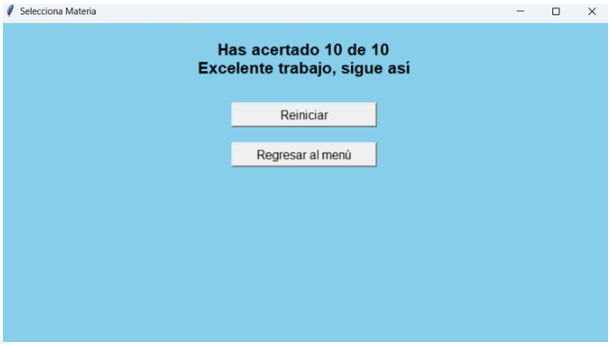


Fig. 10. Interfaz de resultados

Otra opción que tiene es el aprendizaje de algunos objetos básicos en idioma inglés, para esto utiliza una cámara que capturar las imágenes y en la pantalla se muestra su nombre. Como primera prueba se utilizaron frutas, que previamente aprendió la red neuronal convolucional (CNN) implementada.

2.3 Prototipo físico

El prototipo se imprime con filamento PLA con densidad promedio del 20%, esto se muestra en la Figura 11, que es suficiente para soportar golpes leves. Esta afirmación se basa parcialmente en las simulaciones estructurales realizadas en el entorno CAD, no obstante, se reconoce que estos análisis no simulan con total fidelidad el comportamiento del material impreso físicamente. Todas las piezas se montan con tornillos que pueden ser retirados con un desarmador con punta *Phillips* y el montaje de este es intuitivo. Su construcción es simétrica y este no presenta deformaciones. Por otro lado, la tarjeta que integra todos los componentes de control y electrónica, es maquinada empleando la técnica de desbaste CNC y soldada a mano.

Debido a que el prototipo también es un vehículo móvil y dispone de sensores para evitar colisiones con obstáculos, se utiliza un circuito de potencia con un reductor BUCK, el cual alimenta los sensores de posición de los motores y los sensores ultrasónicos. El voltaje de alimentación es de 12 voltios, necesarios para los motores, mientras que para los sensores ultrasónicos se requieren 5 voltios y 3 voltios para los encoder de los motores.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Respecto al diseño mecatrónico los requerimientos se cumplieron de la siguiente manera: El prototipo tiene un

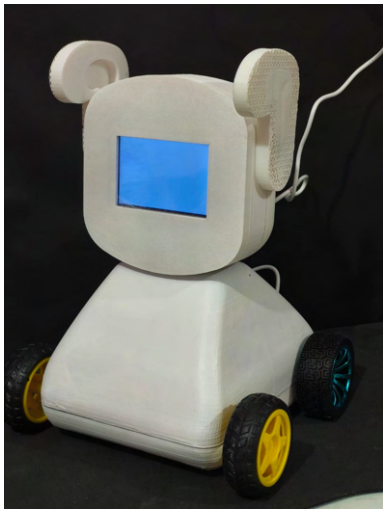


Fig. 11. Ensamble físico del prototipo

peso final de 1.6 Kg, con dimensiones de 30 x 20 x 50 cm, con lo que un niño puede transportarlo fácilmente. Con relación a la resistencia del material, debido a que es el primer prototipo se imprimió en PLA y por la cantidad de material, es resistente según las pruebas de simulación, sin embargo, idealmente debe construirse con un polímero mas resistente. El requerimiento que solicita que sea fácil de usar se cumplió con el uso y la retroalimentación de los niños que lo utilizaron. El mantenimiento no es complicado de realizar, ya que tiene pocas piezas y se diseñó con el objetivo de poder reparase por un usuario adulto sin conocimientos técnicos específicos. El último requerimiento es que no usara pilas todo el tiempo, por lo que la alimentación se hace por cable USB utilizando momentáneamente pilas recargables.

Por último, con el propósito de verificar el objetivo de ser una herramienta para la educación, se realizaron pruebas a niños de entre seis y doce años, quienes dieron como retroalimentación que es un sistema intuitivo y fácil de usar, como se observa en las Figuras 12, 13 y14. Realizaron ejercicios matemáticos los cuales según el grado escolar incrementaban la complejidad, aunque solo está diseñado para operaciones básicas, pero por las herramientas de programación utilizadas, se pueden agregar los ejercicios o contenido de las asignaturas requeridas.

4. CONCLUSIONES

La comunicación a través de una pantalla táctil fue el mejor medio para interactuar con los usuarios, en este caso niños. El uso de una cámara para capturar las imágenes de algunas frutas y el aprendizaje de una red neuronal convolucional (CNN) permitió la práctica de algunas palabras básicas en inglés. Esto junto con la técnica de *clustering* basada en centroides para analizar los datos, permitió una mejor retroalimentación en ejercicios para practicar operaciones matemáticas y determinar la necesidad de incrementar la complejidad en algunos de ellos, así como para llevar un histórico de los usuarios y sus participaciones con el prototipo de robot. También es un vehículo móvil que dispone de sensores para evitar colisiones con obstáculos, y para manipular el movimiento de los motores se utilizó el control por *Modos deslizantes* por tratarse de un sistema



Fig. 12. Prueba 1 con el prototipo físico



Fig. 13. Prueba 2 con el prototipo físico



Fig. 14. Prueba 3 con el prototipo físico

lineal con incertidumbre, observándose que fue suficiente para generar el movimiento del vehículo y evitar colisiones. El prototipo se puso a prueba con niños en edades de seis a doce años; sin embargo, es necesario realizar estudios más amplios para evaluar su efectividad en contextos con rezago tecnológico y determinar que es una herramienta complementaria para educación en centros con estas características. Como trabajos futuros se tiene incrementar los ejercicios de aprendizaje, reforzar el sistema mecánico y utilizar el prototipo con más niños y niñas además de los docentes a cargo para la mejor retroalimentación.

REFERENCIAS

Alimisis, D. (2020). Emerging pedagogies in robotics education: Towards a paradigm shift. In *Inclusive Robotic for a Better Society*, 123–130. Springer Nature Switzerland AG.

Alimisis, D. (2021). Technologies for an inclusive robotics education. *Open Research Europe*, 1, 40.

Alsina, A. y Inchaustegui, Y.A. (2018). Iniciación al álgebra en educación infantil a través del pensamiento computacional: una experiencia sobre patrones con robots educativos programables. *UNIÓN-Revista Iberoamericana De Educación Matemática*, 14(52).

Carrasco-Martínez, S., M., M.G., Álvarez-Arias, S., Alonso-Martín, F., Castro-González, A., y Ángel-Salichs, M. (2024). Generación de comportamientos basados en el tamagotchi para el robot social mini. *Jornadas de Automática*, 1(45).

Colom-Rodríguez, J. (2023). *Control de movimiento para Robot cuadrúpedo con técnicas de Deep Learning*. B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.

Gausemeier, J. y Moehringer, S. (2003). New guideline vdi 2206 - a flexible procedure model for the design of mechatronic systems. In *Proceedings of ICED*, 599–600.

González-Fernández, M. (2021). *Robótica educativa una perspectiva didáctica en el aula*. Universidad de Guadalajara.

González-Gómez, J., Valero-Gómez, A., Prieto-Moreno, A., y Abderrahim, M. (2012). A new open source 3d-printable mobile robotic platform for education. In *Advances in Autonomous Mini Robots*. Springer.

Lugo-González, E., Velarde-Galvan, A., y Arias-Montiel, M. (2020). Diseño mecatrónico implementado en el desarrollo de prototipos virtuales y físicos. In *Handbook T-I. CIERMMI Mujeres en la ciencia*, 22–39. ECOFARN-México, S.C.

Ramírez, L. (2023). Robótica educativa: transofrmando la educación para el futuro. *Poder Edomex*, 1(1).

Raquel y Dani (2025). Robots programables: enfoque y las diferencias (enormes) de precio. `https://www.robotsparaninos.com/juguetes-cultura-maker-y-kits-de-robotica/`. Consultado el 10 de abril de 2025.

Riveiro-Recio, V. (2023). *Robótica inclusiva: construyendo puentes en la educación*. Independently published.

Rosero-Yugsi, R.E. y Yanangómez-Yaguachi, C.M. (2009). *Construcción de un robot mascota 'Gato' que interactúe con las personas*. B.S. thesis, QUITO/EPN.

Development of a Mobile Robot Navigation Technique using image processing

Navarro Martínez, Fernando Abel [*]
Aquino Juárez, Blanca Rosario [*] **Lugo González, Esther** [**]

[*] *División de Estudios de Posgrado. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapan de León, Oaxaca, México. (e-mail: fernando305.fm@gs.utm.mx),(e-mail: rosarioaquino@gs.utm.mx).*
[**] *Instituto de Electrónica y Mecatrónica, Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapan de León, Oaxaca, México. (e-mail: elugog@mixteco.utm.mx).*

Abstract: This paper presents the implementation of a path planning algorithm known as Probabilistic Roadmap (PRM), which is widely used in robotics due to its efficiency in navigating complex environments. The main objective of this work is to enable a robot to navigate through a two-dimensional map containing static obstacles autonomously. Starting from an initial position, the robot must reach a user-defined destination or goal point while avoiding collisions. The PRM algorithm operates by randomly sampling points in the free space of the map and connecting them to form a graph or roadmap that captures the navigable regions. Once the roadmap is constructed, a graph search algorithm, is employed to find the optimal path between the start and goal points. To evaluate the implemented algorithm's performance, various test scenarios were created, each with different obstacle configurations and levels of complexity. These tests allow the observation of the robot's behavior and the effectiveness of the generated paths in ensuring safe and efficient navigation. The results demonstrate that the PRM algorithm successfully constructs valid paths in all tested environments, confirming its suitability for real-world applications. This work serves as a foundational step toward future implementations of assistive robotic systems designed to help individuals with disabilities. By ensuring reliable path planning in simulated environments, the system can be further developed and adapted to operate in dynamic or real-world scenarios, contributing to greater autonomy and mobility for users with special needs.

Keywords: Autonomous mobile robots, Probabilistic Road Map, Route Tracking.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, uno de los objetivos de la robótica móvil se basa en permitir al robot tener un cierto grado de autonomía respecto al entorno con el cual se relaciona. Parte de ello implica que el robot sea capaz de navegar en el entorno en el que se encuentra inmerso.

De acuerdo con Pereyra et al. (2020) la planificación de trayectorias aunada a la percepción del robot es uno de los pilares que define el nivel de autonomía del robot. Como expone Mera Prieto (2015), para que un robot pueda navegar a través de un ambiente sin colisionar, este requiere de una planificación de trayectoria, ya sea local o global. La planificación denominada global es aquella que se maneja en entornos conocidos, esto implica que se cuente con un mapa del mundo, el cual será estático. Mientras que para la planificación local solo se conoce el escenario próximo al robot, es decir, se tiene conocimiento del entorno que rodea al robot únicamente dentro de un margen definido por el alcance de los sensores que posee el robot.

Como indica Losantos Pulido (2024), recientemente la robótica ha enfocado la navegación autónoma a la asistencia social, favoreciendo la creación de robots capaces de interactuar y ayudar a personas con diversas actividades; tal es el caso de los denominados "robots lazarillos" cuyo fin es asistir a personas con discapacidad visual, el prototipo robótico adaptable a silla de ruedas presentado en Martínez Cabrera et al. (2020) cuyo objetivo es permitir la movilidad en interiores y exteriores a las personas con capacidades diferentes, entre otros.

Sin embargo, como menciona Arévalo Silva (2024), cuando se habla de autonomía, es necesario considerar el costo computacional y el nivel de utilidad del prototipo, puesto que los vehículos autónomos actuales tienen precios comerciales elevados que oscilan entre $1,800USD hasta $70,000USD, por lo cual no toda la población puede acceder a ellos. Considerando esto, si el enfoque es basado en un prototipo de bajo costo, es conveniente considerar las técnicas de evasión de obstáculos que permitan tener una respuesta óptima sin exceder en precios de componentes y tarjetas de procesamiento de datos.

Conforme a lo expresado por Leal Ramirez et al. (2022), el sistema de navegación se enfoca en la idea de conocer la ubicación del robot con respecto a un punto deseado y con respecto a los objetos que lo rodean, para

que a través de dicho conocimiento sea posible definir una ruta segura de movimiento. Por lo cual, como da a conocer Gutiérrez Plaza et al. (2022), es deseable que el conocimiento del entorno y la planificación de la ruta se encuentren ligados para tener una mayor eficiencia del movimiento.

Como sugiere Espitia Cuchango (2011), si se requiere realizar una técnica de evasión de obstáculos sin caer en convergencia a mínimos locales, lo cual genera que el robot nunca llegue a la meta deseada, una estrategia conveniente es la implementación del algoritmo PRM. Si bien esta técnica tiene una difícil superación en los entornos dinámicos, como indica Pérez-Villeda et al. (2014), es posible adaptarlo realizando un controlador a modo o una combinación de algoritmos.

Serrano Serrano (2024) menciona que la etapa de planificación de trayectoria es vital en un robot de apoyo. Por lo tanto, este proyecto pretende dotar de la capacidad de navegar en un entorno con obstáculos sin colisionar a un robot en configuración diferencial, empleando materiales de bajo costo para realizar pruebas experimentales, validando la hipótesis de que este algoritmo de evasión de obstáculos puede emplearse como una herramienta para personas con discapacidad visual.

2. METODOLOGÍA

De acuerdo con Toxqui Gómez et al. (2022), el algoritmo PRM consta de dos fases. La primera es en la cual se construye un mapa mediante una aproximación de los movimientos que se pueden realizar en el entorno que se conoce basándose en un espacio libre de colisiones, donde C es el espacio de configuración del robot y $C_{\text{free}} \subset C$ la región libre de obstáculos, generando n muestras $\{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ de forma aleatoria en C_{free}. Este mapa se presenta como un grafo no dirigido $G = (V, E)$ donde los nodos V son un conjunto de puntos a donde el robot se debe dirigir y E son las aristas de estos nodos las cuales representan el camino a seguir de un nodo a otro. Mientras que para la segunda fase, los puntos de inicio y fin del recorrido se conectan al grafo y se genera la trayectoria segura que el robot puede seguir.

Para conectar nodos, se emplea la distancia euclidiana. Si $x_i = (x_i^1, x_i^2, \ldots, x_i^d)$ y $x_j = (x_j^1, x_j^2, \ldots, x_j^d)$ son configuraciones en un espacio d-dimensional, su distancia se define como:

$$\ell_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{d} \left(x_i^k - x_j^k\right)^2} \tag{1}$$

Para garantizar la conectividad del grafo PRM, se utiliza un radio de conexión que depende del número de muestras n y la dimensión d del espacio:

$$r(n) = \gamma \left(\frac{\log n}{n}\right)^{\frac{1}{d}} \tag{2}$$

donde γ es una constante dependiente de la geometría de C_{free} de acuerdo con Karaman y Frazzoli (2011).

2.1 Control cinemático y odometría del robot

Debido a que la navegación del robot requiere de una planificación de trayectoria y de un control de posición que asegure el movimiento a través de las conexiones de los nodos obtenidos, son requeridas las ecuaciones que controlen la velocidad lineal y angular del robot, así como la odometría de las ruedas.

De acuerdo con Navarro Martínez et al. (2023), el sistema de ecuaciones para modelar el control de velocidades en un robot diferencial se pueden obtener del diagrama de cuerpo libre como se observa en la Figura 1 expresadas como en la Ec. (3).

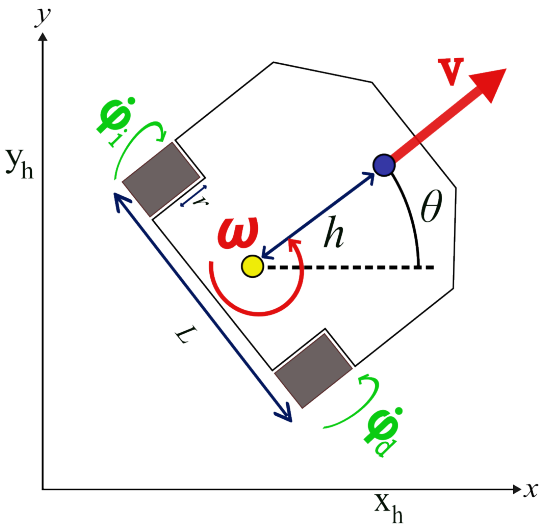


Fig. 1. Diagrama de cuerpo libre del robot diferencial

$$\begin{aligned} v &= u_x cos(\theta) + u_y sin(\theta) \\ \omega &= -\frac{u_x}{h} sin(\theta) h + \frac{u_y}{h} cos(\theta) \end{aligned} \tag{3}$$

donde las variables u_x y u_y son los controles de velocidad en los ejes x, y respectivamente, la variable h representa la distancia a la que se encuentra el punto que se desea controlar, alejado del eje de acción de las ruedas, v representa la velocidad lineal del robot, ω es la velocidad angular y θ la posición angular del robot.

Por otro lado, la odometría se encarga de determinar la posición del robot respecto a un sistema de referencia, por lo tanto, para describir las velocidades en cada rueda del robot se requiere el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_i &= \frac{v}{r} - \frac{\omega \cdot L}{2r} \\ \dot{\phi}_d &= \frac{v}{r} + \frac{\omega \cdot L}{2r} \end{aligned} \tag{4}$$

donde r es el radio de las ruedas, L la distancia entre ambas ruedas, $\dot{\phi}_i$ y $\dot{\phi}_d$ la velocidad angular de las ruedas izquierda y derecha respectivamente.

2.2 Protocolo de comunicación y generación de trayectoria

Según Carrasco Limeros et al. (2019) los métodos probabilísticos como el algoritmo PRM son muy robustos en

navegación, sin embargo, requieren una potencia computacional alta para realizar múltiples cálculos, es por ello que para cubrir ese punto se realiza una conexión inalámbrica bajo el protocolo de comunicación TCP/IP empleando red *Wi-Fi* de forma que los cálculos sean delegados a una computadora.

Esta comunicación es posible debido a que el robot posee una placa de desarrollo ESP32, que de acuerdo con sus especificaciones técnicas, cuenta con un módulo de *Wi-Fi*. De esta manera, mientras la computadora y la placa ESP32 se conectan a la misma red de internet, es posible realizar la comunicación mediante la dirección IP de la placa ESP32, obteniendo un rango de comunicación más amplio en comparación con un protocolo de comunicación basado en Bluetooth.

Al realizar una delegación de tareas a una computadora externa se deben generar dos códigos de programación, uno en el entorno de MATLAB®, el cual obtiene el mapa de caminos y envía la trayectoria a seguir al robot. Mientras que el segundo código que se implementa en la placa de desarrollo ESP32 se encarga de la recepción de los datos enviados desde el computador, cálculo de odometría y la ejecución del control de regulación, permitiendo que el robot sea capaz de moverse del punto inicial al punto deseado.

2.3 Descripción de código en MATLAB®

El código en MATLAB® consta de dos partes, el envío de datos hacia la ESP32 y la adquisición del mapa de navegación.

La adquisición del mapa de navegación se realiza con una fotografía del entorno en el cual el robot esté inmerso, dicha foto debe contener una vista desde el plano superior, puesto que esta perspectiva es necesaria para que los objetos del entorno no tengan alteraciones en cuanto a su forma y profundidad. Para que la cámara adquiera la imagen con una perspectiva paralela al suelo, esta es calibrada empleando una herramienta de nivel. Una vez que la fotografía es adquirida, se aplica un preprocesamiento, el cual consta de un recorte de la imagen para delimitar un área específica de la foto, eliminar elementos que no corresponden al entorno y emplear una relación entre los píxeles de la imagen y las distancias físicas mediante la Ecuación (5).

$$\begin{aligned} x_r &= x_h \frac{l_x}{p_x} \\ y_y &= y_h \frac{l_y}{p_y} \end{aligned} \tag{5}$$

donde x_r, y_r es la relación entre la posición del robot en el plano (x, y) y los píxeles de la imagen tomada, l_x, l_y representan las longitudes físicas en los ejes (x, y) y las variables p_x, p_y son el número de píxeles horizontales y verticales respectivamente.

Posteriormente a la imagen recortada se le aplica un procesamiento con la herramienta *Color Thresholder* de MATLAB®. Este procesamiento se realiza bajo el formato HSV, como menciona Galache (2022), el cual reasigna los colores primarios RGB en dimensiones que se visualizan más fácilmente, acercándose a lo que las personas describen como sensaciones de color. El uso de esta herramienta permite obtener dos máscaras importantes: una para binarizar el robot (Figura 2) y otra para los obstáculos (Figura 3).

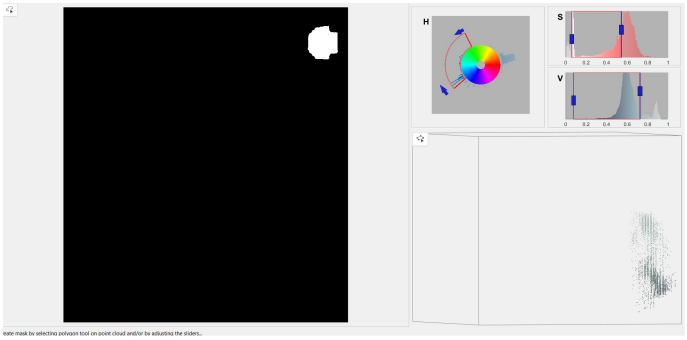


Fig. 2. Máscara del Robot

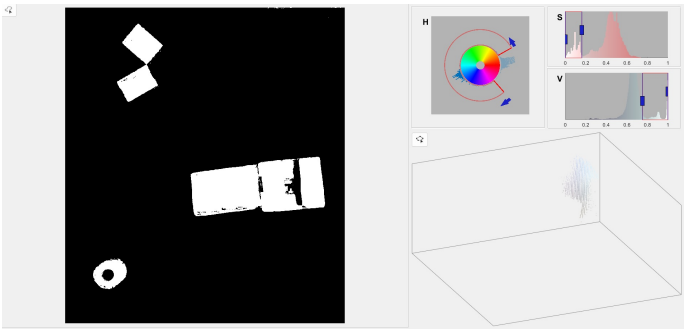


Fig. 3. Máscara de los obstáculos

Ambas máscaras son exportadas como funciones de MATLAB®. Posteriormente se realiza el proceso de obtención del mapa, donde para reconocer espacio libre, se usa la imagen binarizada de los objetos, la cual se obtiene de aplicar la máscara de objetos a la imagen del entorno en el cual estará inmerso el robot.

Por otro lado, para la adquisición del mapa de nodos y vértices se hace uso de la función de MATLAB® `robotics.BinaryOccupancyGrid`, la cual genera una cuadrícula de ocupación binaria basada en la imagen de obstáculos, dicha cuadrícula indica mediante un valor binario *true* en el área donde se encuentre un objeto y *false* en donde exista camino libre. Una vez que esta instrucción es utilizada es posible transferir el resultado obtenido a la función `robotics.PRM`, dicha función genera el grafo no dirigido, mostrado en la Figura 4, el cual contiene los diversos caminos por los cuales el robot puede pasar. A partir de este mapa se hace uso de las funciones `planner.NumNodes` y `planner.ConnectionDistance`, las cuales definen el número de nodos y la distancia que habrá entre ellos respectivamente. Finalmente, utilizando la función `findpath`, la cual recibe como argumentos el punto de meta, el punto de inicio y el mapa de nodos, se obtiene la trayectoria (Figura 5) como un vector de las posiciones correspondientes a los nodos que la componen.

Para realizar este proceso, previamente a la imagen del entorno con obstáculos se le aplica un preprocesamiento que consiste en una erosión para eliminar ruido y una dilatación de la mitad del tamaño del robot.

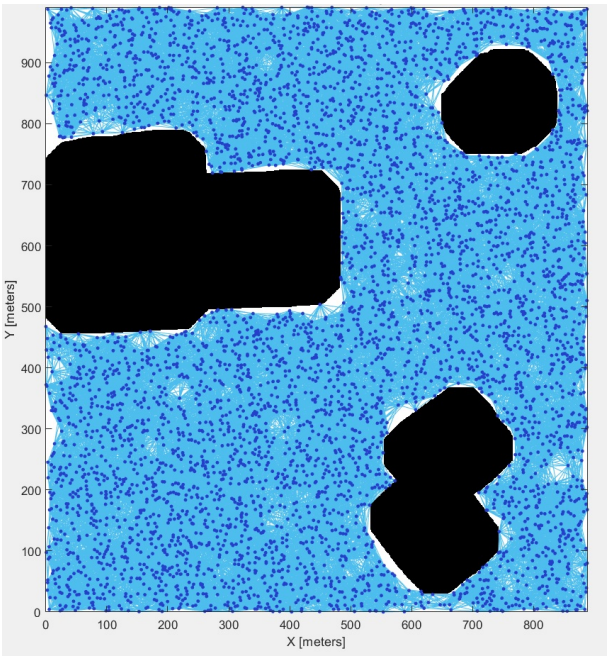


Fig. 4. Mapa con 5000 nodos.

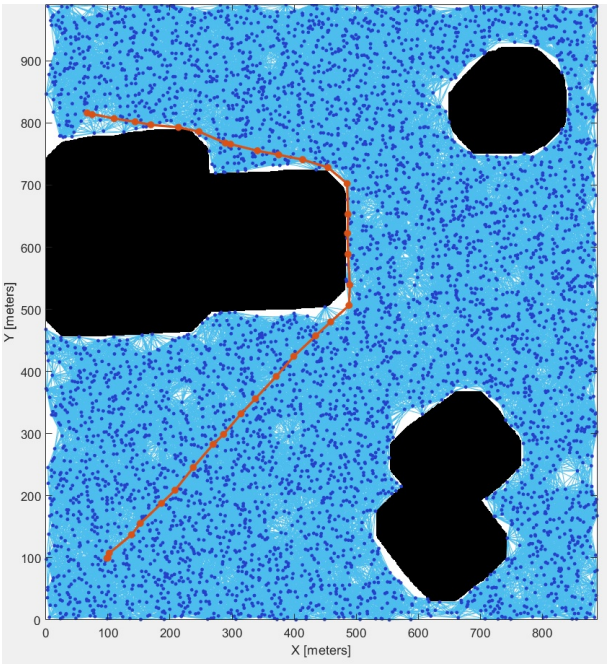


Fig. 5. Mapa con la ruta que debe recorrer el robot.

Adicionalmente, la máscara creada se usa para ocho escenarios diferentes que presentan dimensiones, tonalidades de color, variaciones de luz y resoluciones de imagen diferentes para validar la eficacia de este algoritmo. Ambos escenarios son mostrados en las Figuras 6 y 7. Para todas las pruebas se realiza el mismo procedimiento de obtención de trayectoria, uno de los escenarios adicionales se muestra en la Figura 8.



Fig. 6. Primer entorno de pruebas.

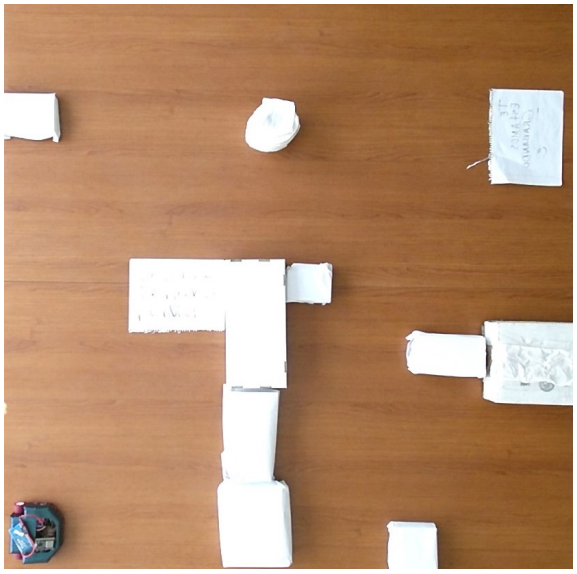


Fig. 7. Segundo entorno de pruebas.

2.4 Envío de información

Puesto que para la implementación el robot únicamente requiere del vector obtenido de la función `findpath` este es enviado a la tarjeta ESP32. Para el envío de datos, se realiza el procedimiento mostrado en el diagrama de flujo de la Figura 9. Como se observa en dicho diagrama, mediante una estructura repetitiva, se establece la conexión entre la computadora y la tarjeta ESP32, se lee el vector con la trayectoria deseada elemento a elemento, se realiza una conversión del elemento leído a un tipo de dato `uint8`, se envía el dato a la tarjeta, se cierra la conexión y se declara una pausa, cuyo tiempo de duración dependerá de la distancia que deba recorrer el robot desde el punto donde se encuentra hasta el punto con coordenadas (x, y)

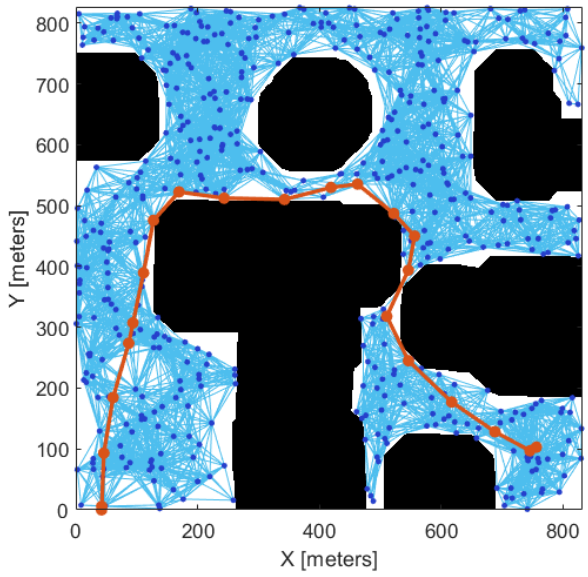


Fig. 8. Trazo de una nueva ruta.

que recibe. Dichas instrucciones se repiten hasta que se llegue al último elemento del vector.

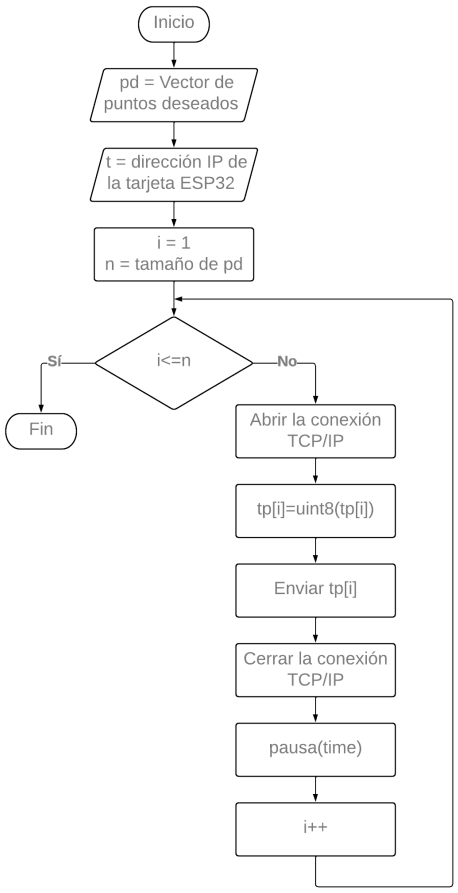


Fig. 9. Diagrama de flujo par el envío de datos de MATLAB® hacia la tarjeta ESP32

2.5 Recepción de información e implementación

Para el caso de la tarjeta de desarrollo ESP32 se llevan a cabo dos tareas de manera concurrente. El algoritmo implementado se muestra en la Figura 10, donde se describe en un diagrama de flujo. Una de las tareas es el cálculo del control cinemático, odometría y modulación de ancho de pulsos para la configuración de velocidad en los motores. Mientras que la otra tarea concurrente es la conexión y recepción de datos. Para este caso, dicho control depende de la recepción de datos, pues estos son las coordenadas que indican los múltiples puntos deseados a los que debe llegar el robot para alcanzar su meta final.

Este robot móvil emplea un *driver* TB6612FNG para realizar los cambios de dirección en los motores, *encoders* rotativos incrementales en cada motor con una resolución de 300 pulsos por vuelta para el cálculo de la odometría, una bateria Li-Po de 1500mAh a 7.4V para la alimentación de los motores y un regulador de voltaje LM7805 para la alimentación a la tarjeta de desarrollo ESP32.

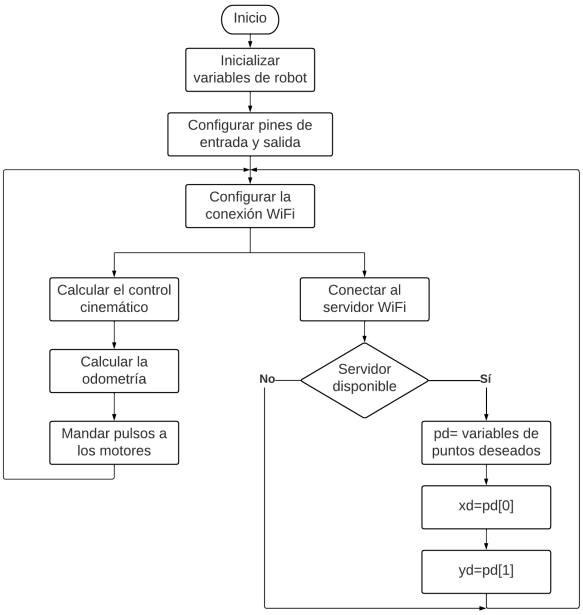


Fig. 10. Recepción de datos de posiciones del ESP32.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas realizadas con el robot y los escenarios aleatorios con figuras variables demuestran la efectividad de la aplicación del algoritmo en la evasión de obstáculos, mientras que la regulación de las variables de control permite que el robot siga la trayectoria de forma fiel. Por otra parte, se observa que la máscara implementada para el reconocimiento de obstáculos brinda un área de seguridad con lo cual el robot es capaz de seguir la trayectoria sin colisionar con los objetos, permitiendo al robot un buen rango de operación.

De acuerdo a lo observado, la adquisición de las imágenes del entorno interfiere de forma directa en el resultado de la implementación del algoritmo, puesto que la variación de la luz afecta la percepción de colores que es capaz de captar la cámara, por lo cual para generalizar la máscara aplicada en el reconocimiento de obstáculos se usan variaciones de tonalidades muy marcadas, mientras que la perspectiva de la imagen afecta la forma y profundidad de los objetos,

por lo cual el resultado óptimo se obtiene con imágenes tomadas desde el plano alzado paralelo al piso del entorno.

Resulta importante considerar que, a diferencia de las simulaciones, en la implementación el número de nodos y la distancia entre ellos define el modo de la trayectoria, razón por la que, mientras mayor sea el número de nodos y menor sea la distancia de conexión, la trayectoria es suave permitiendo que las restricciones no holonómicas del robot sean manejables, estas pruebas se pueden observar en el video publicado por Navarro Martínez y Aquino Juárez (2025).

4. CONCLUSIONES

A partir de la investigación de los algoritmos de navegación y de acuerdo al objetivo planteado, es posible concluir que la implementación del algoritmo PRM empleando el *software* MATLAB® para generar el mapa mediante nodos, empleando una fotografía aérea del entorno del robot previamente binarizada con los lugares donde es posible transitar y donde existen obstáculos para evitar las colisiones de este, utilizando una tarjeta de desarrollo ESP32, la cual recopila los datos de la posición del robot en todo momento, compartiéndolos mediante un protocolo de comunicación Wi-Fi hacia el servidor para generar una ruta segura que debe seguir, evadiendo los obstáculos existentes, cumple con la función deseada.

Esta técnica de evasión de obstáculos demostró ser efectiva para la generación de trayectorias más cortas y seguras que permiten llegar al punto deseado en entornos complejos. A través de la combinación del procesamiento de imágenes aéreas, que permite generar máscaras para la binarización y dilatación de las zonas transitables y obstáculos, así como la conversión de la resolución de píxeles a metros, se obtuvo un sistema capaz de planificar las rutas libres de colisiones con medidas reales y exactas.

A pesar de la diversidad de formas, posiciones y orientaciones de los obstáculos, esta técnica demostró ser robusta ante los cambios en el entorno, por lo que este proceso puede ser aplicado a imágenes satelitales para la planificación de rutas, empleando la robótica móvil y un asistente de voz como una herramienta para personas con discapacidad visual.

REFERENCIAS

Arévalo Silva, J.A. (2024). *Desarrollo de un prototipo de sistema para el apoyo en la movilidad autónoma de personas invidentes en exteriores.* Bachelor's thesis, Universidad Francisco Jose de Caldas.

Carrasco Limeros, S. et al. (2019). *Navegación de robots móviles en entorno Matlab-ROS.* Ph.D. thesis, Universidad de Alcalá, Escuela Politécnica Superior.

Espitia Cuchango, H.E. (2011). *Propuesta de un algoritmo para la planeación de trayectorias de robots móviles empleando campos potenciales y enjambres de partículas activas brownianas.* Bachelor's thesis, Universidad Nacional de Colombia.

Galache, K. (2022). Estadística en la mejora de contraste en imágenes médicas. *Avance y Perspectiva, Cinvestav.*

Gutiérrez Plaza, C.A., Patino Miñán, J.J., Paillacho Chiluiza, D., et al. (2022). *Planificación del movimiento de un brazo robótico mediante técnicas de inteligencia artificial para mejorar la eficiencia del agarre.* Master thesis, ESPOL. FIMCP.

Karaman, S. y Frazzoli, E. (2011). Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *The International Journal of Robotics Research*, 30(7), 846–894.

Leal Ramirez, L.S., Velandia Bejarano, N.S., et al. (2022). *Planeación de trayectorias de un Robot para la limpieza de paneles solares fotovoltaicos basado en el método Probabilistic Roadmap (PRM).* Bachelor's thesis, Universidad Antonio Nariño.

Losantos Pulido, C. (2024). *Desarrollo de un robot lazarillo empleando el Unitree Go1.* Bachelor's thesis, Universidad de Alicante, Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial.

Martínez Cabrera, L.Á. et al. (2020). *Desarrollo de robot para movilidad autónoma de estudiantes discapacitados del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán.* Bachelor's thesis, Tecnológico Nacional de México.

Mera Prieto, C. (2015). Métodos reactivos basados en campos potenciales para uavs. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales (pp. 72).*

Navarro Martínez, F.A., Aquino Juárez, B.R., y Ramírez Cárdenas, O.D. (2023). Implementation of potential fields in a differential mobile robot. In *2023 XXV Robotics Mexican Congress (COMRob)*, 116–121. IEEE.

Navarro Martínez, F.A. y Aquino Juárez, B.R. (2025). Técnica de evasión de obtáculos probabilistic road map. URL `https://youtu.be/ESdk0sSYIk4`.

Pereyra, M.E., Araguás, R.G., Paina, G.P., y Kulich, M. (2020). Planificación de caminos y trayectorias de una formación de robots autónomos. *AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)*, 628(5).

Pérez-Villeda, H., Mirelez-Delgado, F., y Morales-Díaz, A. (2014). Formación de robots móviles y evasión de obstáculos utilizando algoritmos prm y dijsktra. *Congreso Latinoamericano de Control Automático.*

Serrano Serrano, R.C. (2024). *Robot asistente para personas con movilidad reducida.* Bachelor's thesis, Universidad La Salle, Colombia.

Toxqui Gómez, B. et al. (2022). *Planificación y seguimiento de trayectoria de un robot cooperativo (CoBot).* Master's thesis, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Georeferencing of the Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala Using Augmented Reality

Ramirez Pastrana, Abigail *, Couoh Novelo, Miguel Ángel *, Rodríguez Rodríguez, Sara**

** Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala,90122.*
(e-mail: c18240051@altiplano.tecnm.mx, miguelangel.cn@altiplano.tecnm.mx).

*** Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala,90122.*
(e-mail: sara.rr@altiplano.tecnm.mx).

Abstract: This research focuses on the development of an augmented reality (AR) application for georeferencing key locations within the Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala (ITAT). The primary objective is to create an interactive mobile platform that enhances navigation and campus experience through the use of AR technology. By implementing three-dimensional (3D) objects and georeferencing these locations using Google Maps and the WGS84 coordinate system, this study aims to provide real-time information about the user's position within the campus. The development process utilizes Unity as the main platform for creating the application, while ARCore, a motion tracking platform developed by Google, is used for geolocation-based interaction. The Cloud Anchor API is employed to integrate and position 3D objects in the physical world, allowing for seamless communication between Unity, ARCore, and Google Maps. This allows virtual objects to be accurately displayed at specific locations on the ITAT campus. The methodology includes gathering geographic data, designing the AR elements, and implementing the AR features on mobile devices for testing. At this stage, the application is still under development, but the initial results indicate the feasibility of combining AR and georeferencing technologies to improve campus navigation. The app provides a novel way for students, visitors, and faculty to interact with their environment in real-time, increasing the accessibility and usability of the campus facilities. The final goal is to provide a user-friendly application that facilitates the orientation of new students and enhances their academic experience.

Keywords: Augmented Reality(RA), Georeferencing, Unity, ARCore, Google Maps, Campus Navigation, Cesium

1. INTRODUCCIÓN

La realidad aumentada (RA) tuvo su origen en un ensayo publicado en 1994 titulado Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum, escrito por Paul Milgram, Haruo Takemura, Akira Utsumi y Fumio Kishino.

Este trabajo estableció las bases para entender que la Realidad Mixta (MR) se encuentra en una línea de dos extremos relacionado entre el Mundo Real y Entorno Virtual teniendo dos subdivisiones principales: la Realidad Aumentada (más cercana a la realidad) y la Virtualidad Aumentada (más próxima a la virtualidad pura). (Milgram, Takemura, Utsumi, & Kishino, 1994)

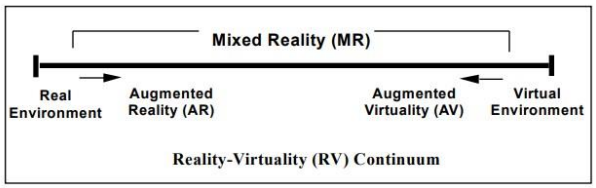


Fig. 1 Representación simplificada de un continuo RV

La Realidad Aumentada (AR) es una de las Tecnologías que se están desarrollando dentro de los diferentes entornos virtuales y digitales, para ello el Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala (ITAT), implementara objetos 3D(tridimensional) mediante georreferenciación con el sistema de coordenadas de Google Maps Platform, generando información en tiempo real sobre la ubicación del dispositivo, siendo visibles con la cámara del dispositivo.

El proyecto se lleva a cabo con las diferentes herramientas que desarrollan Realidad Aumentada generando más investigación e interés por esta área, tecnológica que continúa revolucionando su desarrollo dando la posibilidad de procesar los objetos y almacenar la información de estos siendo factible de modelar a las necesidades requeridas dentro de diferentes entornos y herramientas especializadas en realidad aumentada, utilizando Unity como plataforma principal para generar una aplicación móvil que permita visualizar objetos virtuales superpuestos en la realidad a través de la cámara del dispositivo. Los datos de georreferenciación de los objetos se obtendrán utilizando Google Maps y el sistema WGS84, lo que permita rastrear las coordenadas de objetos virtuales en ubicaciones específicas dentro del ITAT. Las áreas seleccionadas estratégicamente para que los estudiantes puedan interactuar con los elementos generados. Además, se empleará ARCore, una plataforma desarrollada por Google, que ofrece herramientas avanzadas de seguimiento de

movimiento mediante geolocalización. Para lograr la integración y posicionamiento de los objetos 3d, se utilizará la API de Cloud Anchor, que facilitará la comunicación autorizada entre ARCore, Google Maps y Unity en tiempo real, permitiendo mostrar los objetos generados en el área designada del Instituto

Justificación

Para cumplir con los objetivos del proyecto el uso de una metodología se adaptará al desarrollo de la aplicación de Realidad Aumentada para el Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala, garantizando que cada fase del proyecto avance de manera eficiente y con entregas parciales continuas. A través de ciclos iterativos, el equipo podrá ajustar el desarrollo del proyecto conforme a las necesidades emergentes y los comentarios recibidos. Esto se podría integrar asistente Artificial para que de manera virtual se realiza el seguimiento.

2. METODOLOGÍA

Requisitos de Usuario

Al inicio del desarrollo del proyecto, no se contaba con información precisa sobre qué sistema operativo móvil era el más utilizado por la comunidad estudiantil. Esta falta de certeza representaba un desafío para definir la plataforma base sobre la cual desarrollar la aplicación de realidad aumentada. Ante esta situación, se decidió realizar una encuesta con el objetivo de identificar el sistema operativo predominante entre los usuarios potenciales. La encuesta fue distribuida entre los estudiantes para garantizar que el sistema operativo móvil más utilizado dentro de la institución fuera Android, en comparación con iOS u otros sistemas. La encuesta se diseña para centrarse en los dos sistemas operativos más conocidos Fig. 2 encuesta de sistema operativos, con una opción abierta para otros sistemas, con el fin de identificar cuál sería el más adecuado para que los estudiantes y personal adaptaran la aplicación en sus dispositivos móviles. Los resultados de la encuesta son analizados utilizando Google Forms y Excel para realizar el seguimiento de las respuestas y gestionar los datos recolectados.

Número de personas que contestaron la encuesta fueron de 22, a pesar de compartir en diferentes grupos y docentes.

- Fecha de inicio: 10/09/2024
- Fecha de finalización (Recogida de datos): 30/09/2024



Fig. 2 encuesta sistemas operativos

Las respuestas de los usuarios, que actuaron como evaluadores de la aplicación móvil, indican que la aplicación cumple con las características de uso y el propósito para el que fue diseñada: una herramienta para el aprendizaje colaborativo en el aula.

El 81% de los encuestados optaron por el desarrollo de la versión para dispositivos Android, lo que se eligió como enfoque principal para el proyecto, basándose en la evaluación y el análisis detallado.

Arquitectura de la Aplicación

La arquitectura de la aplicación de Realidad Aumentada (RA) para el Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala, basada en ARCore y desarrollada con Unity, utiliza diversos componentes que trabajaron mostrados en la Fig.3 Arquitectura de la Aplicación AR, siendo de manera sincronizada para ofrecer una experiencia interactiva y precisa a los usuarios. La aplicación aprovecha tecnologías avanzadas como la geolocalización, el uso de la cámara del dispositivo, los sensores de movimiento y las interfaces de usuario intuitivas.

La aplicación de RA desarrollada para el ITAT integró tecnologías avanzadas como ARCore, Unity y APIs geoespaciales para ofrecer una experiencia interactiva de navegación. Esta aplicación no solo permite a los estudiantes y visitantes explorar el campus de manera eficiente, sino que también mejora el acceso a información en tiempo real, aprovechando la capacidad de la realidad aumentada para superponer objetos virtuales en el mundo físico. (Liang, 2016).

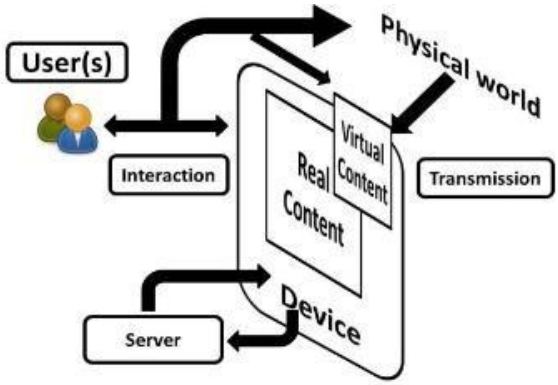


Fig. 3 Arquitectura de la Aplicación AR

Tecnologías y Herramientas

El desarrollo se basa en una serie de tecnologías avanzadas que facilitaron la creación de una experiencia inmersiva y georreferenciada dentro de la aplicación. A continuación, se describe de manera resumida las principales tecnologías utilizadas, con un enfoque en sus funcionalidades y aplicaciones dentro del proyecto:

Unity: Unity Hub es una aplicación de gestión centralizada para el motor de desarrollo de videojuegos Unity. Permite a

los usuarios instalar y gestionar diferentes versiones de Unity, crear nuevos proyectos, acceder a los existentes y configurar los entornos de trabajo de manera más eficiente mostrado Fig. 4 Unity.

Fig. 4 Unity

AR Foundation: Fig. 5 AR Foundation permite la creación de aplicaciones multiplataforma. Dentro de Unity, AR Foundation utiliza el SDK nativo de cada plataforma para habilitar funciones específicas de RA, lo que permite a los desarrolladores crear experiencias de RA consistentes. Es fundamental conocer las características y limitaciones de cada plataforma para asegurar que la aplicación funcione correctamente y de manera eficiente en todos los dispositivos y sistemas operativos. (Unity Technologies, 2024)

Fig. 5 AR Fundation

ARCore: La tecnología ARCore, lanzada en 2018 y actualizada continuamente, se ha convertido en una de las principales herramientas para el desarrollo de RA en Android es la plataforma de Google para crear experiencias de realidad aumentada. Con diversas APIs, ARCore permite que el dispositivo perciba su entorno, entienda el mundo y se interactúe con la información. Las características de ARCore están disponibles en Android y iOS para habilitar experiencias de RA compartidas Fig.6 ARCore.

Fig. 6 ARCore

Cesium for Unity: Cesium es una poderosa herramienta para crear visualizaciones interactivas geoespaciales en 3D. Proporciona acceso a modelos 3D del mundo real, fotogrametría y otros datos geoespaciales. Su integración con Unity hace que sea una opción excelente para proyectos de RA, simulación geoespacial y juegos basados en la ubicación Fig. 7 Cesium for Unity. (Real-World 3D Geospatial Capability for Unity, 2024)



Fig. 7 Cesium for Unity

Google Maps Tiles API: La API de Google Maps Tiles proporciona acceso directo a mosaicos fotorrealistas 2D y 3D. Estos mosaicos representan el mundo dividido en una cuadrícula indexada y pueden utilizarse para crear experiencias inmersivas basadas en Google Maps en la aplicación.

ARCORE

A través de su integración con AR Foundation, los desarrollos pueden crear experiencias de RA de manera multiplataforma utilizando ARCore, reduciendo significativamente la complejidad y el esfuerzo de desarrollo al crear aplicaciones para dispositivos Android. ARCore es una plataforma desarrollada por Google para construir aplicaciones de realidad aumentada (RA) en dispositivos Android y iOS. Utiliza el seguimiento de movimiento, la comprensión ambiental y la estimación de luz para superponer contenido digital en el mundo físico. En la literatura académica, ARCore se presenta como una tecnología fundamental en proyectos de navegación en campus universitarios y otras áreas, al permitir la interacción entre usuarios y su entorno a través de dispositivos móviles. ARCore destaca por ofrecer características como el seguimiento del dispositivo en tiempo real, la detección de planos y el seguimiento de imágenes y objetos tridimensionales. Esta plataforma, cuando se usa en combinación con Unity y AR Foundation, permite a los desarrolladores crear experiencias de RA inmersivas que van desde la navegación hasta la educación y la simulación industrial. (Mendoza Ramirez, Tudon Martinez, Felix Herran, Lozoya Santos, & Vargas Martinez, 2023)

ARCore Entorno recolecta datos del entorno y del dispositivo (cámara e información de sensores) para generar experiencias de realidad aumentada mostrada en la Fig. 8 ARcore Entorno. Este flujo es esencial para aplicaciones AR, como las creadas en Unity con ARCore. (Chaudhry, Juneja, & Rastogi, 2021)

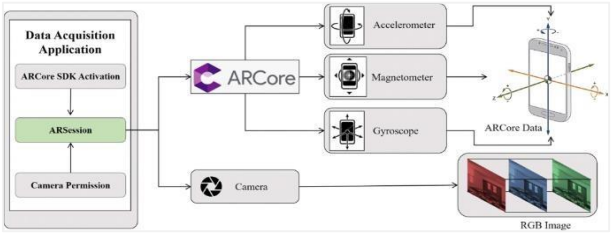


Fig. 8 ARcore Entorno

Áreas Principales

Para recabar las áreas dentro del Instituto Tecnológico del Altiplano Tlaxcala se tomó en cuenta, áreas claves de la

Institución siendo su descripción del motivo a implementar como punto de interacción, generando datos de georreferenciación del posicionamiento para anclar y superponer contenido por latitud, longitud y altitud. Para la recopilación de datos de georreferenciación en el Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala, se seleccionaron áreas clave como la Dirección, que coordina las actividades administrativas y académicas; la Biblioteca, un espacio de aprendizaje e investigación; Servicios Escolares, que gestiona trámites académicos; el Gimnasio, dedicado a la actividad física y deportiva; los Laboratorios, para prácticas científicas; la Cafetería, punto de encuentro social; y el Centro de Cómputo, que facilita el acceso a la institución y sus servicios. Estas áreas fueron elegidas para implementar la superposición de contenido basado en georreferenciación. La Fig. 9 Ubicación de las áreas principales, presentó la visualización de un mapa a través de **Earth**. En esta representación, se muestra imágenes detalladas de la superficie terrestre, lo que permite identificar con precisión las características geográficas y las ubicaciones relevantes para el proyecto.

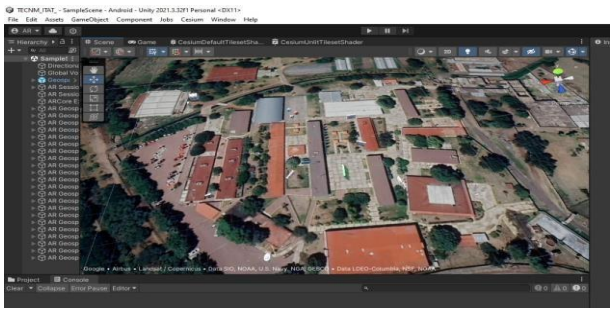


Fig. 9 Ubicación de las áreas principales

Objetos Primitivos

Los objetos primitivos se utilizan en Unity debido a su versatilidad, simplicidad y eficiencia para la creación rápida de prototipos y la visualización de elementos en el entorno de desarrollo Fig. 10 objeto primitivo. El desarrollo de los objetos primitivos, fueron generados dentro de la plataforma de Unity siendo más factible el uso de estas para el proyecto, generando la renderización mas optima y así como también su flexibilidad, textura y tamaño.

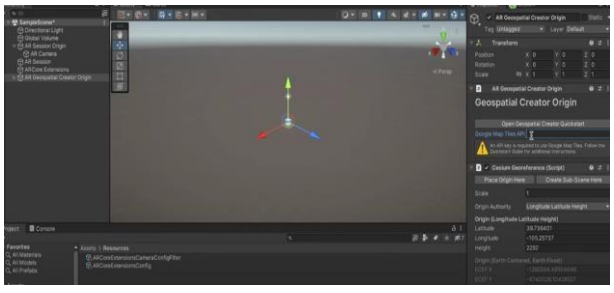


Fig. 10 objeto primitivo

Los **anclajes (anchors)** se obtiene como puntos de referencia fundamentales dentro de una experiencia de realidad aumentada (AR) que contienen información específica sobre la posición, orientación y propiedades de los objetos 3D que se renderizarían en el entorno físico. Su implementación fue esencial para asegurar que los objetos virtuales se mantuvieran correctamente ubicados en el mundo real, incluso cuando el usuario se moviera o el entorno físico cambiara mostrado en la Fig. 11 Anclaje de objeto.

Los anclajes se distribuyeron en distintas posiciones geográficas, con coordenadas de latitud que oscilaron entre 19.3081 y 19.3100, mientras que las longitudes variaron entre -98.3834 y -98.3849.

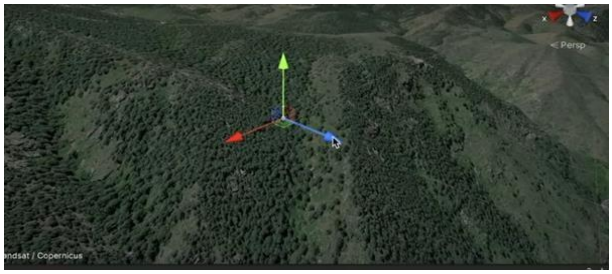


Fig. 11 Anclaje de objeto

Pruebas Iniciales

Durante las primeras etapas, se procedió a realizar pruebas iniciales para evaluar la integración de modelos 3D provenientes de Blender como se muestra en la Fig. 12 Objeto Blender no definido en el Entorno Unity. Estas pruebas permitieron identificar limitaciones técnicas importantes, como la deformación de figuras al importar modelos y la imposibilidad de asignar correctamente las texturas ya que al ser posible la textura debería de ser editada y constante mente probada para que se visualizara como ejemplo una hamburguesa mostrado en la Fig. 12 Objeto Blender no definido en el Entorno Unity que costo demasiada edición para que la imagen fuera aceptada haciendo líneas de los colores de los ingredientes tomando demasiado tiempo de creación y edición en Paint que era el formato que más se adaptaba a crear líneas y tamaños para agregar como textura y para pruebas donde se pudo visualizar de la textura que es viéndose en la Fig. 13 Objeto Blender hamburguesa Entorno Unity .A pesar de convertir los modelos a formatos compatibles con Unity, como .fbx o .obj, persistieron los errores visuales tanto en la interfaz de desarrollo como en la aplicación final y tomando demasiado tiempo en edición de ser posible cargado el objeto.

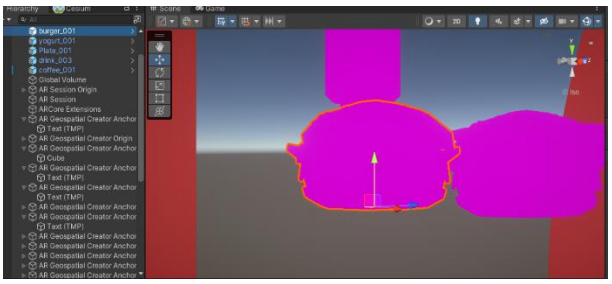


Fig. 12 Objeto Blender no definido en el Entorno Unity

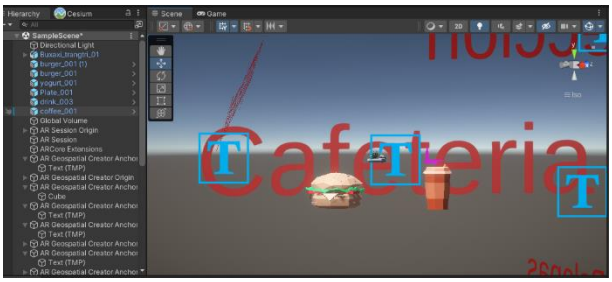


Fig. 13 Objeto Blender hamburgesa Entorno Unity

Frente a estas dificultades, se optó por replantear la estrategia de diseño. En lugar de continuar con modelos externos, se decidió emplear objetos primitivos de Unity (cubos, esferas, cilindros) para representar los puntos de interés.

Rendimiento de Carga de Objetos

Se identificó que, en condiciones de conectividad inestable, los objetos podían tardar hasta 20 segundos en cargar, mientras que en situaciones ideales el tiempo era significativamente menor. Estos resultados fueron documentados mediante capturas de pantalla, las cuales permiten visualizar el comportamiento de la aplicación en distintos puntos del campus Fig. 14 Primera carga de app ITAT_TECNM y Fig. 15 segunda carga de app ITAT_TECNM.

Este análisis refuerza la necesidad de realizar pruebas adicionales enfocadas en mejorar la precisión del posicionamiento geográfico, especialmente en entornos con alta densidad de estructuras o poca visibilidad del cielo. También se recomienda optimizar el rendimiento en la carga de elementos visuales, ya que la rapidez con la que se despliegan es clave para una experiencia de usuario satisfactoria.



Fig. 14 Primera carga de app ITAT_TECNM



Fig. 15 Segunda carga de app ITAT_TECNM

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

El desarrollo de la aplicación móvil por nombre final ITAT_TECNM basada en realidad aumentada y georreferenciación ha permitido la visualización en tiempo real de objetos 3D sobre el entorno físico. En la Fig.16 Área deportiva, se observa cómo la aplicación, utilizando la cámara del dispositivo, posiciona y visualiza objetos deportivos como baloncesto, voleibol y fútbol en el área deportiva del Instituto, basándose en las coordenadas geográficas obtenidas a través de Google Maps y el sistema de geolocalización WGS84 así como la visualización de que se está ejecutando en la aplicación Fig. 17 Información de api geoespacial. Los objetos se superponen correctamente en el espacio, alineados con las coordenadas de latitud y longitud del usuario, y ARCore facilita la integración de estos objetos dentro del entorno físico, permitiendo una experiencia inmersiva.



Fig. 16 Área deportiva

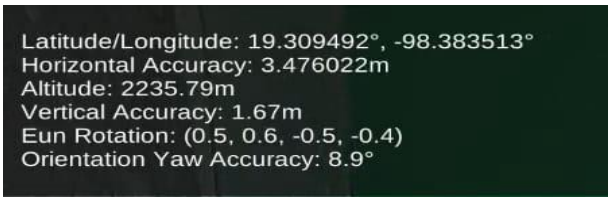


Fig. 17 Información de api geoespacial

Por otro lado, en la Fig. 18 Biblioteca, se muestra la superposición de dos modelos 3D de libros en la Biblioteca, creados con Unity y detallados con texturas realistas. La aplicación también presenta datos en tiempo real de la orientación del dispositivo, su ubicación GPS y su altitud, todo basado en los datos de georreferenciación. Esto demuestra que la aplicación es capaz de integrar elementos virtuales en el entorno físico de manera precisa y efectiva, mejorando la interacción de los usuarios con los espacios del Instituto.



Fig. 18 Biblioteca

Análisis de resultados:

Durante el desarrollo, surgieron problemas al importar modelos 3D externos, como el personaje de Bender. Aunque se utilizaron formatos compatibles con Unity, estos modelos se deformaron al cargar en la interfaz y no fue posible adaptar las texturas correctamente. Como resultado, los objetos no llegaron a visualizarse en la aplicación final, afectando la experiencia de usuario. Para solucionar estos inconvenientes, se optó por usar objetos primitivos nativos de Unity, como cubos y esferas. Esta decisión permitió mejorar significativamente el tiempo de aparición de los objetos en pruebas, evitar errores de renderizado y facilitar su creación y personalización. También fue más sencillo asignar geolocalización a estos elementos, lo cual optimizó el proceso de posicionamiento espacial. Además, se incorporaron imágenes de fondo en cada objeto, de manera que los cuadros y círculos mostraran información visual clara en la interfaz de usuario.

El entorno geográfico puede variar debido a la topografía del terreno. Para abordar esto, ARCore emplea anclajes geoespaciales que permiten posicionar objetos virtuales con precisión en el espacio tridimensional, utilizando coordenadas GPS y altitud relativa al terreno. Esto asegura que los objetos se visualicen en la altura correcta, incluso en áreas con variaciones topográficas, como zonas entre áreas verdes y pavimentadas. Además, ARCore integra la APIs que combinan mediciones de profundidad en tiempo real con datos geométricos del entorno, proporcionando una representación más realista y precisa de los objetos virtuales en el mundo real.

El uso de la realidad aumentada en entornos escolares representa un avance tecnológico significativo, ya que permite a los usuarios interactuar con procesos de enseñanza de forma más dinámica y comprensiva. Esta tecnología facilita la comprensión de procedimientos complejos, como los realizados en laboratorios durante ensayos de destilación, entre otros. Asimismo, permite explorar zonas específicas o prototipos como medio de retroalimentación eficiente en distintas áreas del conocimiento.

4. CONCLUSIONES

El presente proyecto ha generado en los estudiantes y visitantes interactuar a su propio ritmo teniendo su experiencia visual y adaptándose de forma individual, ayudo a comprender la Tecnología de Realidad Aumentada, así como comprender más la Realidad Aumentada. Se logrado desarrollar e implementar un proyecto de realidad aumentada que integró tecnologías como ARCore, Cesium, Google Maps Tiles API y AR Foundation. Durante el proceso, se realizó la georreferenciación precisa de 20 objetos virtuales en las principales áreas del campus, utilizando anclajes (anchors) con valores de offset, los cuales permitieron corregir y ajustar las posiciones de los elementos en el espacio físico.

Al momento se ha concluido con la creación de una aplicación móvil interactiva, distribuida gratuitamente a través de MediaFire, permitiendo a estudiantes y visitantes explorar el campus mediante un dispositivo móvil. Esta implementación demostró la utilidad de la realidad aumentada para la navegación interactiva y la mejora de la experiencia en entornos físicos, al conectar el mundo real con objetos virtuales de manera coherente y accesible.

Además, se planea realizar un análisis más profundo sobre la percepción del usuario y la efectividad de la aplicación en la orientación de nuevos estudiantes. El objetivo final es ofrecer una aplicación intuitiva que facilite la orientación de nuevos estudiantes y enriquezca su experiencia académica, mediante pruebas y ajustes continuos a lo largo del proceso de implementación.

Trabajos futuros y pruebas adicionales:
Se prevé implementar el proyecto en dispositivos iPhone, con el propósito de ampliar la compatibilidad entre plataformas. Para lograrlo, será necesario trasladar el proyecto a una computadora Mac, ya que el entorno de desarrollo de Apple exige utilizar Xcode para compilar, firmar y publicar aplicaciones destinadas a iOS. Esta adaptación requerirá verificar la compatibilidad con ARKit y realizar pruebas específicas en iPhone para garantizar el rendimiento y la estabilidad del sistema.

Estudios posteriores:

Para continuar con la mejora de la aplicación desarrollada, será necesario realizar estudios posteriores enfocados en diversos aspectos técnicos y pedagógicos. Entre ellos, uno de los más relevantes es profundizar en la precisión de la geolocalización bajo distintas condiciones ambientales y arquitectónicas. Factores como la presencia de edificios altos, techos metálicos, interferencias electromagnéticas o cobertura limitada pueden afectar significativamente el posicionamiento de los objetos aumentados.

REFERENCIAS

Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A. and Kishino, F. (1994) 'Augmented reality: a class of displays on the reality–virtuality continuum', *SPIE - The International Society for Optics and Photonics*, 2351, pp. 282–292.

Chaudhry, T., Juneja, A. and Rastogi, S. (2021) 'AR foundation for augmented reality in Unity', *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, 7.

Liang, S. (2016) *Design principles of augmented reality focusing on the ageing population*. Communication and Computing Research Centre, 7.

Real-World 3D Geospatial Capability for Unity (2024) *Cesium for Unity*. Disponible en: https://cesium.com/platform/cesium-for-unity/ (Accedido: 11 junio 2025).

Unity Technologies (2024) *¿Qué es Unity Hub?* Disponible en: https://unity.com/es/unity-hub (Accedido: 11 junio 2025).

A Review of Multi-Agent Systems for Quadcopter Control: LPV and LTI Approaches

Estrada Téllez, Dryden * **Espinosa Pedroza, Arturo Daniel** *
Adam Medina, Manuel * **Huicochea Ríos, Isay Obet** *

* *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, (CENIDET), Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México. (e-mail: m23ce098@cenidet.tecnm.mx, d22ce059@cenidet.tecnm.mx, manuel.am@cenidet.tecnm.mx, d21ce081@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: The control of quadcopters through Multi-Agent Systems (MAS) has gained significant attention due to its potential for scalability, robustness, and adaptability in complex tasks such as surveillance, mapping, and cooperative transport. This paper presents a single review of MAS strategies for quadcopter control, focusing specifically on two prominent modeling approaches: Linear Time-Invariant (LTI) and Linear Parameter-Varying (LPV) systems. The dynamic model of the quadcopter is introduced, followed by a classification of MAS architectures and communication topologies. Then, both LTI and LPV modeling frameworks are discussed in terms of their advantages, limitations, and relevance to control design. Some control strategies under each modeling paradigm are analyzed.

Keywords: Multi-agent Systems, UAVs, LTI systems, LPV systems.

1. INTRODUCCIÓN

Los cuadricópteros son un tipo de vehículos aéreos no tripulados que se propulsan mediante cuatro hélices dispuestas en configuración cruzada. Han sido objeto de creciente interés en la investigación debido a su maniobrabilidad, tamaño compacto y capacidad de despegue y aterrizaje vertical, lo que los hace especialmente útiles en entornos restringidos o de difícil acceso (Ghazbi et al., 2016). Estas características los convierten en una plataforma ideal para una amplia gama de aplicaciones, tales como la agricultura, vigilancia, búsqueda y rescate, combate de incendios, monitoreo ambiental, así como grabación de video y fotografía aérea (Thusoo et al., 2021).

A medida que aumentan las exigencias operativas de los cuadricópteros, también crece el interés de utilizarlos en misiones cooperativas. En este contexto, los sistemas multi-agente han surgido como una alternativa para coordinar múltiples vehículos aéreos que trabajan de forma conjunta en misiones complejas (Trejo, 2020). Mediante la cooperación entre agentes, es posible lograr objetivos como el seguimiento de trayectorias, creación de formaciones, exploración de áreas o la ejecución de misiones sincronizadas (Trejo et al., 2023b).

El diseño de estrategias de control para sistemas multiagentes basados en cuadricópteros depende en gran medida del modelo dinámico utilizado. Si bien existen enfoques no lineales como *Nonlinear Control*, *Adaptive Control*, *Sliding Mode Control* y *Backstepping Control*, este trabajo se centra en modelos Lineales Invariantes en el Tiempo (LTI) (Téllez et al., 2024) y Lineales con Parámetros Variantes (LPV) (Espinosa et al., 2023) por su amplia adopción en sistemas cooperativos, escalabilidad para análisis multi-agente, lo que los hace adecuados para estrategias de control distribuido, consenso y tolerancia a fallos en entornos multiagente. En la literatura, dos de los enfoques adoptados para representar la dinámica de estos sistemas son los modelos Lineales Invariantes en el Tiempo (Téllez et al., 2024) y los modelos Lineales con Parámetros Variantes (Espinosa et al., 2023). Los modelos LTI ofrecen una representación simplificada del sistema alrededor de un punto de operación, lo que facilita el análisis y el diseño de controladores mediante herramientas lineales clásicas. Por otro lado, los modelos LPV permiten capturar de manera más precisa el comportamiento no lineal y dependiente del tiempo de los sistemas (Shamma, 2012), incorporando la variación de ciertos parámetros. Esta característica hace que los modelos LPV sean particularmente atractivos para aplicaciones que requieren mayor precisión o en las que las condiciones operativas varían significativamente durante la misión.

A pesar de los avances en el control de sistemas multiagente para cuadricópteros, la literatura técnica presenta una considerable diversidad de enfoques que varían según el tipo de modelado utilizado, la arquitectura de control y el grado de acoplamiento entre agentes (Susbielle et al., 2024). En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo ofrecer una visión general de algunas metodologías de control empleadas en sistemas multiagentes de cuadricópteros, centrándose específicamente en los enfoques basados en modelos LTI y LPV.

2. FUNDAMENTOS DE CUADRICÓPTEROS Y SMA

2.1 Modelo dinámico de un cuadricóptero

A continuación se presentan las ecuaciones que describen la dinámica de un cuadricóptero, obtenidas mediante el formalismo Newton-Euler (Sadeghzadeh et al., 2014). Estas ecuaciones representan el comportamiento no lineal del vehículo aéreo no tripulado en el espacio tridimensional:

En la Figura 1 se muestra una representación isométrica de un cuadricóptero con sus tres ángulos de orientación: *roll* (ϕ), *pitch* (θ) y *yaw* (ψ). Los ejes del sistema de coordenadas inercial se indican con las direcciones x, y y z, las cuales definen el movimiento del vehículo en el espacio tridimensional. Los ángulos representan la rotación del dron respecto a cada uno de estos ejes: ϕ alrededor de x, θ alrededor de y y ψ alrededor de z.

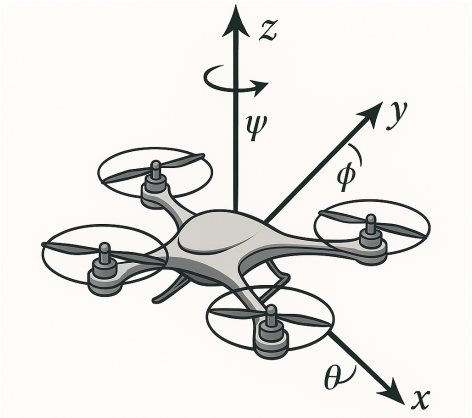


Fig. 1. Ángulos y referencias espaciales de un cuadricóptero

$$
\begin{aligned}
\dot{p}_x &= v_x, \\
\dot{v}_x &= (\cos(\psi)\sin(\theta)\cos(\phi) + \sin(\psi)\sin(\phi))\,\frac{1}{m_s}u_z, \\
\dot{p}_y &= v_y, \\
\dot{v}_y &= (\sin(\psi)\sin(\theta)\cos(\phi) - \cos(\psi)\sin(\phi))\,\frac{1}{m_s}u_z, \\
\dot{p}_z &= v_z, \\
\dot{v}_z &= -g + (\cos(\theta)\cos(\phi))\,\frac{1}{m_s}u_z, \\
\dot{\phi} &= p + (\sin(\phi)\tan(\theta))q + (\cos(\phi)\tan(\theta))r, \\
\dot{p} &= (qr(J_y - J_z) + u_\phi)\,\frac{1}{J_x}, \\
\dot{\theta} &= \cos(\phi)q - \sin(\phi)r, \\
\dot{q} &= (pr(J_z - J_x) + u_\theta)\,\frac{1}{J_y}, \\
\dot{\psi} &= (\sin(\phi)q + \cos(\phi)r)\,\frac{1}{\cos(\theta)}, \\
\dot{r} &= (pq(J_x - J_y) + u_\psi)\,\frac{1}{J_z},
\end{aligned}
\tag{1}
$$

Donde p_x, p_y y p_z representan a la posición del agente, v_x, v_y y v_z sus velocidades de traslación, ϕ, θ y ψ expresan los ángulos *roll, pitch y yaw*, g es la aceleración de la gravedad, m_s es la masa total del dron y J_x, J_y y J_z son los momentos de inercia.

Debido a la complejidad no lineal de este modelo, en la práctica es común emplear modelos simplificados para facilitar el análisis y el diseño de controladores . Entre estos destacan el modelo linealizado alrededor de un punto de operación y los modelos con parámetros variantes en el tiempo, los cuales permiten incorporar la variación de ciertos parámetros sin perder completamente la estructura lineal (Trejo et al., 2023a).

2.2 Conceptos clave de SMA

En el contexto del control de cuadricópteros, los sistemas multi-agentes permiten coordinar múltiples vehículos de forma colaborativa para llevar a cabo tareas que serían ineficientes o imposibles de realizar por un único agente (Rios et al., 2024). Estos sistemas se caracterizan por una estructura compuesta de agentes autónomos que interactúan entre sí mediante reglas locales, lo que da lugar a comportamientos colectivos emergentes.

Uno de los conceptos fundamentales en SMA es el consenso (Carrascosa et al., 2023), el cual se refiere al proceso mediante el cual los agentes alcanzan un acuerdo respecto a una determinada variable de estado, como la posición. Este acuerdo se logra mediante intercambios de información, definidos a través de una topología de comunicación, representada por un grafo (Lewis et al., 2013).

El grafo de comunicación se describe formalmente por una matriz de adyacencia A y una matriz Laplaciana $\mathcal{L}$, cuya estructura influye en la capacidad del sistema para lograr consenso. La conectividad del grafo es un aspecto crucial: si el grafo no está conectado, los agentes no pueden compartir información suficiente para coordinarse de manera efectiva (Trejo et al., 2021a).

Los agentes en un MAS pueden ser homogéneos, cuando comparten las mismas dinámicas y capacidades (Trejo et al., 2022), o heterogéneos, cuando presentan diferencias estructurales o funcionales (Zheng et al., 2011). Además, en muchas arquitecturas se distingue entre agentes líderes, que definen la referencia del sistema, y seguidores, que ajustan su comportamiento con base en la información del líder o de sus vecinos.

3. MODELADO DE CUADRICÓPTEROS PARA SMA

El modelado dinámico de un cuadricóptero es un paso crucial para el diseño de controladores, especialmente en el contexto de sistemas multi-agentes, donde múltiples vehículos deben operar de manera coordinada (Campion et al., 2018). En esta sección se presentan dos enfoques utilizados para representar dinámicamente a los cuadricópteros: los modelos lineales invariantes en el tiempo y los modelos lineales con parámetros variantes.

3.1 Modelos LTI

Los modelos LTI son representaciones simplificadas obtenidas a partir de la linealización del modelo no lineal completo alrededor de un punto de equilibrio, comúnmente en condición de *hover* (Chamseddine et al., 2012). Este tipo

de modelado permite expresar la dinámica del sistema en forma de ecuaciones lineales del tipo (Ogata, 2020):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t), \end{aligned} \tag{2}$$

Donde $x(t)$ es el vector de estados, $u(t)$ el vector de entradas y $y(t)$ el vector de salidas del sistema.

Los modelos LTI presentan las siguientes ventajas:

- Simplicidad analítica y computacional .
- Disponibilidad de herramientas de diseño y análisis bien establecidas (Kuo, 1987).
- Facilitan la implementación de controladores distribuidos en sistemas multi-agente (Trejo et al., 2021b).

Sin embargo, su principal limitación radica en que son válidos únicamente en la vecindad del punto de operación utilizado para la linealización. Fuera de esa región, pueden representar de manera imprecisa la dinámica real del cuadricóptero.

3.2 Modelos LPV

Los modelos LPV extienden la capacidad de los modelos lineales al permitir que las matrices del sistema varíen en función de ciertos parámetros medibles o estimables (conocidos como *scheduling variables*), manteniendo una forma lineal:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\rho(t))x(t) + B(\rho(t))u(t), \\ y(t) &= C(\rho(t))x(t), \end{aligned} \tag{3}$$

Donde $\rho(t)$ es el vector de parámetros variantes en el tiempo, medible o estimable en línea, que captura las dependencias no lineales del sistema.

En el contexto de MAS, el uso de LPV permite modelar de forma más realista las variaciones dinámicas de los cuadricópteros a lo largo del tiempo (Trejo et al., 2023a).

Entre las ventajas del modelado LPV se encuentran:

- Mayor fidelidad respecto a la dinámica real del sistema.
- Mejora del desempeño del controlador en presencia de variaciones significativas.

No obstante, este enfoque también presenta desafíos importantes:

- Mayor complejidad computacional, especialmente al trabajar con múltiples agentes.
- Requiere conocer, estimar o medir en línea los parámetros scheduling.
- El diseño de controladores robustos para sistemas LPV es más demandante y menos estandarizado que para modelos LTI.

En la Tabla 1 se contrasta las capacidades de dos enfoques de modelado para sistemas multi-agente de cuadricópteros: modelos LTI y modelos LPV. La selección de estos enfoques se justifica por su prevalencia en aplicaciones de control cooperativo, donde equilibran complejidad computacional y precisión.

Tabla 1. Características clave y ventajas.

Característica	**Modelos LTI**	**Modelos LPV**
Escalabilidad	Alta	Alta
Variación paramétrica	No	Sí
Robustez	Con extensiones	Sí (inherente)
Adaptación en tiempo real	Limitada	Sí

A continuación, se resumen sus características clave:

- Escalabilidad: Ambos modelos permiten diseñar estrategias de control distribuido para múltiples agentes, pero con diferencias en su implementación práctica.
- Manejo de variaciones paramétricas: Los LPV capturan explícitamente no linealidades mediante parámetros variables (ej: efectos aerodinámicos dependientes de velocidad), mientras que los LTI requieren linealizar alrededor de puntos de operación fijos.
- Robustez: LTI: Logran tolerancia a fallos mediante extensiones (ej: control H_∞) y LPV: Incluyen robustez estructural gracias a su formulación matemática (ej: ajuste automático de ganancias).
- Adaptación en tiempo real: Los LPV permiten reconfiguración dinámica.

4. ESTRATEGIAS DE CONTROL DE SMA

El control multi-agente en cuadricópteros busca coordinar el comportamiento de múltiples vehículos aéreos no tripulados para lograr tareas colaborativas como el seguimiento de trayectorias, la formación de patrones o el posicionamiento relativo (Lizzio et al., 2022). Las estrategias de control dependen estrechamente del tipo de modelo dinámico utilizado, ya sea LTI o LPV.

4.1 Control basado en modelos LTI

Los modelos LTI han sido utilizados en el diseño de controladores para sistemas multi-agente debido a su simplicidad y a la disponibilidad de métodos bien desarrollados. Las principales estrategias en este contexto incluyen:

- Control de formación: Se define una geometría deseada entre agentes que se mantiene en el tiempo mediante controladores distribuidos.
- Consenso: Los agentes alcanzan un acuerdo sobre ciertas variables (posición, velocidad, orientación).
- Seguimiento de trayectoria: Los agentes siguen trayectorias de referencia individuales o colectivas, manteniendo la cohesión del grupo.

Muchos trabajos se enfocan en el diseño de controladores distribuidos basados en consenso. Se utilizan herramientas como LQR (Mohammadi et al., 2024), realimentación por estados, e incluso controladores basados en observador. Estos métodos permiten garantizar la estabilidad y la convergencia bajo topologías de comunicación fijas.

Aunque efectivos, los enfoques LTI presentan limitaciones en escenarios altamente dinámicos o no lineales, ya que la validez del modelo se restringe a condiciones específicas.

4.2 Control basado en modelos LPV

El uso de modelos LPV permite diseñar controladores que se adaptan a las variaciones dinámicas del sistema, lo cual

es especialmente útil cuando los cuadricópteros operan fuera de condiciones nominales (por ejemplo, con cambios bruscos de velocidades o cargas).

Entre las estrategias más comunes destacan:

- **Control robusto**: Técnicas como H_∞ permite mantener el desempeño ante incertidumbres y perturbaciones.
- **Ganancia programada**: Se ajustan las ganancias del controlador en tiempo real según los valores de los parámetros *scheduling*.

Casos prácticos:

Algunos estudios han demostrado mejoras significativas en precisión y robustez usando controladores LPV, especialmente en escenarios donde el modelo lineal LTI no es suficiente. Sin embargo, la complejidad computacional limita en parte su aplicación en tiempo real y en sistemas distribuidos con recursos limitados.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una revisión de los enfoques de modelado y control de sistemas multi-agente aplicados a cuadricópteros, centrándose en el análisis comparativo entre los modelos lineales invariantes en el tiempo y los modelos con parámetros variantes. Se destacó que los modelos LTI, debido a su simplicidad y herramientas bien establecidas, siguen siendo ampliamente utilizados en escenarios donde las condiciones operativas permanecen cercanas a un punto de equilibrio. Por otro lado, los modelos LPV ofrecen mayor fidelidad y adaptabilidad frente a variaciones dinámicas.

Aunque los avances en control de SMA aplicados a cuadricópteros han sido notables, varios desafíos persisten. Algunos de los retos más relevantes incluyen el desarrollo de estrategias de control efectivas para sistemas multi-agentes heterogéneos, donde los agentes pueden tener diferentes capacidades dinámicas. Asimismo, la robustez frente a fallas en los actuadores, sensores o enlaces de comunicación sigue siendo un área importante de investigación.

Otro aspecto importante es la adaptación a topologías de comunicación dinámicas, donde los enlaces entre agentes pueden cambiar debido a interferencias, movilidad o pérdida de señal. A lo anterior se suma la necesidad de desarrollar algoritmos con eficiencia computacional, capaces de ejecutarse a bordo de equipos con recursos limitados.

Finalmente, un desafío importante son las topologías cambiantes y los retrasos en las comunicaciones complican aún más el consenso y las tareas coordinadas de recuperación o formación, por lo que se requieren algoritmos de control robustos para mantener la estabilidad del sistema (Zhang et al., 2019)

REFERENCIAS

Campion, M., Ranganathan, P., and Faruque, S. (2018). Uav swarm communication and control architectures: a review. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7(2), 93–106.

Carrascosa, C., Enguix, F., Rebollo, M., and Rincon, J. (2023). Consensus-based learning for mas: definition, implementation and integration in ives.

Chamseddine, A., Zhang, Y., Rabbath, C.A., Join, C., and Theilliol, D. (2012). Flatness-based trajectory planning/replanning for a quadrotor unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 48(4), 2832–2848.

Espinosa, P.A.D., Vazquez Trejo, J.A., Adam Medina, M., and García Morales, J. (2023). Robust observer-based leader-following consensus control robust for multi-agent systems to external disturbances. *Tecnología y ciencia aplicada*, 6(2), 70–75.

Ghazbi, S.N., Aghli, Y., Alimohammadi, M., and Akbari, A.A. (2016). Quadrotors unmanned aerial vehicles: A review. *International journal on smart sensing and Intelligent Systems*, 9(1), 309.

Kuo, B.C. (1987). *Automatic control systems*. Prentice Hall PTR.

Lewis, F.L., Zhang, H., Hengster-Movric, K., and Das, A. (2013). *Cooperative control of multi-agent systems: optimal and adaptive design approaches*. Springer Science & Business Media.

Lizzio, F.F., Capello, E., and Guglieri, G. (2022). A review of consensus-based multi-agent uav implementations. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 106(2), 43.

Mohammadi, N., Mazloumi, M.M., and Tayefi, M. (2024). Hexagonal formations in leaderless quadcopter networks using rl and lqr controller.

Ogata, K. (2020). Modern control engineering.

Rios, H., Obet, I., et al. (2024). Análisis y diseño de un método de control cooperativo de sistemas autónomos bajo degradación de componentes–aplicación a una flota de drones en presencia de degradación de batería.

Sadeghzadeh, I., Chamseddine, A., Theilliol, D., and Zhang, Y. (2014). Linear parameter varying control synthesis: State feedback versus h_∞ technique with application to quadrotor ua v. In *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1099–1104. IEEE.

Shamma, J.S. (2012). An overview of lpv systems. *Control of linear parameter varying systems with applications*, 3–26.

Susbielle, P., Namigtle-Jimenez, A., Guerrero-Castellanos, J.F., Marchand, N., Mendoza-Robles, N., Durand, S., Díaz-Téllez, J., and Enríquez-Caldera, R. (2024). Towards a digital twin for cooperative load transportation involving multiple multirotor drones. In *2024 Congreso Nacional de Control Automático*, volume 7, 30–36.

Thusoo, R., Jain, S., and Bangia, S. (2021). Quadrotors in the present era: a review. *Information Technology in Industry*, 9(1), 164–178.

Trejo, J.A.V. (2020). Control de formación distribuido para una flotilla de vehículos autónomos basado en sistemas multi-agentes.

Trejo, J.A.V., Ponsart, J.C., Adam-Medina, M., Valencia-Palomo, G., and Theilliol, D. (2023a). Distributed observer-based leader-following consensus control for lpv multi-agent systems: Application to multiple vtol-uavs formation control. In *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1316–1323. doi: 10.1109/ICUAS57906.2023.10156012.

Trejo, J.A.V., Adrien, G., Manuel, A.M., Jean-Christophe, P., Laurent, C., Damiano, R., and Didier, T. (2021a). Event-triggered leader-following formation control for multi-agent systems under communication faults: application to a fleet of unmanned aerial vehicles. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 32(5), 1014–1022.

Trejo, J.A.V., Chadli, M., Rotondo, D., Medina, M.A., and Theilliol, D. (2022). Event-triggered fault-tolerant leader-following control for homogeneous multi-agent systems. *IFAC-PapersOnLine*, 55(6), 79–84.

Trejo, J.A.V., Rotondo, D., Medina, M.A., and Theilliol, D. (2021b). Observer-based fault-tolerant leader-following control for multi-agent systems. In *2021 European Control Conference (ECC)*, 2285–2290. IEEE.

Trejo, J.A.V., Rotondo, D., Theilliol, D., and Adam Medina, M. (2023b). Observer-based quadratic boundedness leader-following control for multi-agent systems. *International Journal of Control*, 96(5), 1314–1323.

Téllez, D.E., Medina, M.A., Trejo, J.A.V., and Pedroza, A.D.E. (2024). Fault estimation in multi-agent systems: A distributed pi observer approach. *Tecnología y ciencia aplicada*, 7(2), 91–95.

Zhang, W., Zeng, J., Yan, Z., Wei, S., Zhang, J., and Yang, Z. (2019). Consensus control of multiple auvs recovery system under switching topologies and time delays. *IEEE Access*, 7, 119965–119980. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935104.

Zheng, Y., Zhu, Y., and Wang, L. (2011). Consensus of heterogeneous multi-agent systems. *IET Control Theory & Applications*, 5(16), 1881–1888.

Innovation without Connection: Mobile Robotics App for Communities

C. J. Mendoza Cruz * **A. Sánchez Cruz** * **I. I. Zetina Rios** *
R. Pacheco Sánchez * **D. A. Serrano Cruz** **

* *ITSMIGRA, Tecnológico Nacional de México, 71140 San Miguel el Grande, Oax.*
** *Instituto Tecnológico de Cuautla, Libramiento Cuautla-Oaxaca S/N Juan Morales, 62745 Cuautla, Mor.*

email: israelisaac.zr@smiguelgde.tecnm.mx,
rosalba.ps@smiguelgde.tecnm.mx,
alejandra.serrano17ee@cenidet.edu.mx

Abstract: M-Learning (mobile learning) enables flexible access to educational content anytime and anywhere, fostering interactivity and personalized learning experiences. However, in many communities, limited or no internet access restricts the adoption of emerging technologies like robotics, forcing reliance on traditional, less efficient methods. This study presents the development of an offline mobile application built with FlutterFlow, designed to teach robotics through intuitive interfaces featuring text, images, videos, and interactive games that enhance comprehension and retention. Results demonstrate that this solution not only improves learning outcomes but also advances technological inclusion and equitable access in resource-constrained settings.

Keywords: M-Learning, Robotics, Mobile Application, Flutter Flow, Interactive Learning.

1. INTRODUCCIÓN

El acceso limitado a las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y a la educación en diversas localidades representa un desafío significativo para el desarrollo social y económico. La brecha digital y la falta de infraestructura educativa impiden que muchas comunidades accedan a oportunidades de aprendizaje, limitando su crecimiento profesional y reduciendo su competitividad en un mundo cada vez más digitalizado. Este problema afecta especialmente a poblaciones rurales o de bajos recursos, donde la conectividad y los recursos educativos son insuficientes. La falta de acceso a la educación digital no solo impacta la formación académica, sino que también restringe el acceso a información actualizada, impidiendo la alfabetización digital y la inclusión en la economía global (Cornelio et al., 2024; Calleros et al., 2024). En México, la brecha digital se manifiesta en distintas dimensiones. A nivel geográfico, mientras que en las áreas urbanas el acceso a internet alcanza el 62%, en las zonas rurales se reduce al 19% (Domínguez, 2020). En el ámbito educativo, el 55% de los estudiantes carece de los recursos financieros necesarios para acceder a internet o a una computadora, lo que limita su participación en actividades educativas (Arellano Morales, 2020).

Recientemente, diversos autores presentan algunas alternativas para mejorar el aprendizaje. En los últimos años, el uso de dispositivos móviles en el ámbito educativo ha crecido significativamente, especialmente en la educación superior. Este fenómeno, conocido como M-Learning (aprendizaje móvil), ha demostrado ser una herramienta eficaz para mejorar la calidad del aprendizaje, ya que permite el acceso a contenido educativo en cualquier momento y lugar, además de ofrecer interactividad y personalización. El uso de las TIC y aplicaciones móviles es beneficioso para el proceso educativo universitario y ha permitido relacionarse y desarrollar nuevas habilidades y conocimientos, en muchos casos superando el dominio que los docentes tienen sobre estas herramientas (Rodríguez Zambrano et al., 2019). En Pascuas-Rengifo et al. (2020) se destaca la importancia de adaptar plataformas y contenidos al M-Learning, considerando los dispositivos móviles clave para la innovación educativa. En Cubillo (2021) se resalta que las aplicaciones educativas mejoran el rendimiento en matemáticas, incrementan la motivación estudiantil y facilitan el aprendizaje, convirtiéndose en una herramienta clave en la enseñanza moderna. Salica y Almirón (2020) destaca que la interacción con dispositivos inteligentes fomenta nuevas formas de expresión y conocimiento tecno-social, potenciando habilidades clave para el aprendizaje electrónico, ubicuo y distribuido en el ámbito educativo. Las aplicaciones móviles educativas, con diseños dinámicos y juegos, son viables económicamente y tecnológicamente para reforzar aprendizajes Quishpe-López y Vinueza-Vinueza (2021).

La principal contribución de este artículo es el desarrollo de una plataforma educativa offline, creada con FlutterFlow, orientada a la enseñanza de circuitos electrónicos y robótica básica. A diferencia de otras aplicaciones disponibles que requieren conexión a internet y abordan temas generales, esta solución ofrece contenido técnico

⋆ This work was not supported by any organization.

especializado accesible en modo offline. La plataforma integra tutoriales, videos y juegos interactivos, optimizados para dispositivos de gama baja, posicionándose como una alternativa accesible, eficaz y adaptada a las necesidades de estudiantes en entornos con limitaciones tecnológicas.

2. PERSPECTIVAS CONCEPTUALES SOBRE APLICACIONES MÓVILES EN CONTEXTOS EDUCATIVOS

En los últimos años, las aplicaciones móviles han revolucionado la educación al ofrecer aprendizajes más flexibles, personalizados y accesibles, convirtiéndose en herramientas clave que complementan o sustituyen los métodos tradicionales.

Desde una perspectiva pedagógica, las aplicaciones móviles permiten implementar metodologías centradas en el estudiante. Plataformas como Duolingo (Munday, 2016; Teske, 2017), utilizada para el aprendizaje de idiomas, promueven el desarrollo de habilidades mediante dinámicas gamificadas, ejercicios breves y retroalimentación inmediata. De igual forma, Khan Academy (Cardona and Rodriguez, 2021; Farfán-Pimentel et al., 2022) ofrece lecciones en video y ejercicios prácticos que permiten a los estudiantes avanzar a su propio ritmo. Estas aplicaciones fomentan el aprendizaje autónomo, refuerzan la motivación intrínseca y permiten una experiencia educativa más dinámica y atractiva.

En cuanto a la perspectiva tecnológica, las aplicaciones educativas han incorporado avances como la inteligencia artificial (Aguilar et al., 2023), la realidad aumentada (Montenegro-Rueda and Fernández-Cerero, 2022) y los sistemas de recomendación personalizados. Herramientas como Quizlet, que permite crear y compartir tarjetas de estudio interactivas, o Mondly, que emplea tecnologías de reconocimiento de voz para mejorar la pronunciación en idiomas extranjeros, ejemplifican cómo la innovación tecnológica potencia la calidad del aprendizaje. Estas plataformas no solo ofrecen contenido, sino que adaptan la experiencia al perfil de cada usuario, maximizando la eficiencia en la adquisición de conocimientos.

Desde una perspectiva social, las aplicaciones móviles ayudan a reducir la brecha digital al facilitar el acceso a contenidos educativos en comunidades marginadas o rurales, promoviendo la inclusión y disminuyendo las desigualdades en el proceso educativo.

Desde la perspectiva institucional, se destaca la necesidad de integrar estratégicamente las aplicaciones móviles mediante políticas adecuadas, capacitación docente y rediseño curricular. En conjunto, se reconoce que estas herramientas representan un cambio estructural en la educación, cuyo impacto continuará creciendo con el desarrollo de soluciones más accesibles y centradas en el usuario.

3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la aplicación móvil offline de robótica, se adoptó una metodología de desarrollo de software basada en el modelo ágil, combinando elementos de Scrum, un enfoque ampliamente utilizado en proyectos de software debido a su flexibilidad y enfoque iterativo (Sommerville, 2011; Roger, 2010; Laínez Fuentes, 2014). Esta estrategia permite una adaptación constante a las necesidades del usuario y una mejora continua mediante entregas incrementales. Bajo esta metodología, el Product Owner, el Scrum Master y el equipo de desarrollo desempeñaron roles clave en la planificación, implementación y prueba de la aplicación. Se priorizaron funcionalidades como la operatividad offline, la interactividad del contenido y la facilidad de uso de la interfaz.

Las fases implementadas en el desarrollo del proyecto se detallan a continuación.

3.1 Planificación (Definición del Product Backlog y objetivos del sprint)

En esta fase se realizó un levantamiento de requisitos y se estructuró el *Product Backlog*, donde se listaron las funcionalidades necesarias para cumplir con los objetivos del proyecto.

Actividades clave:

1. Análisis de requerimientos.

Se llevó a cabo un estudio en instituciones de nivel medio superior y superior en San Miguel el Grande, Oaxaca, para identificar las limitaciones en acceso a tecnología educativa y conectividad, con énfasis en el aprendizaje de circuitos electrónicos y robótica básica. Se aplicaron encuestas a 15 estudiantes y 8 docentes, una muestra pequeña pero representativa dado el contexto local. Según la Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024) (véase Fig. 1), Oaxaca presenta una cobertura de acceso a internet de aproximadamente el 60%, posicionándose entre las entidades con menor acceso. Esta brecha digital persiste en zonas rurales como San Miguel el Grande, limitando el número de usuarios potenciales y dificultando la integración de tecnologías en la educación. Además, se realizaron entrevistas con especialistas para comprender las barreras pedagógicas y tecnológicas. Los resultados evidencian que muchos estudiantes carecen de acceso regular a internet en sus hogares y que las instituciones cuentan con recursos digitales limitados, reflejando una importante brecha en el uso y conocimiento de herramientas interactivas para la enseñanza.



Fig. 1. Mapa de encuesta ENDUTIH 2024

Los resultados revelan la necesidad de desarrollar una plataforma educativa offline, creada con FlutterFlow, que

permita a los estudiantes acceder a contenidos interactivos sin depender de internet. Esta solución busca fomentar un aprendizaje accesible, autónomo y equitativo, especialmente en contextos con limitaciones tecnológicas como San Miguel el Grande. Tras analizar los requerimientos, se definieron las funcionalidades clave para atender las necesidades detectadas, garantizando una solución innovadora y viable para entornos con baja conectividad.

- Acceso en modo offline, permitiendo el uso de la plataforma sin conexión a internet.
- Interfaz intuitiva y adaptada a estudiantes de distintos niveles educativos.
- Visualización de contenido educativo a través de módulos interactivos orientados a la enseñanza de robótica.
- Módulo de evaluaciones integradas mediante juegos educativos, como cuestionarios, emparejamiento de conceptos y crucigramas.

2. *Sprint planning.*

Se estructuró el desarrollo en cuatro sprints que cubren las etapas clave del proyecto, organizados durante determinados periodos.

a) Análisis y definición

b) Documentación y configuración inicial

c) Desarrollo del Contenido educativo

d) Juegos interactivos y carga de los últimos módulos

Para el Sprint Planning, se asignaron los siguientes roles dentro del equipo Scrum:

Roles del equipo scrum

- Product Owner: I. I. Zetina Rios, R. Pacheco Sánchez. C. J. Mendoza Cruz y A. Sánchez Cruz.
- Scrum Master: C. J. Mendoza Cruz.
  - Facilitador de reuniones y removedor de obstáculos.
- Equipo de Desarrollo: C. J. Mendoza Cruz y A. Sánchez Cruz.
  - Implementación técnica.

Esta distribución de roles permitió una planificación eficiente y colaborativa para alcanzar los objetivos del sprint.

3.2 Fase de ejecución (Desarrollo e implementación de funcionalidades por sprints)

En esta fase, se implementaron las funcionalidades definidas en el **Sprint Planning**, con reuniones de seguimiento para evaluar avances y resolver bloqueos. También se realizaron pruebas continuas para asegurar el correcto funcionamiento de las características desarrolladas.

Sprint 1. Análisis y definición

Objetivo: Establecer requisitos, selección de tecnología y planificación inicial.

Se establecieron los cimientos técnicos del proyecto, configurando el FlutterFlow y definiendo la arquitectura base del sistema. Además, se implementó la navegación entre pantallas, permitiendo una transición fluida entre secciones. Estas acciones dieron lugar a una serie de Resultados: clave, entre ellos:

- Documentación de requisitos y alcance.
- Selección de FlutterFlow como herramienta principal.
- Definición de objetivos generales y específicos.
- Delimitaciones técnicas y funcionales.

Sprint 2. Documentación y configuración inicial

Objetivo: Establecer la estructura base de la aplicación y avanzar en la documentación técnica del proyecto.

Durante esta fase, se consolidaron los elementos fundamentales del sistema, como se observa en la Fig. 2, asegurando una base sólida para el desarrollo de la aplicación. Los principales avances de este sprint incluyen

- **Diseño de interfaces:** Se completó el diseño preliminar de interfaces clave en FlutterFlow, incluyendo pantallas como el menú principal y secciones de lecciones y progreso.
- **Arquitectura modular:** Se definió una estructura modular para el contenido educativo, facilitando la expansión futura del sistema.
- **Planificación técnica:** Se avanzó en la planificación técnica, definiendo la integración de componentes y detallando las tecnologías utilizadas.
- **Creación del proyecto en FlutterFlow:** El proyecto "RoboLearn" fue configurado en FlutterFlow, permitiendo la integración inicial de recursos educativos y pruebas de diseño.



Fig. 2. Menú principal de la aplicación

Sprint 3. Desarrollo del Contenido educativo.

Objetivo: Cargar material educativo y estructurar el currículo del curso.

Durante el Sprint 3, centrado en el desarrollo de contenido (véase la Fig. 3), se trabajó en la carga y organización del material educativo dentro de la aplicación. En primer lugar, se elaboró un plan de estudios detallado que define la estructura curricular del curso, incluyendo los temas, objetivos y distribución del contenido por módulo.

Posteriormente, se llevó a cabo la carga de diversos recursos educativos, tales como videos, imágenes ilustrativas y lecturas complementarias, diseñados para enriquecer la experiencia de aprendizaje de los usuarios. Estos materiales fueron integrados directamente en la interfaz de la aplicación, asegurando que cada recurso esté vinculado de

forma clara y accesible dentro de los módulos correspondientes.

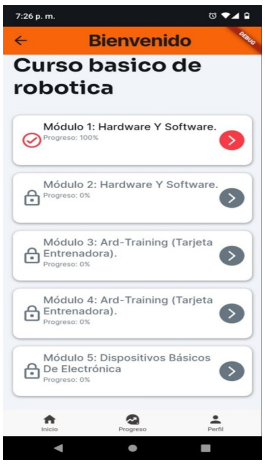


Fig. 3. Estructura y contenido de la aplicación RoboLearn

- **Plan de estudios detallado:** Se elaboró un plan de estudios con la estructura curricular completa para los módulos del curso.
- **Carga de materiales educativos:** Se cargaron videos, imágenes y lecturas en el sistema, proporcionando contenido multimedia para enriquecer la experiencia educativa.
- **Integración de recursos en la interfaz:** Los recursos educativos fueron integrados en la interfaz de usuario, permitiendo un acceso fluido y organizado.

Sprint 4: Juegos interactivos y carga de los últimos módulos

Objetivo: Implementar mecanismos de retroalimentación interactiva y completar la carga de material educativo.

Durante este sprint se avanzó en dos áreas clave del desarrollo de la aplicación: **la implementación de mecanismos de retroalimentación** y la **finalización de la carga de material educativo**. Se completó la incorporación de videos, imágenes y lecturas correspondientes a los módulos restantes, cerrando así el ciclo de integración del contenido curricular dentro de la plataforma, como se muestra en la Fig. 4. Además, se desarrollaron e integraron diversos juegos educativos interactivos, tales como quizzes, actividades de emparejamiento y crucigramas, como se muestra en la Fig. 5.

Estos recursos permiten reforzar el aprendizaje de manera lúdica y participativa, mejorando la experiencia del usuario y fomentando la comprensión de los temas abordados proporcionando indicaciones clave para que el usuario complete correctamente las palabras dentro de la cuadrícula. Este diseño de actividad interactiva refuerza el aprendizaje al presentar conceptos clave en un formato dinámico y atractivo.

3.3 Fase de monitoreo y control (pruebas y corrección de errores)

Mientras se desarrollaban las funcionalidades en los sprints, simultáneamente se realizaron pruebas continuas para garantizar la calidad y usabilidad de la aplicación.

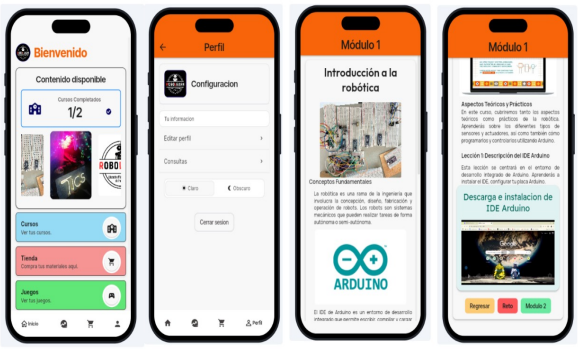


Fig. 4. Interfases de la aplicación

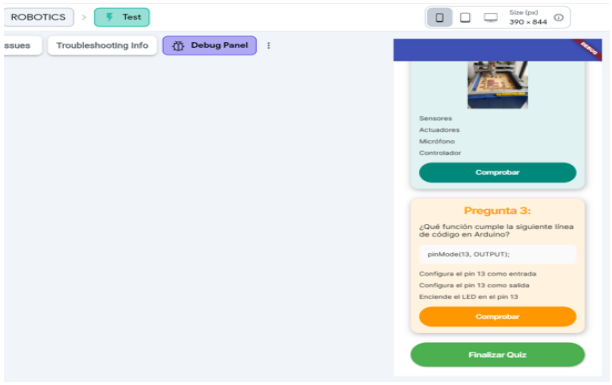


Fig. 5. Juego de relación de palabras

- Pruebas funcionales y de usabilidad.

  Se evaluó el desempeño de la aplicación en dispositivos móviles con sistema operativo Android, incluyendo equipos de gama baja y media. Los resultados confirmaron un rendimiento estable, con tiempos de carga óptimos y una experiencia de usuario fluida. Durante las pruebas funcionales se validaron aspectos clave como el inicio de sesión, la navegación entre módulos y la respuesta del sistema a diversas interacciones, sin presentar interrupciones ni errores.

  En cuanto a la usabilidad, la interfaz resultó intuitiva y fácil de explorar, con transiciones rápidas y navegación eficiente, lo que favorece una interacción accesible y satisfactoria para el usuario.

- Pruebas de compatibilidad.

  Se realizó una evaluación de compatibilidad en diferentes dispositivos móviles con sistema operativo Android, verificando su funcionamiento en múltiples configuraciones de hardware y versiones del sistema. Se definió como requisito mínimo Android 7.0 (Nougat), lo que permite un desempeño estable y eficiente incluso en equipos con recursos limitados, sin comprometer la funcionalidad ni la experiencia general del usuario.

- Detección y corrección de errores.

Se identificaron problemas en la navegación y carga de contenido offline, los cuales fueron corregidos en el sprint final.

3.4 Retrospectiva (Sprint Review)

Tras concluir los sprints planificados, se presentó la primera versión funcional de la aplicación durante la Sprint Review, validando su desempeño general y cumplimiento de objetivos. Las pruebas finales confirmaron la correcta implementación de las funciones clave.

Una encuesta aplicada a los usuarios reveló una experiencia mayormente positiva, destacando la fluidez en la navegación y la claridad de los elementos visuales. Sin embargo, se identificaron áreas de mejora, como la optimización del modo oscuro, ajustes en el diseño de interfaz y la necesidad de integrar recursos adicionales, como un simulador de Arduino y una guía para nuevos usuarios.

Aunque la aplicación ya está operativa, el proyecto continúa en desarrollo mediante un enfoque ágil, que permitirá incorporar mejoras progresivas y responder de forma flexible a las necesidades del entorno educativo.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en las pruebas finales reflejan que la aplicación móvil cumple con los objetivos planteados, proporcionando una experiencia de usuario estable, intuitiva y funcional en distintos dispositivos android de gama baja y media.

Evaluación de funcionalidad y usabilidad

Se llevó a cabo una prueba de usabilidad inicial con la participación de entre cinco y diez usuarios por grupo objetivo, siguiendo la recomendación de Jakob Nielsen, experto en usabilidad, quien señala que con tan solo cinco usuarios se pueden identificar hasta el 85%de los problemas de usabilidad. En esta fase, se aplicó una encuesta de evaluación a siete participantes, con el propósito de medir aspectos clave como el rendimiento, la facilidad de navegación y la experiencia general de uso de la aplicación, como se muestra en la Fig. 6. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

- 86% de los participantes consideraron que la navegación dentro de la aplicación es intuitiva y fácil de comprender.
- 100% de los encuestados pudieron acceder sin problemas a las funciones principales, como el inicio de sesión, la selección de cursos y el sistema de evaluación interactiva.
- Los usuarios destacaron la fluidez en la carga de los contenidos y la estabilidad del sistema, permitiendo una transición eficiente entre secciones sin retrasos significativos. Además, se resaltó la implementación del modo oscuro como una buena opción para mejorar la accesibilidad a la aplicación.

Optimización del aprendizaje y acceso equitativo a la tecnología

Los resultados demuestran que esta solución mejora el aprendizaje y promueve el acceso equitativo a tecnología educativa especializada, incluso en contextos con recursos

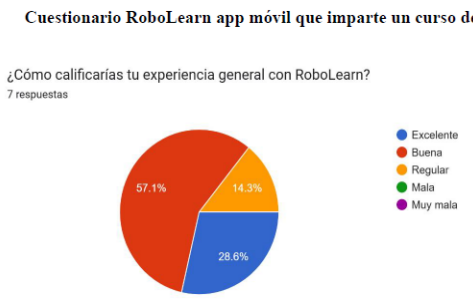


Fig. 6. Encuesta de evaluación de la aplicación

limitados, gracias a su diseño adaptable y compatibilidad con diversos dispositivos.

En la Fig. 7, se presentan pantallas de evaluación interactiva, donde se observa la entrega cuestionarios sobre temas de programación y robótica. La interfaz es clara y estructurada, lo que facilita la interacción con las preguntas y respuestas, además de proporcionar retroalimentación inmediata.

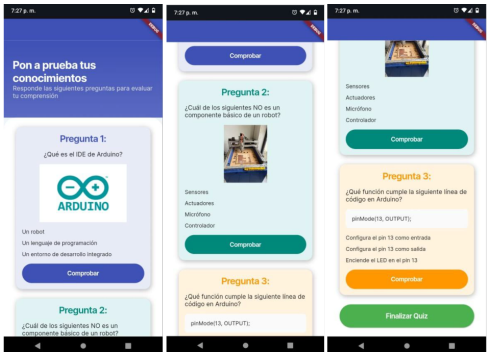


Fig. 7. Evaluación interactiva mediante cuestionario

La Fig. 8 muestra la implementación de la opción de modo oscuro, diseñada para mejorar la experiencia visual y adaptar la interfaz a diversas condiciones de iluminación. La Fig. 9 muestra la relación entre las diferentes interfaces dentro de la aplicación, destacando cómo se conectan los módulos principales como el menú inicial, las lecciones interactivas, los juegos educativos y el seguimiento del progreso del usuario. Esta estructura permite una navegación fluida y coherente, facilitando la experiencia de aprendizaje desde distintos puntos de entrada dentro de la plataforma.

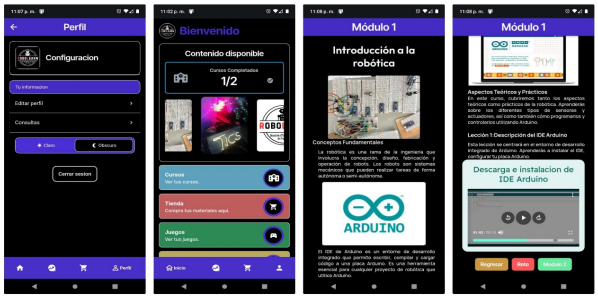


Fig. 8. Modo oscuro aplicado a la interfaz

La evidencia recopilada y los resultados obtenidos confirman que la aplicación es una herramienta funcional,

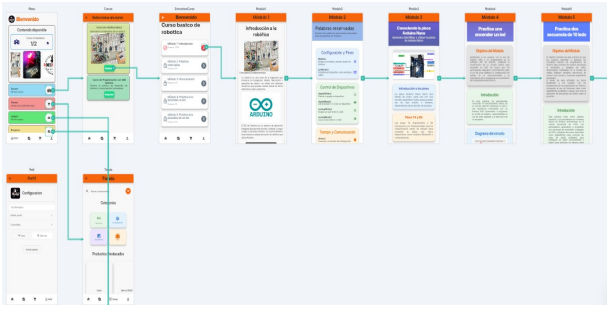


Fig. 9. Relación de interfases

accesible y eficiente para el aprendizaje, ofreciendo una experiencia optimizada tanto en términos de navegación como de rendimiento técnico.

5. CONCLUSIÓN

Este trabajo presentó el desarrollo de una plataforma educativa offline, creada con FlutterFlow, diseñada para facilitar la enseñanza de robótica básica en comunidades con acceso limitado a internet, como San Miguel el Grande, Oaxaca. La solución busca atender la brecha digital persistente en contextos rurales mediante contenidos interactivos accesibles sin conexión, tales como videos, tutoriales y actividades didácticas.

Los resultados obtenidos durante las pruebas funcionales y de usabilidad demostraron que la aplicación tiene un rendimiento estable en dispositivos móviles Android de gama baja y media, garantizando una experiencia fluida e intuitiva. La navegación entre módulos fue evaluada positivamente, y se comprobó el correcto funcionamiento de las funciones principales, como el acceso al sistema y la visualización de contenidos. Además, la integración del contenido educativo permitió una mejor comprensión de conceptos clave en circuitos electrónicos, mostrando que es posible lograr un aprendizaje significativo sin conectividad constante.

Las encuestas aplicadas a usuarios finales reflejaron una experiencia mayormente satisfactoria, aunque también permitieron identificar áreas de mejora importantes, como la optimización del modo oscuro, la reorganización de módulos para mejorar la experiencia visual, y la incorporación de recursos adicionales como simuladores, retroalimentación automatizada e instrucciones iniciales.

En trabajos futuros, Se plantea mejorar la plataforma mediante la incorporación de inteligencia artificial para personalizar el aprendizaje, realidad aumentada para visualizar circuitos, y funciones de colaboración offline entre dispositivos. Además, se proyecta implementar microlearning para facilitar el estudio con lecciones breves y adaptar la aplicación a otros entornos operativos como iOS y web, ampliando así su accesibilidad y alcance.

REFERENCES

Aguilar, G.M.F., Gavilanes, D.C.A., Freire, E.M.A., and Quincha, M.L. (2023). Inteligencia artificial y la educación universitaria: Una revisión sistemática. *Magazine de las ciencias: Revista de Investigación e Innovación*, 8(1), 109–131.

Arellano Morales, M.A. (2020). Las brechas digitales en méxico: un balance pertinente. *El trimestre económico*, 87(346), 367–402.

Calleros, C.B.G., García, J.G., and Calleros, J.M.G. (2024). Addressing the digital divide with educational systems in mexico: Challenges and opportunities. *From Digital Divide to Digital Inclusion: Challenges, Perspectives and Trends in the Development of Digital Competences*, 347–375.

Cardona, L.A.L. and Rodriguez, K.N.C. (2021). Khan academy como herramienta en el aprendizaje de las matemáticas y la programación. *Revista Interamericana de Investigación Educación y Pedagogía RIIEP*, 14(1), 225–250.

Cornelio, O.M., Rodríguez, A.R., Álava, W.L.S., Mora, P.G.A., Mera, L.M.S., and Bravo, B.J.P. (2024). La inteligencia artificial: desafíos para la educación. *Editorial Internacional Alema*.

Domínguez, M.M. (2020). La desigualdad digital en méxico: un análisis de las razones para el no acceso y el no uso de internet. *PAAKAT: revista de tecnología y sociedad*, (19).

Farfán-Pimentel, J.F., Lizandro-Crispín, R., Rodríguez-Galán, D.B., Calderon-Chambi, M.E., and Farfán-Pimentel, M.D.E. (2022). Estrategia khan academy en el aprendizaje de la matemática en la educación básica: una revisión teórica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 6871–6887.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2024). Encuesta nacional sobre disponibilidad y uso de tecnologías de la información en los hogares (endutih) 2024.

Laínez Fuentes, J.R. (2014). *Desarrollo de software ágil: Extreme Programming y Scrum*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 1st edition.

Montenegro-Rueda, M. and Fernández-Cerero, J. (2022). Realidad aumentada en la educación superior: posibilidades y desafíos. *Revista Tecnología, Ciencia y Educación*, 95–114.

Munday, P. (2016). The case for using duolingo as part of the language classroom experience (duolingo como parte del curriculum de las clases de lengua extranjera).

Pascuas-Rengifo, Y.S., Garcia-Quintero, J.A., and Mercado-Varela, M.A. (2020). Dispositivos móviles en la educación: tendencias e impacto para la innovación. *Revista politécnica*, 16(31), 97–109.

Rodríguez Zambrano, A., Rocío Rey, E., Zambrano Cedeño, V., and Rodríguez Arieta, G. (2019). Tics y aplicaciones móviles en la educación superior; del dicho al reto. *Atlante Cuadernos de Educación y Desarrollo*, (enero).

Roger, S.P. (2010). *Ingeniería de Software: Un enfoque práctico*. McGraw -Hill.

Sommerville, I. (2011). *Ingeniería del software*. Pearson educación, 9 edition.

Teske, K. (2017). Duolingo. *Calico Journal*, 34(3), 393–401.

Contrasting Renewable Technologies through Life Cycle Analysis (LCA)

Morales Ramírez Ulises*, Gómez Lemus Teresa[1*], Ramírez López Raul[2*], González Huitron Victor[3*].

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Querétaro, Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo
Col. Centro, CP 76000, Querétaro, Qro. México.
(e-mail: { teresa.gl[1], raul.rl[2], victor.gh[3]}@queretaro.tecnm.mx).

Abstract: This study presents a comparative analysis based on a literature review of the environmental footprint of alternative electricity generation systems: photovoltaic panels, wind turbines, and hydroelectric plants. It draws on recent research that has applied Life Cycle Assessment (LCA) under ISO 14040 and 14044 regulations and standards.

Important points were identified, highlighting the manufacturing phase as the most emissions intensive for photovoltaic panels, the use of critical materials in wind turbines, and the disruption to aquatic ecosystems in hydroelectric plants.

The environmental assessment of these technologies throughout their entire life cycle is essential to determine their viability and sustainability, comparing key indicators such as carbon footprint, water footprint, and material consumption. The strengths and weaknesses of each technology are identified, providing valuable information for decision-making in the energy transition toward a more sustainable model.

This review highlights the importance of implementing mitigation and circular economy strategies to reduce the environmental impacts associated with each technology.

Keywords: Keywords: Life Cycle Assessment, Renewable Energy, Photovoltaic Panels, Aerogenerators, Hydroelectric Plants

1. Introducción

El cambio climático es uno de las mayores desafíos ambientales del siglo XXI. Se ha demostrado que la quema masiva de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica es uno de los principales factores que contribuyen a esta problemática (IPCC, 2021).

La transición hacia energías renovables es un pilar fundamental en la mitigación del cambio climático y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles. Entre las tecnologías sostenibles los paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y las centrales hidroeléctricas han cobrado gran relevancia, representando soluciones viables para la generación de energía limpia (ISO 14040, 2018). Sin embargo, es esencial evaluar el impacto ambiental total de estas tecnologías considerando todas las etapas de su ciclo de vida (Curran, 2021).

El aumento en la demanda de energía limpia ha impulsado el desarrollo tecnológico de estas tecnologías, promoviendo mejoras en su eficiencia y reducción de costos (REN21, 2022). Sin embargo, la generación renovable no está exenta de impactos ambientales, como el uso intensivo de materiales en su fabricación y la disposición de residuos al final de su vida útil (Hernández et al., 2023).

La sostenibilidad de estas tecnologías no debe evaluarse únicamente en función de su desempeño, durante la fase de operación, sino también considerando todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final.

El **Análisis de Ciclo de Vida** (ACV), se presenta como una herramienta fundamental e integral que permite cuantificar los impactos ambientales y guiar las decisiones informadas hacia un futuro energético más limpio y eficiente (ISO, 2006; Fthenakis, 2018).

Estudios recientes indican que los beneficios ambientales de las energías renovables dependen de su composición material, la eficiencia de conversión de energía y las estrategias de gestión al final de su vida útil (Müller et al., 2020).

GreenDelta señala que el ACV es una metodología esencial para evaluar los impactos ambientales asociados a los sistemas de generación de energía renovable, así como a cualquier producto o servicio. Su aplicación permite identificar los puntos críticos en cada etapa del ciclo de vida. A partir de ello,

se pueden establecer estrategias para reducir las emisiones de carbono, el consumo de recursos naturales y la generación de residuos (GreenDelta, 2020).

Este trabajo no aplica directamente el ACV, sino que realiza la revisión técnica y el contraste de estudios previos que han evaluado la huella ambiental de las tecnologías ya mencionadas, con el objetivo de identificar patrones comunes y diferencias clave en el contexto energético de México.

El presente estudio se centra en la evaluación comparativa de tres sistemas alternativos de generación de energía eléctrica: paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y centrales hidroeléctricas. El objetivo principal de este estudio, es identificar cómo está conformada la huella ambiental, evaluarla y contrastarla en cada una de estas tecnologías. Este análisis se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular los ODS 7, 12 y 13 (United Nations, 2022).

2. Metodología

El ACV proporciona una metodología integral para evaluar estos impactos y respaldar la planificación energética sostenible (ISO 14040, 2019).

Se realizó una revisión de la literatura basada en estudios e investigaciones que aplicaron el ACV en tecnologías renovables, dentro del contexto energético de México. Se seleccionaron investigaciones publicadas en revistas arbitradas y bases de datos científicas como: Scopus, ScienceDirect, Redalyc, Google Scholar, priorizando aquellos estudios con enfoques comparativos y uso de datos actualizados. Se realizó una revisión sistemática de literatura, evaluando 30 artículos científicos publicados entre 2015 y 2024.

Este estudio se centra en la evaluación de tecnologías renovables dentro del territorio mexicano. Se analizaron investigaciones enfocadas en diversas regiones con alto potencial energético.

Para la energía solar fotovoltaica, se consideraron estudios realizados en el norte de México, donde la irradiación solar supera los **5.5 kWh/m²/día** (CONUEE, 2021). En el caso de la energía eólica, se incluyeron estudios de Oaxaca y Yucatán, que presentan velocidades de viento entre **8-12 m/s y 5-7 m/s**, respectivamente (NREL, 2021; CENACE, 2021).

Para la energía hidroeléctrica, se revisaron investigaciones sobre proyectos en Chiapas y Veracruz, destacando la influencia del régimen hídrico en la eficiencia y sostenibilidad de estas instalaciones (Barros et al., 2021).

Este estudio busca comparar la huella ambiental de distintos sistemas alternativos de generación de energía eléctrica, con base en datos científicos y la metodología de ACV, con el objetivo de identificar cuál ofrece mayores beneficios en términos de sostenibilidad y menor impacto ambiental.

Normas ISO 14040 y 14044 en los estudios revisados

Las normas **ISO 14040 y 14044** proporcionan el marco metodológico para la evaluación del ACV en estudios ambientales. En la revisión realizada, se identificó que los estudios seleccionados aplicaron estas normas para definir los límites del sistema, recopilar datos de inventario y evaluar los impactos ambientales de cada tecnología renovable.

Estas normas permitieron establecer comparaciones estandarizadas entre los estudios revisados, asegurando la coherencia de los resultados en términos de emisiones de CO_2, consumo de agua y uso de materiales. La metodología empleada se basa en los lineamientos de las normas ISO 14040 y 14044.

El estudio consideró las siguientes etapas clave:

1. **Definición de objetivos y alcance:** Se evaluó y contrasto la huella ambiental integrada por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el consumo de recursos naturales e impactos en ecosistemas y efectos en la salud humana en cada uno de los sistemas alternativos de generación de energía, con base en estudios previos que aplican la metodológica de ACV.

2. **Inventario del ciclo de vida (ICV**): Recolección de datos sobre el uso de materiales, consumo de energía utilizada y emisiones generadas en cada etapa, se consideraron factores como la localización geográfica, la matriz energética y la disponibilidad de recursos naturales.

3. **Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV**): Se analizaron, evaluaron y contrastaron las huellas ambientales generadas en cada uno de los sistemas alternativos de generación de energía eléctrica: paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y centrales hidroeléctricas, incluyendo la huella de carbono y la huella hídrica. Cuantificación de los impactos ambientales, con énfasis en la huella de carbono (**CO_2-eq/kWh**) y huella hídrica (**m^3/MWh**).

4. **Interpretación de resultados:** Los datos obtenidos fueron analizados, para identificar puntos críticos y oportunidades de mejora. Esto permite formular estrategias de mejora y recomendaciones, para la optimización de cada tecnología en términos de eficiencia ambiental y reducción de impactos negativos.

Los criterios de selección incluyeron:

- La metodología empleada se basa en los lineamientos establecidos por las normas ISO 14040 y 14044, que regulan el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).
- Disponibilidad de datos cuantificables sobre huella ambiental, huella de carbono, huella hídrica y uso de materiales, en tecnologías renovables.
- Comparación de distintas fuentes de generación de energía renovable, para determinar patrones comunes.

- Inclusión de estudios con metodologías diversas para identificar puntos de convergencia y divergencia.
- Estudios basados en herramientas de software como OpenLCA y SimaPro.

Las categorías de impacto evaluadas incluyeron:

- **Huella de Carbono**: Emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2, metano, etc.) expresadas en **CO_2-eq/kWh**.
- **Huella Hídrica**: Uso de agua durante todo el ciclo de vida, expresada en **m^3/MWh**.
- **Huella Ambiental General**: Evaluación del impacto ambiental, en recursos naturales, biodiversidad y ecosistemas.

Asimismo, la combinación del ACV con enfoques de economía circular ha demostrado ser clave, para la sostenibilidad de las tecnologías renovables, promoviendo la reutilización de materiales y la minimización de residuos.

3. Resultados y Discusión

Comparación de la Huella Ambiental

Mediante la investigacion documental realizada en sistemas alternativos de generacion de energia electrica, aplicando la metodologia de ACV, los resultados obtenidos revelan diferencias significativas en las tecnologías evaluadas.

- **Paneles fotovoltaicos:** La fase de fabricación de los paneles fotovoltaicos genera un impacto ambiental considerable, principalmente por el uso intensivo de silicio y el consumo energético en su procesamiento.

  Emisiones promedio de (**20-50 g CO_2-eq/kWh)**, mientras que el consumo de agua ascendió a **1,5 m^3/MWh** (Fthenakis et al., 2022).

- **Aerogeneradores:** Impacto intermedio con emisiones (**5-20 g CO_2-eq/kWh)**, principalmente por la producción de acero en la torre y componentes mecánicos, siendo las aspas el componente con mayor contribución al impacto. (Arvesen & Hertwich, 2020).
- Presentan una baja huella de carbono en operación y un alto retorno energético, aunque el desecho de palas sigue siendo un problema ambiental relevante (Finkbeiner, 2019).

- **Centrales hidroeléctricas**: Su huella de carbono operativa disminuye **(5-50 g CO_2-eq/kWh)**, pero impactos hídricos elevados debido al almacenamiento y la evaporación en los embalses, alcanzando **40 m^3/MWh** (Barros et al., 2021).

Los resultados del ACV indicaron que:

- **Paneles Fotovoltaicos:** Presentan una huella de carbono significativamente menor en comparación con fuentes convencionales, aunque su producción requiere materiales críticos como el silicio y tierras raras.
- Emisiones moderadas de carbono durante la producción, principalmente debido a la purificación de silicio (Fthenakis, 2018).

- **Aerogeneradores:** Tienen un ciclo de vida más sostenible, gracias a su alta eficiencia energética durante la operación. No obstante, el transporte y la fabricación de las aspas representan una proporción considerable de las emisiones totales.
- Presentan una baja huella de carbono en operación y un alto retorno energético, aunque el desecho de palas sigue siendo un problema ambiental relevante (Finkbeiner, 2019).
- **Centrales Hidroeléctricas:** Aunque poseen una huella de carbono relativamente baja, se identificaron impactos hídricos y ecológicos significativos debido a la alteración de los ecosistemas acuáticos.
- Generan bajas emisiones de carbono, pero afectan ecosistemas acuáticos y terrestres, impactando la biodiversidad de los cuerpos de agua intervenidos (Jolliet et al., 2022).

Los resultados obtenidos en los estudios revisados presentan diferencias debido a factores metodológicos, geográficos y tecnológicos. **Fthenakis et al. (2022)** reportan que la huella de carbono de los paneles fotovoltaicos varía entre **20-50 gCO_2-eq/kWh**, mientras que **Arvesen & Hertwich (2020)** indican valores más bajos debido a diferencias en las bases de datos utilizadas.

En el caso de los aerogeneradores, **Barros et al. (2021)** identificaron una huella de **5-15 gCO_2-eq/kWh**, pero estudios más recientes muestran variaciones en función del tipo de turbina y su eficiencia operativa (López & Martínez, 2023).

Para las hidroeléctricas, se observan discrepancias en la huella hídrica reportada, que oscila entre **20 y 50 m^3/MWh** dependiendo de la ubicación y el tipo de embalse (Fuentes et al., 2024). Estas diferencias resaltan la importancia de contextualizar los resultados dentro de los parámetros específicos de cada estudio.

El ACV también encuentra que las estrategias de economía circular pueden reducir significativamente estos impactos. Por ejemplo, el reciclaje de materiales críticos en paneles solares podría disminuir hasta un 30% las emisiones de CO_2 durante su ciclo de vida (Pérez et al., 2024).

Los estudios revelan que la eficiencia de las tecnologías renovables varía según el entorno en el que operan. En México, los paneles fotovoltaicos generan mayores beneficios ambientales en zonas de alta radiación solar, como el norte del país, mientras que los aerogeneradores muestran mayor eficiencia en estados con vientos constantes, como Oaxaca y Yucatán. En el caso de las hidroeléctricas, su viabilidad depende en gran medida de la gestión sostenible del agua y la

minimización de impactos en la biodiversidad de los cuerpos de agua mexicanos. (CENACE, 2021)

Además, se observó que las tres tecnologías contribuyen de manera positiva al cumplimiento de los ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y 13 (acción por el clima), destacando la necesidad de innovación para reducir los impactos negativos en las etapas de extracción y manufactura, para la generación de energía eléctrica.

4.- Resultados Cuantitativos

Los resultados del ACV fueron los siguientes:

Tabla 1. Comparación de Impactos Ambientales por Tecnología

Tecnología	Huella de Carbono (g CO_2-eq/kWh)	Huella Hídrica (m^3/MWh)
Paneles Fotovoltaicos	20-50	1.5
Aerogeneradores	5-20	0.8
Centrales Hidroeléctricas	40	40

Fuente: Elaborado con datos tomados de IPCC (Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. and Ecoinvent Database (2021).

La siguiente figura muestra de manera grafica los resultados obtenidos de la tabla anterior referente a la huella de carbono.

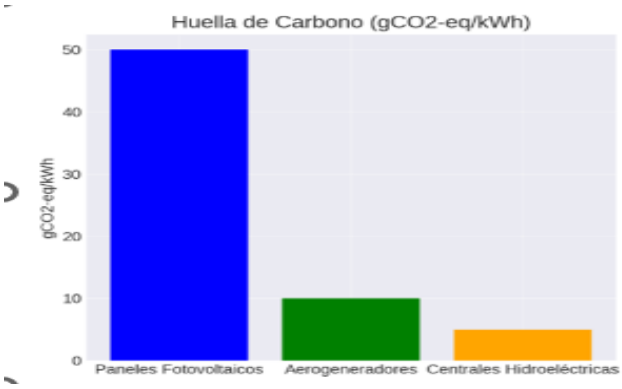


Fig. 1 Comparación gráfica de huella de carbono (g CO_2-eq/kWh) por tecnología

Fuente: Elaborado con datos tomados de IPCC (2014) (Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. y Ecoinvent Database (2021).

La siguiente figura muestra de manera gráfica los resultados obtenidos de la tabla1 referente a la huella hídrica.

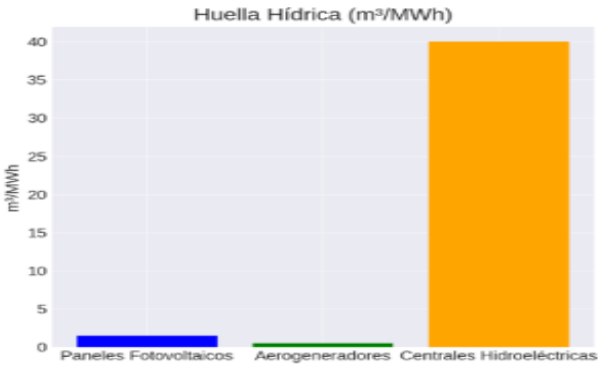


Fig. 2 Comparación grafica de huella hídrica (m^3/MWh) por tecnología

Fuente: Elaborado con datos tomados de IPCC (2014) (Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. y Ecoinvent Database (2021).

Tabla 2. Años de vida útil de cada Tecnología

Tecnología	Vida Util (Años)	Eficiencia (%)
Paneles Fotovoltaicos	25-30	15-25
Aerogeneradores	20 -25	30-45
Centrales Hidroeléctricas	50-100	85-95

Fuente: Elaborado con datos tomados de IPCC (Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. And Ecoinvent Database (2021).

El desempeño ambiental de las tecnologías renovables está influenciado por múltiples factores. En términos de eficiencia, los paneles fotovoltaicos ofrecen beneficios significativos en regiones de alta irradiación, aunque su fabricación implica el uso intensivo de materiales críticos (González et al., 2024). Los aerogeneradores presentan menores emisiones de CO_2 durante su operación, pero su impacto ambiental depende de la disponibilidad de infraestructura de reciclaje de materiales compuestos (Torres et al., 2024). Las hidroeléctricas, si bien generan bajas emisiones directas de carbono, pueden ocasionar alteraciones en ecosistemas acuáticos, lo que las hace altamente dependientes de estrategias de mitigación y manejo sustentable de recursos hídricos (Ramírez et al., 2023).
Estos resultados subrayan las diferencias en sostenibilidad entre las tecnologías, destacando la importancia de optimizar cada etapa del ciclo de vida.

5. Perspectivas Futuras

El futuro del sector energético renovable dependerá de la capacidad de superar los desafíos actuales. Entre las estrategias clave para maximizar el impacto positivo de estas tecnologías se encuentran:

•**Mejoras tecnológicas:** Desarrollo de materiales más sostenibles, como paneles fotovoltaicos sin silicio y aspas reciclables para aerogeneradores.

•**Economía circular:** Implementación de estrategias que permitan reciclar componentes al final de su vida útil, mejorando el manejo de los residuos resultantes.

•**Adopción de políticas globales:** Implementación de estándares internacionales que incentiven la innovación en energías renovables y reducción del impacto ambiental.

•**Optimización de materiales:** Desarrollo de nuevas aleaciones y compuestos con menor impacto ambiental (Pérez et al., 2024).

6. Conclusiones

El uso del ACV permite una evaluación integral y detallada de los efectos ambientales asociados a las tecnologías renovables, brindando información clave para su optimización. A través de este estudio, se ha evidenciado que cada una de las tecnologías evaluadas y analizadas: paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y centrales hidroeléctricas, tienen ventajas y desventajas en términos de huella ambiental, eficiencia y costos de producción.

Se concluye que, si bien las energías renovables representan una alternativa viable para la reducción de emisiones de carbono y otros impactos negativos, es fundamental optimizar sus procesos de manufactura y fomentar políticas de economía circular, para mejorar su sostenibilidad.

A partir del análisis de literatura, se concluye que las tecnologías renovables tienen una menor huella ambiental en comparación con los combustibles fósiles, pero cada una presenta desafíos específicos. Se suma la importancia fomentar la innovación en materiales, optimizar los procesos de manufactura y establecer normativas que reduzcan el impacto ambiental a lo largo de todo el ciclo de vida.

Los resultados resaltan la importancia de aplicar el ACV en las tecnologías alternativas de generación de energía eléctrica, permitiendo evaluar su impacto ambiental en todas sus etapas de ciclo de vida. La energía eólica se perfila como la opción con menor huella ambiental en términos de emisiones y consumo de recursos, seguida por los paneles solares, que presentan desafíos principalmente en su fabricación y reciclaje. Las centrales hidroeléctricas, si bien tienen un alto rendimiento energético, generan alteraciones ambientales que deben ser mitigadas mediante estrategias de conservación de ecosistemas.

Este estudio aporta una visión integral basada en evidencia científica que puede ser utilizada para la selección y mejora de tecnologías energéticas sostenibles. Si bien las energías renovables ofrecen un impacto ambiental significativamente menor que los combustibles fósiles, la selección de la tecnología más adecuada debe considerar factores como la disponibilidad de recursos, la localización geográfica y los impactos en ecosistemas locales.

Referencias Bibliográficas

Fthenakis, V., Kim, H.C. and Alsema, E. (2018). Emissions from photovoltaic life cycles. *Environmental Science & Technology*, 42(6), pp.2168-2174. https://doi.org/10.1021/es071763q

GreenDelta (2020). *OpenLCA - The open source software for Life Cycle Assessment*. Available at: https://www.openlca.org/

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Curran, M.A. (2021). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. CRC Press.

ISO (2006). *ISO 14040: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework*. Geneva: ISO.

ISO (2018). *ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. International Organization for Standardization, Geneva.

Arvesen, A., & Hertwich, E.G. (2020). Environmental impacts of wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 142–153.

REN21 (2022). *Renewables 2022 Global Status Report*.

Barros, N. et al. (2021). Water footprint of hydroelectric energy. *Water Resources Research*, 57(5).

Jolliet, O. et al. (2022). *Environmental Life Cycle Assessment*. CRC Press.

González, H. et al. (2023). ACV y sostenibilidad energética. *Revista Iberoamericana de Energía Renovable*, 18(2), 45–58.

Pérez, J. et al. (2024). Circularidad en módulos fotovoltaicos. *Energía Limpia Hoy*, 12(1), 23–34.

Torres, M. et al. (2024). Materiales reciclables para aspas eólicas. *Avances en Ingeniería Sustentable*, 8(3), 77–89.

Water Footprint Network (2021). *Water footprint assessment of electricity generation*.

Ecoinvent Database (2021). *Ecoinvent v3.7.1*.

Tabla 1. Source: *IPCC* (2021). Available at: https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/renewable-energy-and-climate change/?utm_source=chatgpt.com, and *Ecoinvent Database* (2021). Ecoinvent.

Imagen 1. Source: *Water Footprint Network* (2021). Available at: https://www.waterfootprint.org/resources/Report51-WaterFootprintHydropower.pdf.

Tabla 2. Source: *IPCC* (2021). Available at: https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/renewable-energy-and-climate change/?utm_source=chatgpt.com, and *Ecoinvent Database* (2021). Ecoinvent.

Review: Advances in Green Hydrogen Technologies, Storage and Applications

Toledo Sánchez Yurika*. Cervantes Bobadilla Marisol **. García Morales Jarniel **. Adam Medina Manuel. Borunda Pacheco Mónica **. Gamboa Escobar Alan Jair *.**

** Posgrado del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos (e-mail: m24ce077@cenidet.tecnm.mx, m24ce102@cenidet.tecnm.mx).*

** *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos.(e-mail: marisol.cb@cenidet.tecnm.mx ,jarniel.gm@cenidet.tecnm.mx, manuel.am@cenidet.tecnm.mx, monica.bp@cenidet.tecnm.mx,)*

Abstract: The transition to sustainable energy systems has sparked growing interest in green hydrogen as a viable solution for decarbonizing key sectors, including industry, transportation, and energy storage. Unlike conventional hydrogen, which is derived from fossil fuels, green hydrogen is produced through water electrolysis powered by renewable sources, making it a clean and versatile energy carrier. However, widespread adoption still faces major hurdles, particularly in terms of high production costs, energy efficiency, storage limitations, and integration into existing infrastructure. This study provides a critical review of recent advancements in hydrogen production technologies, particularly focusing on alkaline and proton exchange membrane electrolysis, as well as emerging alternatives like methane pyrolysis, which offers the advantage of reducing carbon emissions. The research is based on a systematic analysis of scientific studies, technical reports, and industrial developments over the past decade, with a particular emphasis on efficiency trends, cost reduction strategies, and scaling potential. In addition to production methods, the study explores the technological challenges associated with hydrogen storage, evaluating the feasibility of compressed gas, liquid hydrogen, and metal hydrides for different applications. The findings indicate that while current production costs range from €4 to €7 per kilogram, projections suggest a significant reduction to €1.5–€3 per kilogram by 2050, driven by advancements in electrolysis efficiency, economies of scale, and policy incentives. Moreover, green hydrogen's role in stabilizing renewable energy grids and its potential applications in industrial processes, steel production, and fuel cell transportation are assessed. By identifying research gaps and key investment areas, this review provides insight into the future trajectory of green hydrogen and its role in shaping a low-carbon global economy.

Keywords: Green Hydrogen, Hydrogen Production Technologies, Hydrogen Economy, Sustainable Energy Systems.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los desafíos más urgentes del siglo XXI, lo que exige una transición hacia sistemas energéticos sostenibles y descarbonizados. Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), es esencial reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 45% para 2030 y alcanzar la neutralidad de carbono para 2050, con el fin de limitar el calentamiento global a 1.5°C (Howarth et al., 2024). En este contexto, el hidrógeno verde, producido mediante energías renovables, se ha presentado como una solución clave para descarbonizar sectores industriales y de transporte, con el potencial de transformar las dinámicas energéticas globales (Ummah, 2019). Este artículo tiene como objetivo revisar y analizar las principales tecnologías para la producción de hidrógeno verde, destacando especialmente la electrólisis alcalina, la electrólisis PEM y la pirólisis de metano. Se abordarán sus respectivos métodos de producción, así como los desafíos asociados con su almacenamiento y las diversas aplicaciones en sectores como la industria pesada, el transporte y la generación de energía.

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 3 se describe el análisis de las tecnologías de producción de hidrógeno verde, con énfasis en las tecnologías más relevantes y sus características; en la sección 4 se abordan los métodos de almacenamiento de hidrógeno, destacando las opciones más viables y sus desafíos; en la sección 5 se exploran las aplicaciones del hidrógeno verde en sectores clave, como el transporte y la industria pesada; en la sección 6 se evalúan los impactos económicos y ambientales, comparando el hidrógeno verde con otras formas de hidrógeno; y finalmente, en la sección 7 y 8 se presentan los resultados y las conclusiones

derivadas de la revisión, con un análisis de las perspectivas futuras del hidrógeno verde en la transición energética global.

2. METODOLOGÍA

Este artículo se basa en una revisión sistemática de la literatura científica, con el objetivo de identificar y analizar las tecnologías más recientes para la producción de hidrógeno verde, así como los métodos de almacenamiento, aplicaciones y los impactos ambientales asociados con su uso en la transición energética.

La metodología adoptada consistió en una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas reconocidas, como Google Scholar, IEEE Xplore y ScienceDirect, centrada en artículos y reportes técnicos publicados entre 2018 y 2024. La selección se enfocó en estudios relevantes que aborden aspectos técnicos, económicos y regulatorios del hidrógeno verde.

A continuación, se detallan los temas clave estudiados en esta revisión:

Producción de hidrógeno verde: Se analizan tecnologías como la electrólisis alcalina, electrólisis PEM y pirólisis de metano, evaluando sus características, eficiencia y viabilidad (Brijaldo et al., 2021).

Almacenamiento de hidrógeno: Se abordan los métodos de almacenamiento más relevantes, como el hidrógeno comprimido, hidrógeno líquido y hidruros metálicos, evaluando su capacidad, eficiencia y los retos asociados (Jaszczur et al., 2022).

Aplicaciones del hidrógeno verde: Se revisan las principales aplicaciones del hidrógeno verde en sectores como el transporte (vehículos de celdas de combustible, transporte marítimo) y la industria pesada (química y siderúrgica) (Heydari et al., 2023).

Costos y proyecciones: Se comparan los costos actuales de producción de hidrógeno verde y las proyecciones futuras, teniendo en cuenta los avances tecnológicos y la economía de escala (Yusaf et al., 2022).

Impactos ambientales: Se evalúan los beneficios ambientales, especialmente en términos de la reducción de emisiones de CO_2, así como los desafíos asociados con el uso de recursos como el agua en la producción de hidrógeno (Howarth et al., 2021).

Una vez recopilados y clasificados los estudios relevantes, se llevó a cabo un análisis comparativo de los datos obtenidos. Este análisis se presenta en tablas que resumen métricas clave como eficiencia, costos, ventajas y limitaciones de cada tecnología y aplicación. Cada afirmación presentada en el artículo se fundamenta en referencias científicas verificadas y reportes de agencias internacionales, garantizando la validez y actualidad de la información (Abbas et al., 2022).

3. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE

La producción de hidrógeno verde es una pieza fundamental para la transición hacia un modelo energético sostenible. Existen diversas tecnologías para generar hidrógeno utilizando fuentes renovables, cada una con sus características particulares, ventajas y limitaciones. Entre las tecnologías más destacadas se encuentran la electrólisis alcalina y la de membrana de intercambio de protones (PEM), las cuales han demostrado ser efectivas para la producción de hidrógeno a partir de agua (Palacios et al., 2024). Además, la pirólisis de metano se perfila como una opción emergente con el potencial de minimizar las emisiones de dióxido de carbono y generar hidrógeno limpio (Neumann et al., 2023). La Tabla 1 sintetiza las principales tecnologías de producción de hidrógeno verde, sus características y los retos que enfrentan.

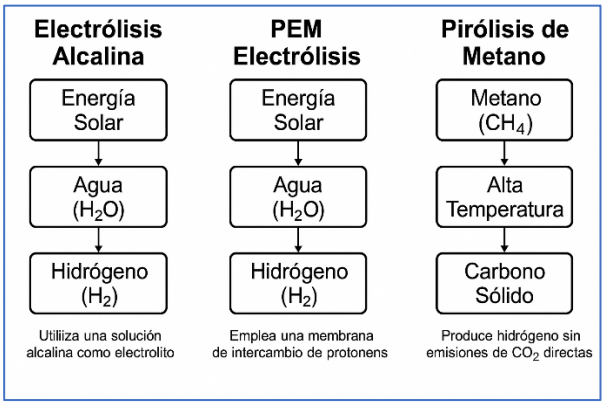
Tabla 1. Tecnologías de producción de Hidrógeno Verde

Electrolisis alcalina (Hassan, 2024)	Emplea electrólitos principalmente KOH y NaOH.
	Tecnología madura. Costos moderados.
	Baja eficiencia a bajas temperaturas (<60 °C).
Electrolisis PEM (Ceran *et al.*, 2021)	Uso de membranas poliméricas.
	Alta eficiencia, respuesta rápida.
	Costos elevados de catalizadores.
Pirólisis de metano (Alghool *et al.*, 2025)	Conversión de CH_4 sin emisiones directas.
	Genera H_2 sin CO_2 directo.
	Alta demanda energética, manejo de carbono sólido.

3.2 Comparación de Tecnologías

La comparación de las tecnologías de producción de hidrógeno verde permite identificar las diferencias clave en términos de eficiencia, costos y nivel de madurez tecnológica. Estas métricas son fundamentales para evaluar la viabilidad técnica y económica de cada opción, así como su capacidad para integrarse en sistemas energéticos sostenibles. Estudios previos indican que la electrólisis alcalina, por su mayor grado de desarrollo tecnológico, se caracteriza por costos más bajos y una infraestructura ya consolidada, mientras que la electrólisis PEM, aunque más eficiente, implica un costo más elevado (Hassan et al., 2022). Por otro lado, la pirólisis de metano se posiciona como una tecnología emergente con el potencial de producir hidrógeno sin emisiones directas de CO_2, aunque su alto consumo energético sigue siendo un desafío (Mahbub et al., 2024). El Diagrama 1 presenta una comparación general de estas tecnologías.

Diagrama 1. Comparación de Tecnologías de Producción de Hidrógeno



4. ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

El almacenamiento de hidrógeno es una de las áreas críticas para garantizar su uso efectivo como portador de energía en aplicaciones industriales, de transporte y energéticas. Este proceso debe ser seguro, eficiente y económicamente viable para facilitar la integración del hidrógeno en redes energéticas renovables. Actualmente, los métodos principales de almacenamiento incluyen el hidrógeno comprimido, el hidrógeno líquido y el almacenamiento en materiales metálicos. Estos enfoques se encuentran en diferentes niveles de desarrollo, siendo el hidrógeno comprimido el más maduro debido a la infraestructura existente, mientras que el almacenamiento mediante hidruros metálicos ofrece soluciones compactas y seguras, pero enfrenta limitaciones en su capacidad. Por otro lado, el hidrógeno líquido destaca por su alta densidad energética, aunque los costos asociados a la licuefacción continúan siendo un desafío significativo (Ustolin et al., 2024).

La Tabla 2 sintetiza las características principales de cada método de almacenamiento:

Tabla 2. Almacenamiento de Hidrógeno

Hidrógeno Comprimido (Solomon *et al.*, 2024)	Almacenado a alta presión (200-700 bar).
	Infraestructura existente.
	Alto costo de compresión y riesgo
Hidrógeno Líquido (Ceran *et al.*, 2021)	Enfriado a -253°C.
	Alta densidad energética.
	Costos energéticos de licuefacción.
Materiales Metálicos (Meg *et al.*, 2021)	Absorción en hidruros metálicos.
	Seguros, almacenamiento compacto.
	Limitada capacidad de almacenamiento

5. APLICACIONES DEL HIDRÓGENO VERDE

El hidrógeno verde desempeña un papel esencial en la descarbonización de sectores clave como el transporte y la industria. Gracias a sus propiedades como portador de energía limpia, puede reemplazar los combustibles fósiles tradicionales en aplicaciones de alto impacto. En el sector del transporte, los vehículos con celdas de combustible de hidrógeno han sido implementados en automóviles, autobuses y camiones, ofreciendo una alternativa sin emisiones para la movilidad sostenible (Yusaf et al., 2022). En la industria, el hidrógeno se utiliza en la producción de amoníaco, metanol y como sustituto del coque en la siderurgia, lo que contribuye a reducir las emisiones de carbono (Pinheiro et al., 2025). A continuación, se describen sus principales usos en el transporte y la industria, destacando sus beneficios y limitaciones.

5.1 Transporte

El sector del transporte es uno de los mayores contribuyentes a las emisiones globales de gases de efecto invernadero, y el hidrógeno verde emerge como una solución clave para abordar este desafío. En aplicaciones como vehículos de celdas de combustible y el transporte marítimo, el hidrógeno destaca por su capacidad para ofrecer cero emisiones y una alta densidad energética (Solomon et al., 2024). Sin embargo, el desarrollo de la infraestructura y los altos costos iniciales siguen siendo barreras significativas para su implementación a gran escala, ya que la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno requieren inversiones en infraestructura y tecnología especializada (Mahbub et al., 2024). A pesar de estos desafíos, el hidrógeno verde continúa ganando relevancia como una alternativa viable en la descarbonización del sector transporte, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Aplicaciones del Hidrógeno en el Sector de Transporte

Vehículos (Solomon *et al.*, 2024)	Hidrógeno para celdas de combustible.
	Cero emisiones, alta eficiencia.
	Infraestructura con altos costos.
Marítimo (Ustolin et al., 2022)	Hidrógeno líquido para barcos.
	Transporte comercial.
	Costos iniciales elevados.

5.2 Industria

El hidrógeno verde tiene aplicaciones críticas en la industria química y pesada. En el ámbito químico, se utiliza en la producción de amoníaco y metanol, reduciendo la huella de carbono en procesos tradicionales como la fabricación de fertilizantes y plásticos (Palacios et al., 2024). En la industria pesada, el hidrógeno se está implementando para sustituir el coque de carbón en la producción de acero, un paso crucial hacia la "siderurgia verde" (Hassan, 2024).
Aunque estas tecnologías tienen el potencial de transformar el sector industrial, aún enfrentan desafíos económicos asociados

a los elevados costos de adaptación e infraestructura, como se muestra en la Tabla 4:

Tabla 4. Aplicaciones del Hidrógeno en el Sector de Industrial

Industria Química (Cheng *et al.*, 2023)	Producción de amoníaco y metanol.
	Fertilizantes, plásticos.
	Reducir huella de carbono.
	Altos costos iniciales.
Industria Pesada (Meg *et al.*, 2021)	Acero verde (reducción de minerales).
	Siderurgia.
	Sustitución del coque de carbón
	Costos de adaptación altos.

6. IMPACTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

El hidrógeno verde representa una solución prometedora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y alcanzar los objetivos climáticos globales (Shiva et al., 2022). Sin embargo, su adopción a gran escala depende de la viabilidad económica y del equilibrio ambiental. Se estima que los costos actuales de producción oscilan entre 4 y 7 €/kg, con proyecciones de reducción a 1.5-3 €/kg para 2050 gracias a innovaciones en electrólisis y economías de escala (Jaszczur et al., 2021). A nivel ambiental, el hidrógeno verde permite reducir hasta un 95% las emisiones de CO_2 en comparación con los combustibles fósiles, aunque su producción implica un consumo significativo de agua y energía renovable, lo que plantea desafíos adicionales en su implementación (Nnabuife et al., 2024). A continuación, se presentan los costos actuales y proyecciones futuras de producción, junto con los impactos ambientales asociados, destacando tanto los beneficios como los desafíos.

6.1 Costos y Proyecciones

El costo del hidrógeno verde ha disminuido significativamente en la última década debido a avances tecnológicos y la integración de energías renovables (Heydari, 2023). En 2023, el costo promedio de producción se sitúa entre 4 y 7 €/kg de H_2, pero se proyecta una reducción a un rango de 1.5 y 3 €/kg para 2050 impulsada por avances en tecnologías de electrólisis y economías de escala (Sohrabi, et al., 2022). Esta tendencia es impulsada por mejoras en la eficiencia de los electrolizadores y la reducción del costo de las energías renovables, factores clave para la competitividad del hidrógeno verde en el mercado global (Cheng et al., 2023).

6.2 Impactos Ambientales

El hidrógeno verde ofrece beneficios ambientales significativos, como la reducción de hasta un 95 % de las emisiones de CO_2 en comparación con los combustibles fósiles (Cheng et al., 2023). Sin embargo, su producción también conlleva desafíos, como las emisiones indirectas asociadas a la generación de electricidad renovable y los elevados requerimientos de agua para la electrólisis, lo que representa un reto en regiones con escasez hídrica (Stöckl, et al., 2021). A pesar de estos desafíos, el hidrógeno verde sigue siendo una opción viable para la descarbonización de sectores industriales y energéticos, siempre que se implementen estrategias eficientes de producción y gestión de recursos (Tüysüz, 2023).

6.3 Comparación del Impacto Ambiental entre Tipos de Hidrógeno

El hidrógeno verde se destaca como la opción más limpia y sostenible debido a su producción a partir de energías renovables, lo que elimina las emisiones directas de CO_2. En comparación, el hidrógeno gris, producido a partir de gas natural, genera altas emisiones de CO_2 durante su producción. El hidrógeno azul también se produce a partir de gas natural, pero incorpora tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS), lo que reduce las emisiones en comparación con el hidrógeno gris, pero aún depende de combustibles fósiles (Howarth and Jacobson, 2021).

El hidrógeno amarillo se produce utilizando energía nuclear, lo que minimiza las emisiones directas de CO_2, pero plantea otros problemas ambientales relacionados con la gestión de residuos nucleares. El hidrógeno rosa es similar al amarillo, ya que se obtiene a partir de energía nuclear, pero utiliza electrólisis para separar el hidrógeno del agua, lo que también reduce la huella de carbono, aunque los riesgos asociados con la energía nuclear persisten (Ortega, 2024).

7. RESULTADOS

7.1 Producción de Hidrógeno Verde

Los resultados muestran que la electrólisis alcalina presenta una eficiencia media del 60-70 por ciento, mientras que la tecnología PEM alcanza eficiencias más altas, en el rango de 70-80 por ciento, aunque con un mayor costo asociado. En contraste, la pirólisis de metano se posiciona como una alternativa emergente con eficiencias del 50-60 por ciento, destacándose por evitar emisiones directas de dióxido de carbono. La madurez tecnológica de la electrólisis alcalina y el potencial de innovación de la pirólisis de metano coinciden con tendencias observadas en estudios reciente.
En cuanto al desarrollo actual, se observa que la electrólisis PEM continúa en fase de optimización para reducir costos, mientras que la pirólisis de metano aún requiere avances en términos de eficiencia y viabilidad comercial. Estos hallazgos están en concordancia con investigaciones previas que destacan la necesidad de mejorar la estabilidad operativa y la reducción de costos en todas las tecnologías.

7.2 Almacenamiento de Hidrógeno

En términos de almacenamiento, el hidrógeno comprimido sigue siendo la opción más viable debido a la infraestructura existente, aunque presenta costos elevados de compresión. El hidrógeno líquido ofrece mayor densidad energética, pero enfrenta barreras económicas debido a los altos costos de licuefacción. En comparación, los hidruros metálicos

representan una solución compacta y segura, aunque su capacidad de almacenamiento aún es limitada.
El almacenamiento sigue siendo una barrera crítica para la expansión del hidrógeno verde a gran escala. Si bien el hidrógeno comprimido es la tecnología más madura, el desarrollo de soluciones innovadoras como los hidruros metálicos podría superar problemas de seguridad y densidad de almacenamiento en aplicaciones estacionarias. No obstante, estos avances requieren inversiones significativas en investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia y reducir los costos asociados. Además, la infraestructura para transporte y almacenamiento sigue siendo limitada, lo que dificulta su integración en los sistemas energéticos sostenibles. Los estudios previos han identificado que el costo del almacenamiento representa un desafío clave para la competitividad del hidrógeno verde. En este sentido, se requieren estrategias de innovación en materiales y procesos para mejorar la capacidad de almacenamiento y minimizar las pérdidas energéticas asociadas.

7.3 Impactos Económicos y Ambientales

El análisis económico revela que el costo actual del hidrógeno verde oscila entre cuatro y siete euros por kilogramo, con proyecciones que indican una reducción a entre uno y medio y tres euros por kilogramo para el año 2050, impulsada por mejoras en electrólisis y economías de escala. La reducción de costos permitirá que el hidrógeno verde sea más competitivo con los combustibles fósiles y facilite su adopción en sectores industriales y de transporte.
Desde el punto de vista ambiental, el hidrógeno verde se perfila como una solución efectiva para la descarbonización, permitiendo una reducción de hasta un noventa y cinco por ciento en las emisiones de dióxido de carbono en comparación con los combustibles fósiles. Sin embargo, el uso intensivo de agua en los procesos de electrólisis plantea un desafío, especialmente en regiones con escasez hídrica.

7.4 Implicaciones Futuras y Limitaciones

Los resultados sugieren que el hidrógeno verde podría desempeñar un papel crucial en la transición energética global, siempre que se superen los obstáculos económicos y tecnológicos identificados. La implementación de políticas públicas y subsidios será clave para fomentar inversiones en infraestructura y tecnologías emergentes, asegurando la competitividad del hidrógeno en el mercado global.

El fortalecimiento de la cooperación internacional también será fundamental para acelerar la adopción del hidrógeno verde en sectores estratégicos como el transporte y la industria pesada. La integración de sistemas de almacenamiento avanzados y la optimización de los procesos de producción permitirán maximizar la eficiencia del hidrógeno verde, asegurando su viabilidad como fuente de energía sostenible en el futuro.
Las limitaciones del estudio incluyen la falta de datos empíricos sobre la aplicación del hidrógeno verde a gran escala y la incertidumbre en torno a la evolución de los costos en los próximos años. Para abordar estas limitaciones, se recomienda que futuras investigaciones se centren en pruebas piloto y estudios de caso en entornos industriales reales, así como en el desarrollo de modelos predictivos más precisos para evaluar el impacto económico y ambiental de su implementación a largo plazo.

8. CONCLUSIONES

El hidrógeno verde emerge como una solución clave en la transición hacia sistemas energéticos sostenibles, ofreciendo un potencial significativo para reducir emisiones de CO_2, descarbonizar sectores industriales y diversificar las fuentes de energía en el transporte. Aunque tecnologías como la electrólisis alcalina y PEM presentan avances importantes en eficiencia y costos, y el almacenamiento en hidrógeno comprimido y líquido ofrece opciones viables, persisten desafíos relacionados con los altos costos iniciales, las limitaciones de infraestructura y el uso intensivo de recursos. A medida que se proyecta una reducción significativa en los costos de producción para 2050, será esencial fomentar la investigación, las políticas públicas y las inversiones estratégicas que permitan superar estas barreras, consolidando al hidrógeno verde como un pilar en la transición energética global.

AGRADECIMIENTOS:

Agradezco al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por su apoyo académico y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por su respaldo financiero, lo que hizo posible este trabajo.

REFERENCIAS:

Abbas, M.K., Hassan, Q. and Sohrabi, V. (2022) 'ScienceDirect Techno-economic analysis for clean hydrogen production using solar energy under varied climate conditions', International Journal of Hydrogen Energy, 48(8), pp. 2929–2948. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.073.
Alghool, D. et al. (2025) 'Harnessing enhanced solar efficiency for green hydrogen production: A comparative analysis of PV and PV-T systems', International Journal of Hydrogen Energy, 98(December 2024), pp. 394–406. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.489.
Astriani, Y., Tushar, W. and Nadarajah, M. (2024) 'Optimal planning of renewable energy park for green hydrogen production using detailed cost and efficiency curves of PEM electrolyzer', International Journal of Hydrogen Energy, 79(June), pp. 1331–1346. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.107.
Brijaldo, M.H., Castillo, C. and Pérez, G. (2021) 'Main Routes in Hydrogen Production Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno', 23(2). Disponible en: https://doi.org/10.25100/iyc.23i2.11155.
Cao, X. et al. (2023) 'Hydrogen Production System Using Alkaline Water Electrolysis Adapting to Fast Fluctuating Photovoltaic Power', Energies, 16(8), pp. 1–13. Disponible en: https://doi.org/10.3390/en16083308.

Ceran, B. et al. (2021) 'Aging effects on modelling and operation of a photovoltaic system with hydrogen storage', Applied Energy, 297(February), p. 117161. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117161.

Cheng, F. et al. (2023) 'Impacts of the Inflation Reduction Act on the Economics of Clean Hydrogen and Synthetic Liquid Fuels'. Disponible en: https://doi.org/10.1021/acs.est.3c03063.

Fragiacomo, P. and Genovese, M. (2019) 'ScienceDirect Modeling and energy demand analysis of a scalable green hydrogen production system', International Journal of Hydrogen Energy [Preprint], Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.186.

Gamboa-rosales, N.K. (no date) 'Producción de hidrógeno y movilidad sostenible: Un enfoque bibliométrico para detectar temas de investigación, desarrollo e innovación', 3(3), pp. 1–18. Disponible en: https://doi.org/10.47909/ijsmc.81.

Grigoriev, S.A. (2024) Green Hydrogen Production by PEM Water Electrolysis, Towards Green Hydrogen Generation. Disponible en: https://doi.org/10.1002/9781394234110.ch8.

Gutiérrez-Martín, F. et al. (2024) 'Modeling and simulation of integrated solar PV - hydrogen systems', International Journal of Hydrogen Energy, 52, pp. 995–1006. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.179.

Hassan, Q. (2024) 'A review of green hydrogen production based on solar energy ; techniques and methods', Energy Harvesting and Systems, 11(1), pp. 1–28. Disponible en: https://doi.org/10.1515/ehs-2022-0134.

Heydari, M., Heydari, A. and Amini, M. (2023) 'Solar Power Generation and Sustainable Energy : A Review', 12(03).

Howarth, R.W. and Jacobson, M.Z. (2021) 'How green is blue hydrogen ?', (April), pp. 1676–1687. Disponible en: https://doi.org/10.1002/ese3.956.

Jaszczur, M. (2019) 'The field experiments and model of the natural dust deposition effects on photovoltaic module efficiency', pp. 8402–8417.

Jaszczur, M., Hassan, Q. and Palej, P. (2019) 'An optimisation of the hybrid renewable energy systems', 1, pp. 1–6.

Mahbub, N. and Ribberink, H. (2024) 'Optimization of H 2 Supply to the Refuelling Infrastructure for Long-Haul Trucks : Centralized versus Local H 2 Production , and Using Transportation by Tanker Truck or Pipeline †'.

Mart, W.F. (2020) 'Metodología de diseño, montaje y evaluación de sistemas fotovoltaicos integrados a la estructura de edificaciones'.

Meg, P.J. et al. (2021) 'Hydrogen Production Technologies : From Fossil Fuels toward Renewable Sources . A Mini Review'. Disponible en: https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02501.

Mendler, F. et al. (2024) 'Global optimization of capacity ratios between electrolyser and renewable electricity source to minimize levelized cost of green hydrogen', International Journal of Hydrogen Energy, 82(April), pp. 986–993. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.320.

Neumann, F. et al. (2023) 'Article The potential role of a hydrogen network in Europe The potential role of a hydrogen network in Europe', Joule, 7(8), pp. 1793–1817. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.06.016.

Nnabuife, S.G. et al. (2024) 'Integration of renewable energy sources in tandem with electrolysis: A technology review for green hydrogen production', International Journal of Hydrogen Energy [Preprint]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.342.

Okonicha, A.C. and Okwuanaso, C.I. (2024) 'A review of Green hydrogen production and the obstacles to hydrogen green economy', 12(02), pp. 1867–1872.

Palacios, A. et al. (2024) 'International Journal of Hydrogen Energy Hydrogen in Mexico : A technical and economic feasibility perspective for the transition to a hydrogen economy', International Journal of Hydrogen Energy [Preprint], (August 2023). Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.116.

Pinheiro, F.P. et al. (2025) 'Techno-economic analysis of green hydrogen generation from combined wind and photovoltaic systems based on hourly temporal correlation', International Journal of Hydrogen Energy, 97(September 2024), pp. 690–707. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.429.

Schlo, R. (2020) 'Methane Pyrolysis for CO 2 -Free H 2 Production : A Green Process to Overcome Renewable Energies Unsteadiness', (10), pp. 1596–1609. Disponible en: https://doi.org/10.1002/cite.202000029.

Shiva Kumar, S. and Lim, H. (2022) 'An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production', Energy Reports, 8, pp. 13793–13813. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.127.

Solomon, M.D. et al. (2024) 'Cost Optimization of Compressed Hydrogen Gas Transport via Trucks and Pipelines', 2300785. Disponible en: https://doi.org/10.1002/ente.202300785.

Spatolisano, E. et al. (2024) 'Waste to H 2 Sustainable Processes : A Review on H 2 S Valorization Technologies'.

Stöckl, F., Schill, W.P. and Zerrahn, A. (2021) 'Optimal supply chains and power sector benefits of green hydrogen', pp. 1–14.

Teresa, M., Díaz, M. and Oróstica, H.C. (2023) 'Economic Analysis : Green Hydrogen Production Systems'.

Tüysüz, H. (2023) 'Alkaline Water Electrolysis for Green Hydrogen Production', Accounts of Chemical Research [Preprint]. Disponible en: https://doi.org/10.1021/acs.accounts.3c00709.

Ummah, M.S. (2019) 'Covariance structure analysis of health-related indicators in home-based elderly care centered on subjective health perception', Sustainability (Switzerland), 11(1), pp. 1–14. Disponible en: http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf.

Ustolin, F. and Campari, A. (2022) 'An Extensive Review of Liquid Hydrogen in Transportation with Focus on the Maritime Sector'.

Yusaf, T. et al. (2022) 'applied sciences Hydrogen Energy Demand Growth Prediction and Assessment (2021 – 2050) Using a System Thinking and System Dynamics Approach'.

Evaluation of Heat Transfer in Solar Ventilation Systems Applied to Energy Efficiency in Buildings

Méndez Rosique, Cristian Antonio*, Torres Aguilar, Carlos Enrique*, Aguilar Castro, Karla María*, Macias Melo, Edgar Vicente*, Pérez Olán, isa Yadira*

** Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, C.P 86690.*
(e-mail: 192D23176@alumno.ujat.mx, enrique.torres@ujat.mx, karla.aguilar@ujat.mx, edgar.macias@ujat.mx, isa.perez@ujat.mx).

Abstract: In this work, the thermal behavior of a solar chimney model was evaluated for its application in buildings as a strategy to improve energy efficiency and reduce dependence on artificial air conditioning systems. The study focused on analyzing airflow and heat transfer within the solar chimney, considering the specific climatic conditions of Villahermosa, Tabasco, throughout the year. To this end, theoretical and numerical methods were employed, using an approach based on global energy balances (BEG) to represent the processes of conduction, convection, and thermal radiation in the different components of the system. The methodology incorporated the analogy with electrical circuits, allowing the thermal resistances of materials to be represented and facilitating the analysis of the system's behavior through nodal modeling. A computational code was also developed in C++ to solve the model using the Gauss-Seidel and Jacobi iterative methods. The meteorological data used was obtained from CONAGUA, considering temperature, wind speed, solar radiation, and atmospheric pressure variables. The study varied the number of nodes and the orientation of the chimney. Among the most relevant results, it was found that the best conditions for induced mass flow occurred on warm days, reaching a maximum of 0.05508 kg/s, while on cold days, minimum values as low as 0.000046 kg/s were recorded. It was observed that east and west orientations offered better thermal performance. The results show that properly designed and oriented solar chimneys represent an efficient alternative for natural ventilation and improving thermal comfort in buildings, with great application potential in warm and humid climates.

Keywords: Solar chimney, BEG, Building, Comfort.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda energética a nivel global y las dificultades que relacionan al mercado energético para su estabilidad ha conllevado realizar estrategias para mejorar la eficiencia energética en edificaciones (International Energy Agency, 2023). El consumo energético en las edificaciones residenciales se condiciona por diversos factores, tales como los materiales empleados, diseños de construcción y condiciones climáticas de las regiones. Para las edificaciones se ha creado una alta demanda en los sistemas de aire acondicionado, los cuales proporcionan confort térmico, pero incrementa el consumo energético. Para evitar el incremento del consumo energético, se emplea la aplicación de sistemas pasivos de ventilación, como las chimeneas solares. Las chimeneas solares son consideradas una solución para la optimización del confort térmico y la reducción de la demanda energética en las edificaciones.

La aplicación de las chimeneas solares se ha estudiado en diversas investigación teóricas y experimentales, donde sobre sale el aprovechamiento de la energía solar para la obtención de ventilación natural. La ventilación natural crea una circulación de aire de manera eficiente, disminuyendo el uso de aire acondicionado. El estudio de las chimeneas solares permite emplear metodologías para su evaluación, en las cuales sobresalen: Ensayos Experimentales, Simulaciones en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y Análisis Teórico por el Método de Balance de Energía Global (BEG).

Basándose en la transferencia de calor y la ventilación natural, se han obtenido diferentes configuraciones de chimeneas solares. En estudios recientes se ha obtenido que el aspecto del canal, la inclinación e integración de otros sistemas pasivos pueden llegar a favorecer en la eficiencia de las chimeneas solares. Desde la parte teórica, Huang et al. (2024) realizaron modelos predictivos de la ventilación en túneles urbanos utilizando chimeneas solares, resaltando la importancia de una apropiada distribución térmica dentro de la cavidad para el mejoramiento de precisión en los modelos. En un estudio similar, reportado por Tao et al. (2023) evaluaron el comportamiento térmico en fachadas de doble capa (NVDSSF), obteniendo una reducción de carga térmica y una mejor eficiencia energética.

Por otra parte, Saifi et al. (2024) llevaron a cabo un estudio en un clima semiárido, concluyendo que la combinación de captadores de viento con las chimeneas solares disminuye la temperatura interior entre 3 y 7 °C. Por último, Cui et al. (2024) analizaron el estudio en la convección natural para chimeneas solares combinadas, concluyendo con la

importancia de entender los distintos regímenes de flujo para un desempeño más optimo.

Es por esto, que se realiza el estudio a las chimeneas solares para evaluar el problema del consumo energético en edificaciones por el alto índice de sistemas de aire acondicionado. El estudio se fundamenta en la teoría de transferencia de calor, sistemas pasivos (ventilación natural). Con la implementación de metodologías teóricas y numéricas se logra evaluar el desempeño de las chimeneas solares. Es importante el estudio realizado en este trabajo, ya que cubre la necesidad del desarrollo para la reducción del consumo energético en edificaciones. Del mismo modo, al implementar el estudio se puede obtener una mejoría en el confort térmico y contribuir al impacto ambiental derivado del excesivo uso de sistemas de climatización artificial.

2. METODOLOGÍA

2.1 Transferencia de calor

El estudio se desarrolló mediante un modelo teórico empleando BEG, donde se analizó el comportamiento térmico, la transferencia de calor en la chimenea solar. Para su entendimiento es necesario tener claro los tipos de transferencias: convección, conducción y radiación.

La conducción de calor se aplica utilizando la Ley de Fourier Ec. 1. La conducción de calor se presenta en los elementos sólidos, los cuales dependen del espesor, el tipo de material, temperatura y geometría.

$$q" = \lambda \frac{dT}{dx} \qquad (1)$$

Donde: q es el flux de calor (W/m^2), λ es la conductividad térmica (W/m^2·°C), $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura en dirección x.

A través de la convección se logra tener una transferencia de calor. La convección muestra una rapidez en la transferencia de calor de manera proporcional, donde se puede expresar su aplicación mediante la Ley de Enfriamiento de Newton Ec. 2.

$$q"_x = h(T_\infty - T_s) \qquad (2)$$

Donde: q_x es el flux de calor convectivo en dirección x (W/m^2), h es el coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m^2·°C), T_∞ la temperatura del fluido – ambiente (°C), T_s la temperatura de la superficie.

La radiación es el último tipo de transferencia, la cual se considera como un fenómeno superficial o volumétrico. La radiación se representa por la Ley de Stefan-Boltzmann Ec. 3, donde se emplea la emitancia ε para un cuerpo que no es ideal.

$$q" = \sigma \varepsilon T^4 \qquad (3)$$

Donde: q_x es el flux de calor radiactiva (W/m^2), σ la constante de Stefan-Boltzmann (5.667×10^{-8}W/m^2·°C^4), T es la temperatura absoluta (°C), ε es la emitancia.

2.2 Analogía de circuitos eléctricos

Para el estudio de las chimeneas solares se buscó la optimización en la transferencia de energía térmica. Por este motivo el implementar la analogía de los circuitos eléctricos es una manera viable. Como se muestra en la Fig. 1, la corriente (I), resistencia (R) conectadas en serie permiten que el flujo de energía tenga una tensión eléctrica.



Fig. 1 Diagrama del circuito eléctrico.

Esta similitud se emplea en la transferencia de calor, debido a que los materiales poseen una resistencia en la circulación del flujo de calor. Por lo que, la analogía actúa utilizando la expresión matemática de la Ley de Ohm, Ec. 4. La Ley de Ohm sustituye sus variables implementando las variables de la diferencia de temperatura.

$$I = \frac{V}{R} \qquad (4)$$

Donde: I es la corriente eléctrica (A), V es la tensión eléctrica (V), R es la resistencia eléctrica (Ω).

La sustitución se realiza en cada una de las ecuaciones de la Ley de Fourier, Ley de Newton y la Ley de Stefan-Boltzmann como se muestra en la Tabla 1. Por lo que conlleva a realizar el análisis de algún sistema por nodos. Los nodos empleados serán evaluados según el espesor del material.

Tabla 1 Ecuaciones con analogía de circuitos eléctricos.

Ley empleada	Ecuación	Ley de Ohm	Sustitución de la Ecuación
Ley de Fourier	$q" = \lambda \frac{dT}{dx}$	$I = \frac{V}{R}$	$q"_x = \frac{(T_1 - T_2)}{Hx/\lambda}$
Ley de enfriamiento de Newton	$q"_x = h(T_\infty - T_s)$	$I = \frac{V}{R}$	$q"_{conv} = \frac{(T_\infty - T_s)}{1/h}$
Ley de Stefan-Boltzmann	$q"_x = \sigma\varepsilon(T_1^4 - T_2^4)$	$I = \frac{V}{R}$	$q"_{rad} = h_{rad}(T_1 - T_2)$

Donde: T_1, T_2 son las temperaturas de la conducción y radiación (°C), H_x espesor en la dirección x (m), h_{rad} coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m^2°C).

2.3 Modelo Físico y Matemático de la Chimenea Solar

Considerando lo anterior, se realizó el modelo físico de la chimenea solar como se muestra en la Fig. 2, donde el diseño está orientado de forma vertical. El diseño de la chimenea solar dependerá de la configuración de la edificación según la necesidad de confort térmico requerido. Para el estudio, se

consideraron las condiciones climáticas, así como, la inercia térmica en la chimenea solar.

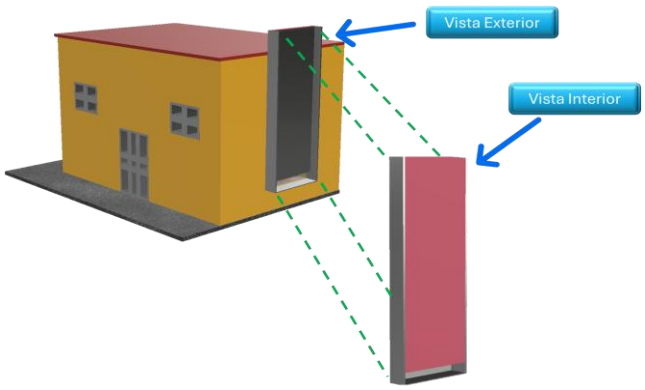


Fig. 2 Modelo físico de la Chimenea Solar.

En el estudio de la chimenea solar se implementaron los materiales que se muestran en la Tabla 2. Dichos materiales fueron seleccionados dependiendo de la orientación, y el clima de la región.

Tabla 2 Materiales de la Chimenea Solar para la modelación.

Tipo de Material
Metal (aluminio)
Vidrio templado (laminado con policarbonato)
Placa absorbente
Revestimiento (pintura negra o recubrimiento de oxido)
Aislamiento térmico (poliestireno)

La chimenea solar está compuesta por diversos elementos primordiales para su funcionamiento. Como se muestra en la Fig. 3, la radiación solar (G_{solar}) incide en la estructura a través de la cubierta de vidrio, permitiendo el ingreso de energía solar (τG_{solar}). Dentro del canal de aire, se calienta el aire debido a la placa absorbente la cual capta la radiación solar para realizar la transferencia de calor. El aislamiento térmico reduce la disipación de calor, para mejorar la eficiencia del sistema.

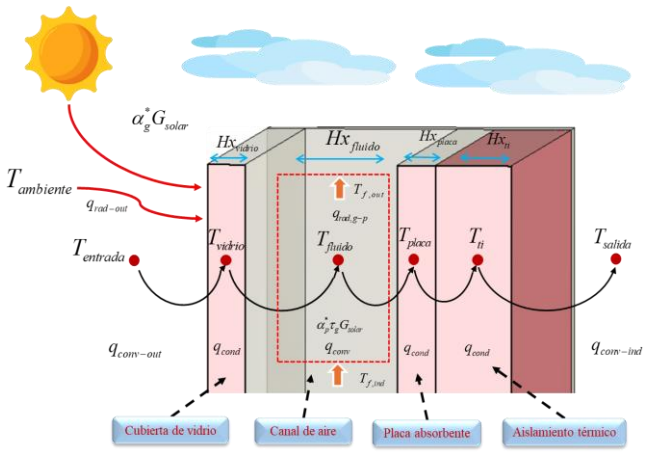


Fig. 3 Esquema de la Chimenea Solar.

En el sistema se implementa las iteraciones de conducción, convección y radiación térmica, la cual beneficia la ventilación natural en la circulación del aire. Para el cálculo de las iteraciones, se desarrolló el modelo matemático por medio de los BEG en cada uno de los elementos de la chimenea solar:

Cubierta de vidrio (g). El modelo considera la conducción térmica en capas de acuerdo con la Ec. 5, llevándose a acabo la transferencia de calor a través de la cubierta de vidrio.

$$q_{cond,g} + q_{conv-out} + q_{rad-out,} + q_{rad,g-p} + \alpha_g^* G_{solar} = \rho_{g,j} C_{P,g,j} Hx_{g,j} \frac{dT_{g,j}}{dt} \quad (5)$$

Canal de aire (f). La Ecuación (6) describe la aplicación del BEG en el canal de aire. La convección natural es considerada a lo largo del canal de aire entre la cubierta de vidrio y placa absorbente. Este modelo considera el efecto del flujo másico ($\dot{m} C_P T_f$).

$$q_{conv,g-f} + \dot{m}_{inlet} C_{P\,f,inlet} T_{f,ind} + q_{conv,f-p} - \dot{m}_{out} C_{P\,f,out} T_{f,out} = \rho_{f,j} C_{P,f,j} Hx_{f,j} \frac{dT_{f,j}}{dt} \quad (6)$$

Placa absorbente (p). La Ecuación (7) muestra el BEG aplicada a la placa absorbente. Posteriormente, se calcula el calor especifico efectivo ($C_{P,eff}$) de acuerdo con la Ec. 8. Lo anterior, considerando las temperaturas en fase liquida o sólida, el calor especifico de las mismas fases y la entalpia de cambio de fase. Por último, se calcula la difusividad térmica mediante la Ec. 9.

$$q_{conv,f-p} + q_{cond,p} + q_{rad,g-p} + \alpha_p^* \tau_g^* G_{solar} = \rho_{p,j} C_{P,eff,p,j} Hx_{p,j} \frac{dT_{p,j}}{dt} \quad (7)$$

$$C_{P,eff,p,j} = \frac{C_{P,sol} - C_{P,liq}}{2} + \frac{h_{ls}}{T_{sol} - T_{liq}} \quad (8)$$

$$\alpha_p = \frac{\lambda_{P,j}}{\rho_{p,j} C_{P,eff,p,j}} \quad (9)$$

Aislamiento térmico (ti). Considera la conducción de calor con la placa absorbente, la convección de calor con aire del interior de la edificación, el cambio radiativo del aire interior Ec. 10.

$$q_{cond,ti} + q_{conv,ti-ind} + q_{rad,ind} = \rho_{ti,j} C_{P,ti,j} Hx_{ti,j} \frac{dT_{ti,j}}{dt} \quad (10)$$

2.4 Código computacional

Para la solución del modelo de la Sección 2.3, se desarrolló un código computacional en lenguaje C++, como se muestra en la Fig. 4, con el cual se resolvieron las ecuaciones de BEG. El código emplea el método de Gauss-Seidel y Jacobi para la resolución de sistemas de ecuaciones no lineales. Las corridas computacionales fueron ejecutadas por medio de un equipo computacional con procesador Intel Core i3-1115G4 de 3.00GHz y 8 GB de RAM. El sistema operativo del equipo fue un GNU/Linux (Debian 12 de 64 bits). La validación del

código computacional se llevó a cabo con los cálculos realizados previamente de manera teórica. Lo anterior, teniendo en consideración los trabajos reportados en la literatura, para lo cual se realizaron ajustes en los nodos para obtener un número de iteraciones razonables.

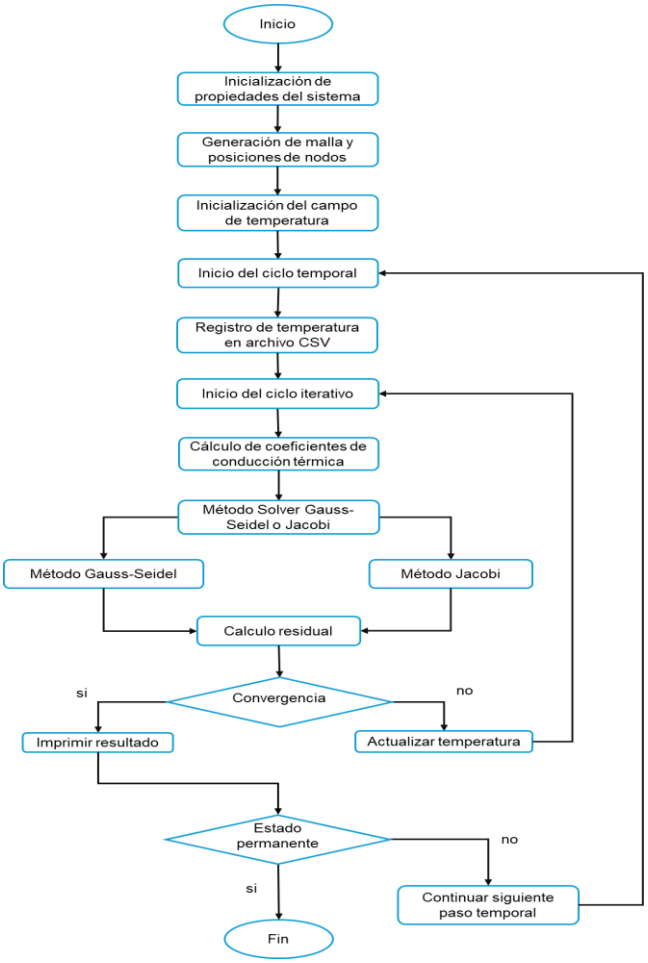


Fig. 4 Diagrama de flujo.

2.5 Datos climáticos para las condiciones de frontera

Los datos meteorológicos considerados para la simulación fueron datos de la Ciudad de Villahermosa, Tabasco. Para ello, se realizó la recolección de datos meteorológicos obtenidos de los datos de la CONAGUA. Los datos principales para la realización del estudio fueron la temperatura, velocidad del viento, presión atmosférica, radiación solar y la humedad relativa. En el filtrado de datos se obtuvieron los días más cálidos y fríos de cada mes del año.

2.6 Estudio paramétrico del modelo con datos climáticos

El estudio paramétrico se realizó para observar el comportamiento de la chimenea solar utilizando configuraciones diferentes como se muestran en la Tabla 3. Los puntos considerados para el estudio paramétrico fueron la altura de la chimenea y el tipo de material de las cuales están fabricadas, la orientación (*Este*, *Oeste*, *Sur*) y el paso de tiempo en el modelo (Δt). Las condiciones iniciales se asignaron de los datos meteorológicos obtenidos.

Tabla 3 Configuraciones para la Chimenea Solar.

Cubierta de vidrio	Placa de metal (aluminio) superficie color negro
H_x= 0.006 m λ = 1.40 W(kg°C)$^{-1}$ C_P = 750.0 J(kg°C)$^{-1}$ ρ = 2500.0 kg m^{-3} ε = 0.840 α^* = 0.076 τ^* = 0.849	H_x = 0.0015875 m λ = 177.0 W(kg°C)$^{-1}$ C_P= 875.0 J(kg°C)$^{-1}$ ρ = 2770.0 kg m^{-3} ε = 0.9 α^*= 0.97
Canal de aire	Información adicional
H_x= 0.15 m λ, C_P, ρ = Relaciones empíricas	h_{int} = 10.0 W m-2 °C^{-1} h_{ext} = 2.8 + 3.0V$_{wind}$ W m^{-2} °C^{-1} Orientación cubierta de vidrio: Este- Oeste Δt = 5 segundos

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

3.1 Validación

La validación del código implementado en el estudio se realizó mediante la revisión de resultados obtenidos en la literatura. A partir del análisis de la literatura revisada se obtuvieron datos para proponer el modelo del presente estudio, donde se buscó obtener mejoras en el comportamiento térmico y el flujo de aire en la chimenea solar.

El código computacional desarrollado se sometió a pruebas variando los parámetros de entrada para obtener resultados estables. Se evaluó el efecto de la inercia térmica en la placa de metal implementada en la chimenea solar, visualizando la distribución de temperatura, la eficiencia del sistema. La metodología de solución y el modelo BEG fueron validados usando datos experimentales de un prototipo de chimenea solar reportado por Torres-Aguilar et al. (2022). La Tabla 4 muestra un comparativo de los resultados numéricos obtenidos contra los resultados experimentales reportados. Se puede observar, con una configuración del flux de calor a 100 W/m^2 realizado en estado transitorio, que la máxima diferencia porcentual y la diferencia promedio porcentual fueron de 16% y 6.6% respectivamente.

Tabla 4 Comparativo de los resultados numéricos obtenidos en el presente estudio y los datos experimentales reportados por Torres-Aguilar et al. (2022).

Flux de calor (W/m^2)	Hora del día (h:min)	Flujo másico (kg/s)	
		Presente estudio	Torres-Aguilar et al., (2022)
100	03:00	41.21	39.66
100	06:00	42.25	43.32
100	09:00	42.25	44.25
100	12:00	42.75	45.50
100	15:00	42.20	47.40
100	18:00	42.15	50.15
100	21:00	41.34	46.05

Como resultado de la validación se obtuvo una diferencia mínima de los flujos másicos inducidos por la chimenea, con una diferencia máxima de la desviación media cuadrática de 11.79% entre los datos experimentales y la simulación. La máxima desviación media cuadrática obtenida de la simulación del presente estudio fue baja comparada con lo reportado por Marthur et al. (2006) y Duan (2019), quienes reportan 23 y 17.4% respectivamente. Por lo cual, se consideró que los resultados del modelo propuesto en este estudio son factibles. La validación del modelo y el código fueron fundamentales para la obtención del comportamiento de la chimenea solar junto a las condiciones empleadas en cada configuración.

3.2 Comportamiento térmico

Por medio de los cálculos del modelo de BEG para el estudio paramétrico de la chimenea solar, se realizó la evaluación considerando un periodo de dos días. Estos días se seleccionaron de una base de datos de un año, en donde se consideraron sus estaciones para elegir el mes más cálido y el más frio. Las gráficas muestras el comportamiento del flujo másico máximo de dos estaciones del año. Para ello, se tomó en cuenta la estación de verano, como se muestra en la Fig. 5 y Fig. 6, utilizando los datos del mes de julio. De igual manera se tomaron en cuenta los datos de diciembre para la estación de invierno, como se muestran en la Fig. 7 y Fig. 8. Estas figuras, muestran el comportamiento térmico en los diferentes días y orientaciones para el análisis de la eficiencia de las chimeneas solares. Cada una de las gráficas muestra la variación de temperatura en grados Celsius (°C) y el flujo másico (kg/s) con las condiciones climáticas y orientación de la chimenea solar (*Este*, *Oeste* y *Sur*).

En el mes de julio el día más cálido con orientación *Este* (Fig. 5), presento un comportamiento térmico progresivamente alto desde las primeras horas de la mañana alcanzando un pico alto al mediodía, teniendo un descenso hacia la tarde noche. El flujo másico tuvo un comportamiento similar con valores máximos de incidencia solar. En comparación del día más frio del mes de Julio (Fig. 6) con orientación *Oeste*, presentando una variación menos pronunciada en la temperatura. La temperatura presento una mínima acumulación térmica y mostrando un comportamiento similar en el flujo másico.

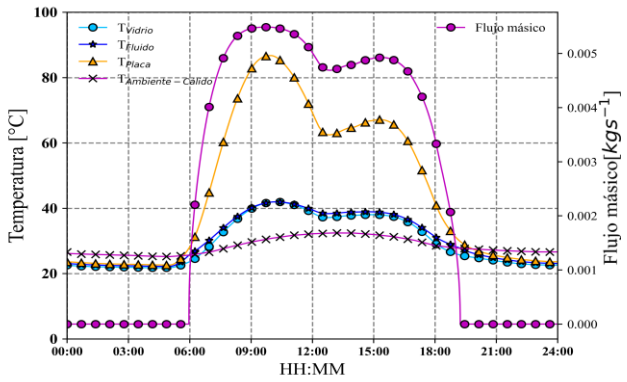


Fig. 5 Comportamiento térmico del 27 de julio del 2024, día Cálido-Orientación Este.

Los datos obtenidos en el mes de diciembre en el día más cálido con orientación Oeste (Fig. 7), mostraron un comportamiento similar a la Fig. 5. El comportamiento fue de manera progresiva en la variación térmica de la temperatura. En la simulación se obtuvo un máximo al mediodía y disminuyo para el transcurso de la tarde. El flujo másico presento un comportamiento asociado a la temperatura. Mientras que, para el día más frio del mes de diciembre (Fig. 8), se obtuvo una variación térmica moderada, donde los valores de temperatura fueron menores en comparación con el día cálido. El comportamiento de la temperatura provoco que el flujo másico tuviera valores bajos.

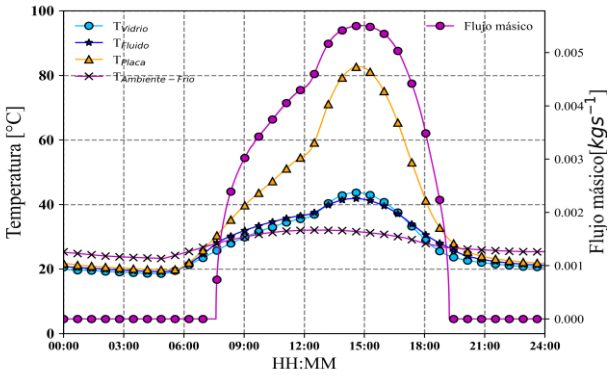


Fig. 6 Comportamiento térmico del 06 de julio del 2024, día Frio-Orientación Oeste.

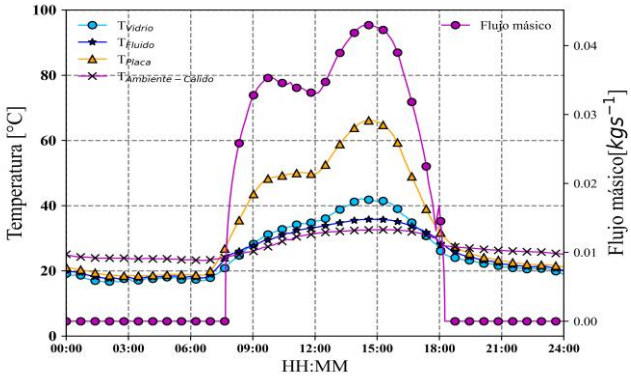


Fig. 7 Comportamiento térmico del 01 de diciembre del 2024, día Cálido-Orientación Oeste.

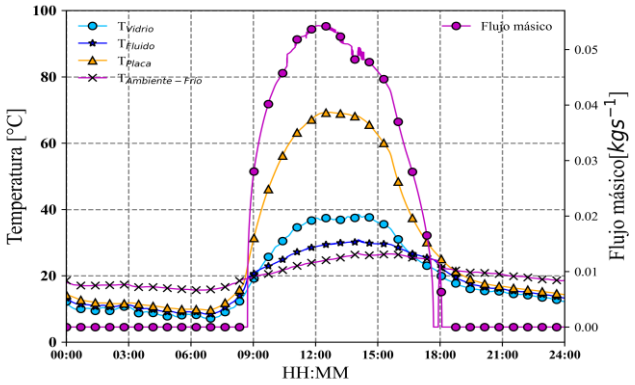


Fig. 8 Comportamiento térmico del 22 de diciembre del 2024_Día Frio_ Orientación Sur.

Entre los datos obtenidos, se pueden resaltan los valores con mejor desempeño del flujo másico, para el día cálido y frio de los dos meses presentados, como se muestran en la Tabla 5. Por otro lado en la Tabla 6, se observan los valores con menor desempeño de flujo másico inducido, lo que provoca una menor eficiencia para el confort térmico. Estos resultados son la base para establecer las condiciones de referencia para el análisis de la chimenea solar acoplada a una edificación, que se realizará como continuidad a este estudio.

Tabla 5 Valor Máximo de Flujo Másico.

	Flujo másico (kg/s)	
	Julio	Diciembre
Cálido	0.005487	0.043016
Frio	0.054305	0.05508

Tabla 6 Valor Mínimo del Flujo Másico.

	Flujo másico (kg/s)	
	Julio	Diciembre
Cálido	0.0000049	0.000866
Frio	0.000046	0.000871

4. CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó el comportamiento térmico y la eficiencia de chimeneas solares como sistemas pasivos de ventilación natural en edificaciones, con el fin de mejorar el confort térmico y reducir el consumo energético derivado del uso de aire acondicionado. La metodología utilizada combinó un modelo teórico basado en balances de energía global (BEG), analogía con circuitos eléctricos y simulaciones computacionales desarrolladas en C++, validadas con datos experimentales reportados en la literatura. Dentro de los principales resultados se pueden destacar los siguientes:

- Se encontró que la orientación y el clima influyen significativamente en el desempeño térmico, siendo las configuraciones orientadas al este y oeste las que mostraron mejor comportamiento térmico en días cálidos.
- Los flujos másicos, obtenidos por inducción en la chimenea solar, fueron mayores durante el verano alcanzando valores de hasta 0.05508 kg/s, lo cual favorece una ventilación natural.
- El aislamiento térmico, la elección de materiales y la geometría de la chimenea solar son factores determinantes en la acumulación de calor y en la estabilidad del flujo de aire.
- La metodología BEG permitió analizar cada componente de la chimenea solar, considerando conducción, convección y radiación como mecanismos simultáneos de transferencia de calor.

A partir de los resultados obtenidos, se puede decir que las chimeneas solares representan una alternativa viable y eficiente para mejorar la ventilación natural y reducir el uso de climatización artificial en edificaciones. Para mejorar el desempeño térmico de estos sistemas, se podría aplicar este modelo a simulaciones acopladas con edificaciones reales y explorar el efecto de combinaciones con otros sistemas pasivos.

REFERENCIAS

Cui, H, Han, M, Zhang, J, Han, Z, Xu, F. & Liu, Q 2024, 'Theoretical analysis and numerical study of natural convection inside combined solar chimney', Energy Science & Engineering, vol. 12, no. 5, pp. 2052–2071.

Duan, S 2019, 'A predictive model for airflow in a typical solar chimney based on solar radiation', *Journal of Building Engineering*, 26, 100916.

Huang, Y, Wang, B, Luo, C, Shi, L, Lu, N, Dong, B. & Zhong, H 2024, 'Theoretical models for predicting ventilation performance of vertical solar chimneys in tunnels', Renewable Energy, vol. 232.

International Energy Agency 2023, World Energy Outlook 2023, International Energy Agency, Paris.

Mathur, J, Bansal, N. & Jain, M 2006, 'Experimental investigations on solar chimney for room ventilation', *Solar Energy*, 80, pp. 927–935.

Saifi, N, Baadi, A, Ghedamsi, R, Guerrout, A. & Settou, N 2024, 'An experimental study and numerical simulation of natural ventilation in a semi-arid climate building using a wind catcher with evaporative cooling system and solar chimney', Journal of Building Engineering, vol. 85.

Tao, Y, Yan, Y, Chew, M. Y. L, Tu, J. & Shi, L 2023, 'A theoretical model of natural ventilation enhanced by solar thermal energy in double-skin façade', Energy, vol. 276.

Torres-Aguilar, C. E, Arce, J, Xamán, J. & Macias-Melo, E, 2022, 'Experimental study and numerical analysis of radiative losses of single-channel solar chimney', *Journal of Building Physics*, 46, pp. 340–371.

Performance Evaluation of Photovoltaic Panels Integrated with Passive Cooling Systems

Angulo Castellanos, Jesús Kalep*, Torres Aguilar, Carlos Enrique*, Macias Melo, Edgar Vicente*, Aguilar Castro, Karla María*, Ramírez Hernández, Julio César*

**Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, 86690.*
(e-mail: angulokalep@gmail.com, enrique.torres@ujat.mx, edgar.macias@ujat.mx, karla.aguilar@ujat.mx, julio.ramirez@ujat.mx)

Abstract: This study analyzed the thermal behavior of photovoltaic (PV) panels integrated with a passive cooling system, aiming to reduce their operating temperature and improve their energy efficiency. Heat sinks were used as passive cooling systems. A CFD simulation analysis was performed using computer-aided design tools (Fusion 360) and CFD simulation software (Autodesk) under the environmental conditions of Villahermosa, Tabasco. The methodology compared two cases: a PV system without a heat sink (Case 1) and another with an attached aluminum heat sink (Case 2). The principles of heat transfer (conduction, convection, and radiation) were applied, and specific materials such as aluminum 6061, EVA, glass, and polycarbonate were considered. Simulations were performed using a standard mesh, a steady-state turbulence model, and boundary conditions based on climate data provided by CONAGUA. The results showed that in Case 1, the maximum temperatures ranged between 52–58 °C, while in Case 2, due to the incorporation of the heat sink, they were reduced to a range of 40–44 °C. This represents an average decrease of 13 °C, which significantly improves the performance of the PV system. Furthermore, the airflow analysis revealed that the heat sink promotes better air circulation at the rear of the panel, enhancing thermal dissipation without requiring additional energy. The results indicate that passive cooling systems such as heat sinks are a viable and efficient alternative to increase the lifespan and energy performance of PV panels. To further improve the thermal performance of PV systems, it is suggested to evaluate configurations with multiple heat sinks and optimize their geometries to maximize heat transfer.

Keywords: Photovoltaic, CFD, Heat sinks, Fusion 360, Efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

Con el pasar del tiempo, la energía eléctrica ha tenido una notable evolución, por ende, su demanda también ha crecido en paralelo con el aumento de la población humana y su expansión en los diferentes sectores productivos, agricultura, líneas de ensamblaje, el uso de artículos en casa habitación y el sector industrial. Para satisfacer esta creciente demanda, han surgido alternativas para la generación de energía eléctrica, algunas de estas son: Energía Eólica, Energía Mareomotriz, Energía Geotérmica, Energía Hidráulica, Energía Nuclear, Energía Solar, entre otras.

La Energía Solar ha tenido una gran relevancia con el pasar de los tiempos, esto debido a su disponibilidad, facilidad con la que se puede aprovechar y a los avances tecnológicos que se ha logrado con la obtención mediante el uso y la aplicación de Paneles Fotovoltaicos Grossman, (2002).

En el mercado actual, los Paneles Fotovoltaicos (PV, por sus siglas en inglés), con mayor demanda son dos tipos: Monocristalinos, estos pueden ofrecer una gran eficiencia energética, la cual varía entre un 17% y el 23%, con un gran rendimiento, por lo cual, su costo es más elevado. Por otro lado, los Policristalinos presentan una eficiencia menor, la cual oscila entre los 15% y el 17%, con un rendimiento medio-alto, pero este se encuentra a un precio más accesible.

Los sistemas de PV son una gran opción, en cuanto a eficiencia y sostenibilidad para la generación de energía eléctrica. No obstante, su desempeño puede verse afectado por muchos factores tanto ambientales como operacionales. Pero en estos sistemas en particular a medida que su temperatura de operación aumento, su eficiencia en la conversión de energía disminuye, por lo cual, este detalle genera pérdidas energéticas significativas, las condiciones nominales de operación de un PV suele estar entre los 45 y 50 °C. Por su parte, Akrouch et al., (2025) han estudiado formas de enfriamiento para poder mitigar el este efecto generado en los PV, una de ellas es el enfriamiento pasivo mediante disipadores de calor, los cuales pueden ser de aluminio. En este sentido, Krstic et al., (2024) reportan una investigación realizada con el propósito de reducir la temperatura del PV, dando como resultado la disminución en un 7.5°C cuando se ocupa un disipador de aluminio, mejorando así su rendimiento y eficiencia energética.

La eficiencia de la generación de energía también se ve afectada por otros fenómenos, uno de ellos es conocido como

"Punto Caliente" (Hot Point, en inglés), dicho fenómeno puede impactar el rendimiento de los PV y estos reducir su vida útil por llegar a operar a temperaturas no recomendadas por el fabricante.

Este problema puede provocar daños irreversibles a los paneles solares, ya que con la presencia de sombras parciales esta genera un calentamiento en ciertas áreas del panel solar Asitimbay Regalado Mayra, (2018).Si esta condición persiste por tiempos prolongados, puede llegar a generar daños en la resina del panel, llegando así afectar su funcionamiento y la durabilidad de este. En este sentido, Hussien et al., (2023) reportan un estudio donde utiliza técnicas de refrigeración activas, con el fin de recudir el sobrecalentamiento de los PV. Por lo que, analizar el beneficio de alternativas de enfriamiento es un tema relevante en el estudio de eficiencias de PV.

De igual forma se han realizado diversos estudios donde se aplican diversos métodos de enfriamiento, algunas de ellas serian aplicar a los PV enfriamiento por aire, agua y el uso de materiales de cambio de fase (PCM), de igual forma los autores Akrouch et al., (2025), redactan que existen métodos por convección forzada y otras formas innovadoras. En este trabajo se analizará la eficiencia térmica de un panel fotovoltaico evaluando aspectos de diseño en disipadores térmicos que permitan aumentar la generación de energía eléctrica para diferentes aplicaciones. El estudio se basa en refrigeración pasiva, la cual no consume energía eléctrica, el cual constará de un disipador de calor, colocado en el punto central de un PV para así poder tener una mejor disipación de calor y contribuir a mejorar su eficiencia.

2. METODOLOGÍA

Para el estudio se realizó una revisión de las configuraciones de estructuras comerciales de PV reportadas en la literatura para seleccionar las más utilizadas, accesibles y de bajo costo. Lo anterior, con el fin de proponer un primer modelo acoplando un disipador para evaluar térmicamente un modelo estándar de un panel fotovoltaico con estructura a través de un modelo diferencial con Dinámica de Fluido Computacional (CFD).

Este estudio se llevó a cabo tomando en consideración varios factores, desde la implementación de un software de diseño (Fusión 360) y CFD ambos de Autodesk. Se optó por el uso de estos softwares por su gran versatilidad y fácil manejo de este al momento de llevar a cabo diseños, partiendo como principio la mejora de, rendimiento energético de los PV. En la Fig. 1 se presenta el esquema obtenido de fusión 360, el cual es el esquema del modelo de PV sin disipador, este nos servirá como punto de partida para así analizar las temperaturas que alcanzaría el sistema sin un mecanismo de disipación térmica.

Posteriormente, en la Fig. 2 se muestra el esquema del modelo de PV con disipador, este nos permitirá realizar una evaluación de como el disipador de calor influye al momento de observar el comportamiento térmico del sistema del PV.

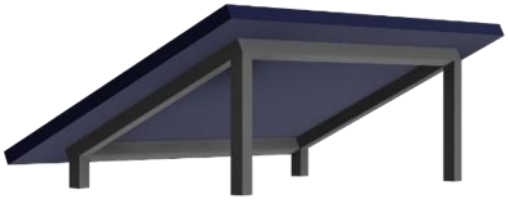


Fig. 1 Esquema del modelo de PV sin disipador, Fusión 360 (Caso 1).



Fig. 2 Esquema del modelo de PV con disipador, Fusión 360 (CASO 2).

El esquema de la Fig.1 considera un modelo del SDC (Sistema de Disipación de Calor), con el objetivo principal de reducir la temperatura de los PV y así lograr mejorar su rendimiento en la parte del suministro de generación de energía eléctrica. Para esto se consideraron los mecanismos de transferencia de calor (Cengel, 2007), esto con el fin comprender los métodos de conducción de calor, ya que se apreciarán en el PV. Estos mecanismos de transferencia de calor son: 1) la Conducción (Ec.1), Ley de Fourier; 2) la Convección (Ec. 2), Ley de enfriamiento de Newton; y 3) la Radiación (Ec. 3), Ley de Stefan-Boltzmann.

$$q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \tag{1}$$

$$q = hA_s\left(T_s - T_\infty\right) \tag{2}$$

$$q = \varepsilon \sigma A(T_s^4 - T_\infty^4) \tag{3}$$

Donde: q es la transferencia de calor por la conducción (W); λ es la conductividad térmica del material en (W/mK); la dT/dx es un gradiente de temperatura en la dirección que tiene el flujo de calor; h es un coeficiente de la transferencia de calor por convección (w/m^{2}K); T_s es la temperatura a la que está la superficie de incidencia (K); T_∞ es la temperatura a la que está el fluido (K); ε es la emisividad de la superficie del elemento en particular (el cual es adimensional); σ es la constante de Stefan-Boltzmann de (5.67×10^{-8} W/m^{2}K^4); y A es el área total de la superficie emisora.

Teniendo en consideración los fenómenos de mecanismo de transferencia de calor antes mencionados, se toma en

consideración los puntos de calor y se determinó que la zona con mayor impacto es la parte central del mismo, teniendo en cuenta este punto se decidió la ubicación del disipador de calor, para que así tenga un adecuado desempeño.

Partimos del diseño de un disipador pasivo y su creación en el software Fusión 360. De igual forma se crea un diseño completo de un sistema de PV, el cual está puesto sobre una estructura para poder hacer la simulación de un caso con consideraciones climáticas reales.

Teniendo todo el mecanismo del PV con su estructura y acoplado al disipador de calor se procede realizar el análisis en CFD, para ello se toma en consideración los factores ambientales, lo cual se toma la evaluación de las condiciones ambientales más relevantes, como son: La temperatura máxima y mínima, la velocidad del viento, radiación, entre otras condiciones. Esto con el fin de que el estudio pueda ser adaptado a cualquier entorno ambiental, desde un clima cálido hasta un clima árido. Todos estos datos obtenidos de las unidades meteorológicas de la CONAGUA. Se consideraron los datos climáticos de Villahermosa, Tabasco. Se tomaron en cuenta los valores promedio con fecha de diciembre 2024: estos oscilan entre los 20 °C de temperatura ambiente.

Teniendo la información de las condiciones climáticas y el diseño propuesto (Fig.1), se procede a la utilización del programa CFD, donde se llevó a cabo la simulación con las condiciones a estudiar, para ello se realizaron diversas etapas, como la asignación de los materiales con los que estará compuesto el diseño, desde el aluminio el cual compone la estructura que sostendrá el PV hasta el mismo que se utilizara en el disipador de calor, de igual forma todos materiales que conforman el PV. La Tabla 1 muestra los materiales considerados.

Tabla 1. Materiales considerados para la modelación del PV.

Materiales	Donde se aplican
Aluminio 6061	• Base para el PV • Disipador de calor
EVA (Etileno Acetato de vinilo)	• 2 capas de las que está estructurado el PV
Vidrio	• Capa superior del PV
Polímero de policarbonato	• Capa inferior del PV
Celda fotovoltaica	• Capa central del PV

Posteriormente, se aplicaron las condiciones de frontera en cada material para así realizar las simulaciones adecuadamente, Tabla 2. De esta forma es posible observar el comportamiento del diseño propuesto, desde el comportamiento térmico del sistema sometido a condiciones climáticas de alta temperatura.

Con las consideraciones anteriores se procede a la evaluación de los datos obtenidos en el programa CFD, donde se resuelven las ecuaciones gobernantes del sistema: Continuidad o conservación de masa (Conservación de masa), Ec. 4; Ecuación de cantidad de movimiento (Navier-Stokes promediadas por Reynolds-RANS), Ec. 5; Ecuación de conservación de energía, Ec. 6; Ecuación de energía cinética turbulenta (k), Ec. 7; Ecuación de disipación de energía turbulenta (ε), Ec. 8. Además, para la simulación se consideró un mallado estándar (malla tetraédrica), el modelo de turbulencia κ-ε, y se consideró el estado permanente. Lo anterior, para determinar si el diseño propuesto del disipador de calor tiene algún aporte positivo al problema del sobrecalentamiento de los PV.

Tabla 2. Condiciones de frontera.

Condiciones de frontera	Material donde se aplico
Velocidad de (0 m/s)	• Cara superior y caras laterales de PV
Entrada de aire (m/s)	• Parte frontal del PV
Condición desconocida	• Caras laterales y parte inferior del PV
Aplicación de temperatura (°C)	• Cara frontal de entrada del aire
Aplicación de temperatura (°C)	• Parte inferior del aire
Condición de frontera de aislante térmico (°C)	• Caras laterales del PV
Condición de flujo de calor (W/m^2)	• Cara superior del PV
Condición convectiva	• Cara superior del PV
Condición de radiación	• Cara superior del PV

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho \bar{u}_i\right)}{\partial x_i}=0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial\left(\rho \bar{u}_i\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j\right)}{\partial x_j}=-\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\mu_t\right)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]+\ldots \quad \rho g_i \beta\left(\bar{T}-T_o\right) \tag{5}$$

$$\frac{\partial\left(\rho \bar{T}\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho u_i \bar{T}\right)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\lambda}{cp}+\frac{\mu_t}{\sigma_T}\right)\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}\right] \tag{6}$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho \bar{u}_j k\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+P_k+G_k-\varepsilon \tag{7}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho \bar{u}_j \varepsilon\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\left[f_1 P_k+C_{3\varepsilon} G_k\right]\frac{\varepsilon}{k}+E-C_{2\varepsilon} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \tag{8}$$

Donde: ρ es la densidad (kg/m^3); u, v y w son las componentes de la velocidad (m/s) en las direcciones x,y y z; t es el tiempo (s); P es la presión (Pa); μ es la viscosidad dinámica (kg/m·s); T es la temperatura (K); λ es la conductividad térmica (W/m K); c es el calor especifico (J/kg·K); g es la gravedad; β es el coeficiente de expansión volumétrica (1/K); ε es la tasa de disipación de energía cinética turbulenta (m$_2$/s^3) y k es la energía cinética turbulenta (J/kg).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo del sistema PV fue analizado considerando dos casos: Caso 1 (sin disipador, Fig. 1) y Caso 2 (con disipador, Fig. 2). En el Caso 1 se aprecia como es el diseño sin disipador de calor, esto con la finalidad de ver el comportamiento térmico del mismo sin ningún aditamento y así observar las temperaturas máximas que se pueden alcanzar. Lo anterior, con el propósito de tener un punto de referencia para el siguiente caso. En la Fig. 3 podemos observar el comportamiento térmico del Caso 1.

Como se puede observar en la Fig. 3 y 4 el sistema llega a alcanzar temperaturas que oscilan entre los 52-58°C. En la Fig. 3(a) se observa que la temperatura disminuye gradualmente respecto al espesor del sistema de PV. Por otra parte, la Fig. 3(b) muestra la temperatura del aire adyacente al sistema de PV, esta imagen se observa que los cambios de temperatura no fueron significativos. También, se pudo observar el comportamiento de la temperatura en la sección posterior, Fig. 4(a), donde se obtuvo una máxima temperatura de 38°C. Mientras que, la temperatura más alta se presenta en la superficie horizontal que capta la energía solar, Fig. 4(b). Este comportamiento se debe a la incidencia de la radiación solar sobre el sistema de PV, la exposición prolongada en superficies con altas temperaturas ambientales afecta directamente a su desempeño energético y su funcionamiento. Por lo tanto, se recomienda llevar a cabo el estudio del Caso 2, con fin de poder mitigar las temperaturas excedidas del mismo sistema evitando que este se vea afectado en su desempeño y garantizando una mayor vida útil.

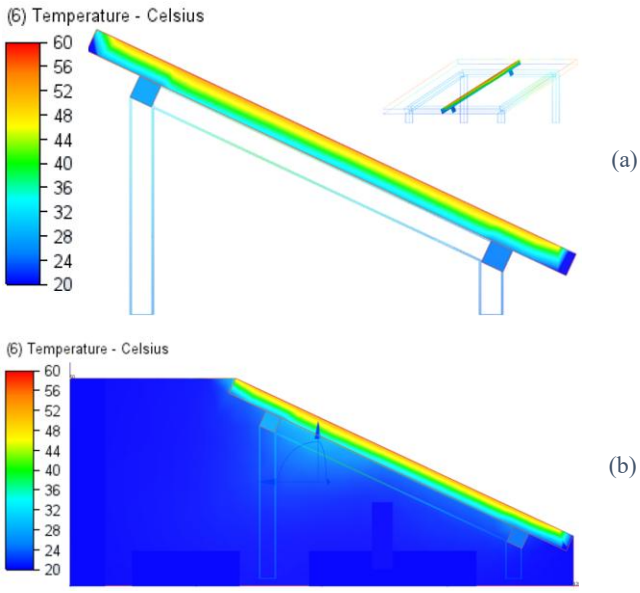


Fig. 3 Esquema del modelo de PV sin disipador, CFD AutoDesk (Caso 1), (a) corte transversal, (b) comportamiento del aire adyacente.

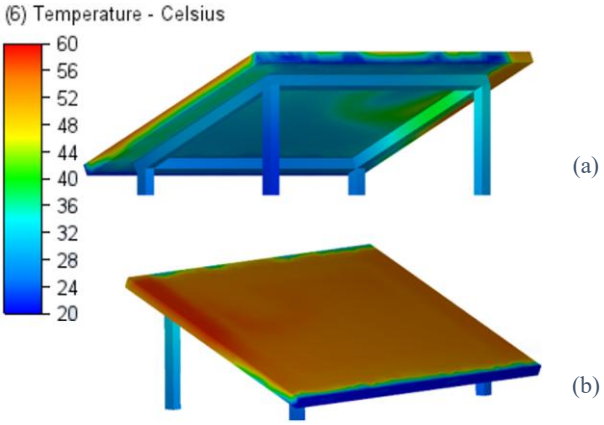


Fig. 4 Modelo de PV sin disipador, CFD AutoDesk (Caso 1), (a) vista posterior y (b) vista frontal.

En la Fig. 5 se presenta un análisis del Caso 1 en el cual se analiza el flujo de aire normal sobre el sistema del PV en condiciones normal, es decir, este no consta de algún disipador de calor. Se evaluó el comportamiento del aire alrededor y en cualquier dirección del sistema, esto con el propósito de comprender la eficiencia del aire y como este no genera ningún impacto en el PV. Como se puede observar en esta figura, la máxima velocidad del aire fue de 1.45 m/s (145 cm/s), mostrando un comportamiento sin cambios significativos como en el caso de la temperatura.

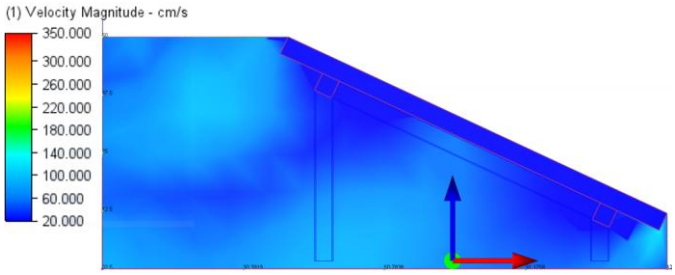


Fig. 5 Modelo del PV sin disipador de calor y su comportamiento a través del flujo del aire, CFD AutoDesk (Caso 1).

En el Caso 2, Fig. 6, se observa cómo influye el comportamiento térmico cuando se adiciona al modelo del PV un disipador de calor. Al comparar este comportamiento térmico con el Caso 1, se aprecia un cambio bastante notorio y su efecto positivo en la disipación de térmica del PV. Como se puede observar las temperaturas máximas oscilaron entre los 40°C y 44°C. Esto debido a que este último, cuenta con el aporte del disipador de calor permitiéndole que el flujo del aire le favorezca de tal forma que genere una inducción del aire a través de las aletas del disipador y, permitiendo así una refrigeración del sistema, dando como resultado un mejor rendimiento energético. Por lo cual, se alcanzaron temperaturas menores.

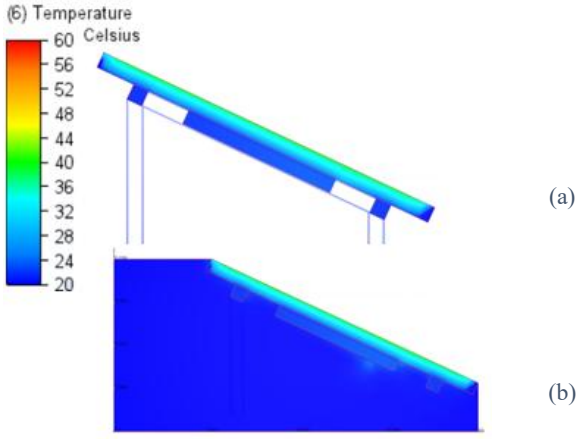


Fig. 6 Esquema del modelo de PV con disipador, CFD AutoDesk (Caso 2), (a) corte transversal, (b) comportamiento del aire adyacente.

En la Fig. 7 también se puede observar como el sistema de PV alcanza temperaturas que oscilan entre los 40°C y 44°C en su superficie frontal, que es una temperatura inferior que la del Caso 1 (52°C y 58°C), debido al efecto del disipador de calor.

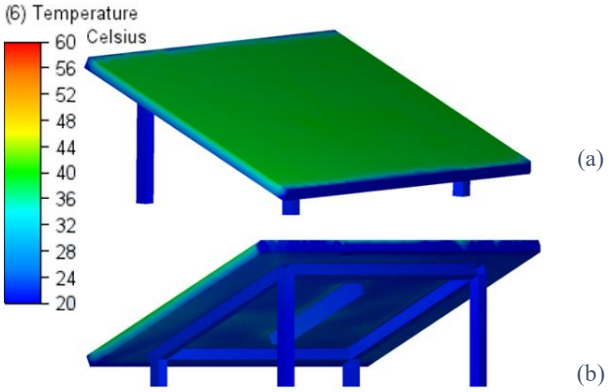


Fig. 7 Modelo de PV con disipador, CFD AutoDesk,), (a) vista frontal y (b) vista posterior.

En la Fig. 8 se muestra el análisis CFD sobre el flujo de aire, esto alrededor de un sistema de PV con disipador de calor (Caso 2). En la imagen se aprecia el comportamiento del flujo del aire entre la estructura, el disipador y su efecto en la sección posterior del sistema. El disipador contribuye a generar un efecto positivo en la transferencia de calor para enfriar el PV, lo cual, se ve reflejado en el comportamiento térmico del sistema completo. A partir de los resultados obtenidos se pudo observar que, con la incorporación de un solo disipador, se logró una reducción de la temperatura de calentamiento del sistema PV de 13°C en promedio, lo cual se espera mejore la eficiencia del sistema. Por lo que, es interesante evaluar la mejora de la eficiencia, así como su cambio cuando se incorporan más disipadores de calor, en diferentes ubicaciones.

Este estudio todavía esta abierto a mejoras, tanto como el diseño del sistema de disipación, como la forma de analizar todo el sistema de PV, desde la aplicación de las condiciones de frontera hasta la cantidad de iteraciones para poder tener resultados más certeros y precisos.

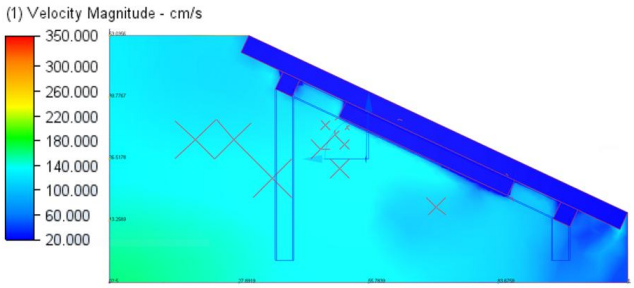


Fig. 8 Modelo del PV con disipador de calor y su comportamiento a través del flujo del aire, CFD AutoDesk (Caso 2).

CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo como objetivo analizar el comportamiento térmico de un panel fotovoltaico acoplado a un sistema de enfriamiento pasivo, con la finalidad de reducir su temperatura de operación y mejorar su eficiencia energética. Para ello, se desarrolló un modelo computacional usando herramientas de diseño CAD (Fusion 360) y simulación CFD (Autodesk), considerando condiciones climáticas reales de Villahermosa, Tabasco. Los principales hallazgos del estudio pueden resumirse como:

- El modelo sin disipador permitió alcanzar temperaturas entre 52 °C y 58 °C, lo que supera los valores nominales recomendados para operación eficiente de sistemas de PV.
- La inclusión de un disipador de calor permitió reducir la temperatura de operación a un rango de 40 °C a 44 °C, mostrando una mejora significativa en el control térmico del panel. Con lo cual se obtuvo una diferencia de temperatura promedio entre ambos casos de 13 °C, lo cual representa una contribución en la vida útil y rendimiento del panel fotovoltaico.
- El análisis del flujo de aire evidenció que el disipador induce una mejor circulación del aire en la zona posterior, facilitando la disipación natural del calor sin necesidad de consumo energético adicional.

Finalmente, se puede concluir que la implementación de un sistema pasivo de disipación térmica en paneles fotovoltaicos demuestra ser una alternativa para mejorar su desempeño. Sin embargo, se sugiere evaluar el efecto de múltiples disipadores ubicados en diferentes zonas del panel, así como el análisis de geometrías optimizadas para analizar si puede mejorar aún su desempeño térmico.

REFERENCIAS

Asitimbay Regalado, M.Y. 2017, 'Método de detección de puntos calientes en paneles solares', tesis de maestría, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, visto 31 marzo 2025, https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15139.

Akrouch, M.A., Chahine, K., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C. & Khaled, M. 2025, 'Advancements in cooling techniques for enhanced efficiency of solar photovoltaic panels: A

detailed comprehensive review and innovative classification', *Energy and Built Environment*, KeAi Communications Co., visto 10 mayo 2025, https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.11.002.

Çengel, Y.A. 2007, *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*, 3ª edn, McGraw-Hill, México.

Grossman, G. 2002, 'Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning', Solar Energy, vol. 72, no. 1, pp. 53–62, visto 31 marzo 2025, https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00094-4.

Krstic, M., Pantic, L., Djordjevic, S., Radonjic, I., Begovic, V., Radovanovic, B., y Mancic, M. 2024, 'Passive cooling of photovoltaic panel by aluminum heat sinks and numerical simulation', Ain Shams Engineering Journal, vol. 15, no. 1, Elsevier, visto 31 marzo 2025, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2090447921000272.

Hussien, A., Eltayesh, A. & El-Batsh, H.M. 2023, 'Experimental and numerical investigation for PV cooling by forced convection', Alexandria Engineering Journal, vol. 64, pp. 427–440, visto 31 marzo 2025, https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.006.

Application of a Standardized Protocol for Temperature Sensor Calibration Based on ASTM E-220

Cruz Pascual, Giuliani Emmanuel*, Macias Melo, Edgar Vicente*, Aguilar castro, Karla María*, Torres Aguilar, Carlos Enrique*, Pérez Olán, Isa Yadira*

** Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, C.P. 86690.*
(e-mail: 192D23181@alumno.ujat.mx, edgar.macias@ujat.mx, karla.aguilar@ujat.mx, enrique.torres@ujat.mx , isa.perez@ujat.mx).

Abstract: The present work developed a standardized methodology for calibrating temperature sensors based on the ASTM E220-19 standard, with application in building thermal comfort studies. The objective was to evaluate the accuracy, consistency, and behavior of different types of temperature sensors under controlled laboratory conditions. The sensors tested included resistance temperature detectors such as PT100 and PT1000, type T and K thermocouples, and thermistors with nominal resistances of 2 kΩ, 20 kΩ, and 100 kΩ. For this purpose, an experimental system was designed consisting of a recirculating thermal bath to control water temperature, an ice bath to approximate the 0 °C reference point, a data acquisition system, and a PC for data processing and analysis. The study used four calibration points: 0 °C, 10 °C, 50 °C, and 90 °C. Calibration equations were applied according to sensor type: the Callendar–Van Dusen model for RTDs, the Steinhart–Hart equation for thermistors, and high-order polynomial regression models following the ASTM E230-17 standard for thermocouples. All measurements were processed using a custom computational routine developed in Octave. The results demonstrated that PT1000 and PT100 sensors showed excellent thermal stability and low root mean square error (EMC), with values of 0.127 °C and 0.302 °C, respectively. Type T and K thermocouples displayed high accuracy with deviations below ±0.05 °C. In contrast, thermistors exhibited more significant measurement variability, particularly at high resistance levels. Overall, the proposed methodology proved effective, versatile, and applicable for the reliable calibration of various temperature sensor technologies in energy and building science applications.

Keywords: Calibration, thermocouple, thermistor, PT1000, Building.

1. INTRODUCCIÓN

La calibración de sensores de temperatura es un proceso crítico en diversos campos, como la industria alimentaria, farmacéutica y automotriz, donde se emplean múltiples sensores para monitorear y controlar procesos clave. Sin embargo, la falta de estandarización en las mediciones puede generar inconsistencias y disminuir la confiabilidad de los datos. La precisión de estos sensores varía según factores como la marca, el modelo y las condiciones de operación, lo que hace esencial una calibración adecuada para garantizar resultados exactos. La norma ASTM E220-19 proporciona directrices para el uso de termopares y termómetros de resistencia en la medición de temperatura, asegurando la precisión y fiabilidad de los datos. Esta norma se basa en la comparación de las mediciones del termopar y las mediciones de un termómetro de referencia. El termómetro de referencia puede ser un termopar, un termómetro de líquido en vidrio o un termómetro de resistencia de platino, dependiendo de la temperatura y la exactitud requerida.

A pesar de estas pautas, es necesario investigar cómo la calibración de diferentes sensores puede mejorar la precisión y minimizar los errores. Para abordar esta necesidad, se propone una metodología de calibración basada en la norma ASTM E220-19, la cual establece procedimientos para la calibración entre sensores, la sincronización de datos, la resolución de conflictos y la calibración conjunta. La calibración comprende una serie de operaciones que, bajo condiciones reguladas, determinan la correlación entre las señales generadas por un aparato de medición y los valores de referencia de temperatura proporcionados por los patrones empleados. Su objetivo es garantizar la exactitud y fiabilidad del aparato calibrado. El sensor debe ser sencillo de calibrar y los procedimientos requeridos para su implementación deben ser mínimos. Además, no es necesario que los sensores se calibren de manera regular.

Desarrollar protocolos de calibración basados en normas estandarizadas permite integrar metodologías más precisas y replicables en entornos industriales diversos. Mediante la aplicación de la norma ASTM E220-19, se optimiza el uso de recursos y se facilita el mantenimiento de la consistencia en las mediciones, lo cual es fundamental para el monitoreo y control de procesos clave. El enfoque propuesto contribuye a reducir discrepancias derivadas de la variabilidad entre sensores, mejorando así la calidad de los datos y fortaleciendo la toma de decisiones basada en información confiable. La calibración adecuada también impacta positivamente en la gestión operativa, disminuyendo los costos asociados al mantenimiento y asegurando el desempeño eficiente de los sistemas de monitoreo. Una metodología de calibración no solo garantiza la precisión y fiabilidad de las mediciones, sino que también mejora la eficiencia de los procesos industriales, reduce los costos de mantenimiento y optimiza la toma de decisiones basada en datos confiables.

En este trabajo se presenta un método de calibración para sensores de temperatura, específicamente termistores, termopares y sensores de platino (PT). Estos sensores se instalaron en una sonda y se sumergieron en un baño recirculante de agua para su evaluación. El experimento se

realizó a intervalos de temperatura de 90 °C, 50 °C y 10 °C, con un tiempo de estabilización de 30 minutos en cada punto. Además, se utilizó un baño de hielo para aproximar el punto de referencia de 0 °C, una práctica común en metrología térmica. La selección de estos puntos de calibración se basa en criterios técnicos relacionados con las propiedades de los materiales, los requerimientos del experimento y considera las temperaturas alcanzadas en el uso de materiales para estudios de confort térmico en edificaciones.

2. METODOLOGÍA

2.1 Punto doble del agua

La metodología de calibración incluye, dentro de su procedimiento, una técnica para la preparación y conservación de un baño de referencia de temperatura. Este baño consiste en una mezcla homogénea de hielo y agua destilada, contenida en un recipiente térmico aislante que se encuentra expuesto a la atmósfera según la norma ASTM E220-19.

En este contexto, no es imprescindible utilizar el punto triple del agua, ya que se emplea como referencia un punto de congelación que ha sido debidamente determinado y conservado. Para los termómetros de resistencia de calidad industrial, se establece el valor de resistencia a 0°C, asignándole un error asociado a la calidad de la preparación del punto de congelación.

2.2 Desviación estándar y Error medio cuadrático

La desviación estándar (σ) es una herramienta estadística fundamental que se utiliza para analizar la variabilidad de los datos, la cual aplicada al estudio de datos como la temperatura, permite comprender de manera más precisa los patrones climáticos, la fluctuación diaria o estacional, entre muchos otros aspectos. La σ cuantifica cuánto se desvían las temperaturas registradas con respecto a los valores promedio, (Ruiz Espejo, 2017). Un valor bajo de la σ indica que los datos son consistentes y cercanos a la media, mientras que, un valor alto refleja una mayor variabilidad. La desviación estándar puede expresarse según la Ec. 1.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{\mu})^2} \qquad (1)$$

Donde: N es el tamaño de la población, x_i es el valor individual de la población, y $\bar{\mu}$ es la media poblacional que se puede expresar de acuerdo con la Ec. 2.

$$\bar{\mu} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \qquad (2)$$

En metrología, es esencial considerar el parámetro asociado al resultado de una medición que define la variabilidad de los valores atribuibles al mensurando. Su estimación contribuye a asegurar la confiabilidad de los resultados y la capacidad de comparar mediciones en distintos contextos.

El error medio cuadrático, también conocido como *root mean square error* (RMSE, por sus siglas en inglés), es una herramienta estadística utilizada para evaluar la precisión de modelos predictivos. Es ampliamente empleado en campos como la meteorología, la economía, entre otros (Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía, 2023). El RMSE indica cuán alejadas están las predicciones de los valores reales y puede expresarse mediante la Ec. 3.

$$EMC = \left[\sum_{n=1}^{n=N}\left(\frac{T_{MED} - T_{CAL}}{n}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (3)$$

Donde: n es el número de datos, T_{MED} es la temperatura medida (°C) y T_{CAL} es la temperatura calibrada (°C).

2.3 Calibración

La norma ASTM E220-19 constituye el documento base para el método de calibración propuesto en este trabajo. Dicha norma describe un método estándar para la calibración de termopares mediante la técnica de comparación, la cual se basa en comparar las indicaciones de un termopar con las de un termómetro de referencia a lo largo de una serie de temperaturas. De acuerdo con la norma, el procedimiento de calibración contempla el uso de baños líquidos agitados, bloques metálicos calentados de manera uniforme, hornos de tubo y baños fluidizados, según el rango de temperatura específico. Este método es aplicable tanto a termopares de alambre desnudo como a aquellos con vaina protectora, aunque estos últimos pueden requerir precauciones especiales para minimizar las pérdidas por conducción térmica.

El método de calibración propuesto en este trabajo amplía el alcance de la norma al incluir sensores de temperatura de tipo resistivo, a diferencia de la ASTM E220-19, que está orientada exclusivamente a termopares. En la Tabla 1 se presentan los sensores utilizados en el proceso de calibración. Se emplearon siete sensores, cada uno de ellos provisto con extensiones de 3 m de longitud para su adaptación al sistema experimental. Por su parte, la Fig. 1 muestra el diagrama esquemático del sistema experimental de calibración propuesto, el cual está compuesto por un baño recirculante (también denominado baño térmico o baño revuelto), un sistema de adquisición de datos, sensores de temperatura y un ordenador con monitor.

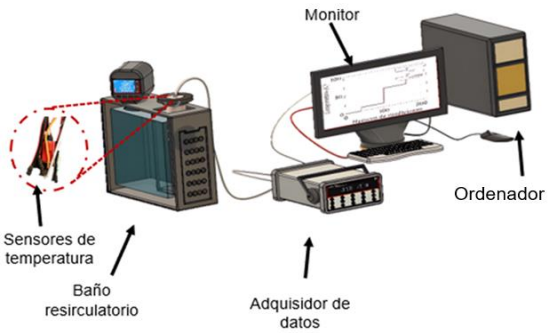


Fig. 1. Sistema experimental de calibración. Fuente: propia.

Por otra parte, en la Fig. 2 se muestra el sistema experimental de calibración con la incorporación del baño de hielo (punto doble del agua). Para lo cual, se adiciona un recipiente aislado al sistema experimental de la Fig. 1.

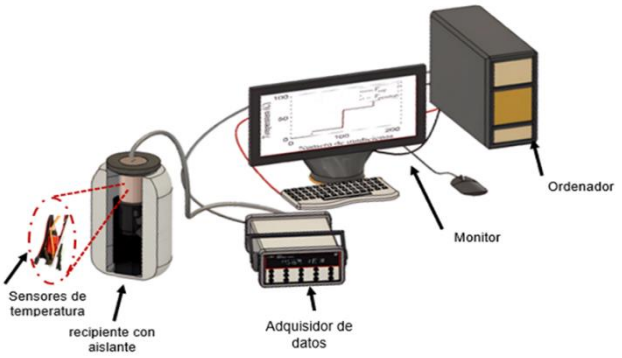


Fig. 2. Sistema experimental de calibración con baño de hielo. Fuente: propia.

Tabla 1. Muestras de sensores para calibración.

Tipo de sensor	Características generales
 PT1000	• Rango: -200 + 650°C. • Material: platino.
 Termopar tipo T (TTT)	• Rango: -200 a +1200°C. • Material: Cromo / Cromo-Níquel.
 Termopar tipo K (TTK)	• Rango de -200 a +1260°C • Material: Cobre y Constantán.
 PT100	• Rango: -80+250°C. • Material: Platino.
 Termistor NTC 2 kΩ	• Rango: -50 °C a 150 °C. • Materiales: Mn, Ni, Co, Cu y Fe.
 Termistor NTC 20 kΩ	• Rango: -40 °C a 125 °C. • Materiales: son una mezcla de Mn, Ni, Co, Cu y Fe cuerpo cerámico de varios tamaños.
 Termistor TR NTC 100 kΩ	• Rango: -40 °C a 125 °C. • Los materiales son una mezcla de Mn, Ni, Co, Cu y Fe

2.4 Normas y Ecuaciones para la calibración

Con el fin de obtener las ecuaciones de trabajo producto de la calibración se revisaron las diferentes normas que muestran las ecuaciones de trabajo de los diferentes sensores de temperatura considerados en el presente estudio.

ASTM E230-17: La norma presenta la relación entre temperatura y fuerza electromotriz (FEM) correspondiente a los distintos tipos de termopares: tipo B, tipo E, tipo J, tipo K, tipo N, tipo R, tipo S y tipo T. Asimismo, incluye tablas y fórmulas que pueden ser utilizadas tanto en entornos industriales como en laboratorios certificados para mediciones de temperatura mediante FEM.

Esta norma establece el procedimiento para convertir las mediciones de fuerza electromotriz generadas por un termopar en valores de temperatura, en función del tipo de termopar utilizado. La Ec. 4 presenta el comportamiento polinomial que representa la FEM en función de la temperatura para cada tipo de termopar.

$$E = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + \ldots + C_n T^n \quad (4)$$

Donde: E es la FEM (mV), T es la temperatura (°C), C_1, C_2, C_3 …C_n son los coeficientes polinomiales proporcionados en las tablas para cada tipo de termopar.

ITS-90 (TERMOPARES): La norma establece una escala de temperatura basada en valores fijos de referencia y dispositivos patrón. Asimismo, define los valores de referencia de temperatura mediante métodos de calibración diseñados para realizar mediciones térmicas precisas (Preston-Thomas, 1990).). La Ec. 5 expresa la relación entre la resistencia, RRR, de un termómetro de resistencia de platino y la temperatura, TTT.

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2) \quad (5)$$

Donde: R_0 es la resistencia (Ω) a 0°C, α es el coeficiente de temperatura lineal, β es el coeficiente de temperatura cuadrática.

Ecuación de Steinhart–Hart (Termistores): Para los termistores se utiliza la ecuación de Steinhart&Har (1968), Ec. 6, para obtener la temperatura. Esto debido a que los termistores funcionan por medio de una temperatura de referencia, en otras palabras, se podría decir que es la resistencia eléctrica de un semiconductor con la temperatura.

$$\frac{1}{T} = A + B * \ln R * C(\ln R)^3 \quad (6)$$

Donde: A, B, C son constantes de Steinhart-Har, T es la temperatura (K), y R es la resistencia (Ω).

Ecuación Callendar-Van Dusen (PT-1000 y PT-100): La ecuación de Callendar-Van Dusen, se utiliza para calcular la temperatura con alta precisión en sensores PT-100 y PT-1000, especialmente en aplicaciones críticas que requieren mediciones confiables de temperatura (MetAs & Metrólogos Asociados, 2009). Esto debido a que estos sensores funcionan a partir de la variación de la resistencia en función de la temperatura. En otras palabras, esta ecuación es fundamental para calcular la temperatura con precisión, especialmente cuando se trabaja con sistemas de medición basados en RTD (Resistance Temperature Detector). Lo anterior, debido a que permite corregir las desviaciones del comportamiento ideal.

$$R_t = R_0[1 + (\alpha T)] \quad (7a)$$

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 R_0} \quad (7b)$$

Donde: R_t es la resistencia (Ω) a la temperatura T en °C; R_0 es la constante específica del sensor (resistencia en t=0°C); R_{100} es la resistencia a 100°C; α, β y δ son constantes definidos por la norma (IEC 60751:2022 para platino). El coeficiente α representa el cambio relativo en la resistencia por °C.

2.6 Diseño experimental

En la Tabla 2 se presenta el diseño experimental donde se muestran las pruebas realizadas. Las pruebas se realizaron por triplicado considerando diferentes temperaturas termométricas: 0,10, 50 y 90°C. Dentro del procedimiento de prueba se aumentó gradualmente la temperatura del baño térmico, registrando las lecturas de los sensores calibrados y del sensor de referencia en diferentes puntos de temperatura.

Tabla 2. Pruebas experimentales.

No. prueba	Tipo de sensor	T_{REF} (°C)	Punto doble del agua
1.	Termopar tipo T	0	✓
2.		10	x
3.		50	x
4.		90	x
5.	Termopar tipo K	0	✓
6.		10	x
7.		50	x
8.		90	x
9.	Termistor NTC-(2kΩ)	0	✓
10.		10	x
11.		50	x
12.		90	x
13.	PT1000	0	✓
14.		10	x
15.		50	x
16.		90	x
17.	PT100	0	✓
18.		10	x
19.		50	x
20.		90	x
21.	Termistor NTC-(20kΩ)	0	✓
22.		10	x
23.		50	x
24.		90	x
25.	Termistor NTC-(100kΩ)	0	✓
26.		10	x
27.		50	x
28.		90	x

*REF: referencia, es la temperatura del baño de calibración.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la calibración de los sensores de temperatura con su resistencia media (Rm), desviación media, el α_m, el error medio cuadrático y el factor de cobertura, *k*. Esta tabla solo considera los termistores de 2, 20, 100 kΩ y las PT-100 y PT-1000. Los resultados fueron obtenidos a partir del procesamiento de los datos medidos, para lo cual se desarrolló un programa en Octave. Los valores del EMC corresponden al error de medición que se consideraría al utilizar estos sensores.

La Tabla 4 muestra los resultados de la calibración para termopares tipo T y K, obtenidos los polinomios los cuales se utiliza para generar la fuerza electromagnética del termopar en función de la temperatura y con apoyo de una regresión lineal mediante programación en octave considerando ASTM E 230-17 y la Ec. 4. La Tabla 5 muestra los valores de las constantes obtenidas a partir de la calibración de cada sensor, las cuales, se utilizan en sus ecuaciones de trabajo.

Tabla 3. Resultados de la calibración en octave para termistores de 2, 20 y 100 kΩ.

Sensores	Rm (0°C)	σ	α_m	EMC (°C)	*k*=2
PT1000	1005.748	0.4225603	0.0038224	**0.127**	0.253
PT100	100.9815	0.0362266	0.0037734	**0.302**	0.605
Termistor 2kΩ	0.001478	0.0002184	4.932E-07	**0.129**	0.258
Termistor 20kΩ	0.001161	0.0002022	2.031E-07	**0.286**	0.573
Termistor 100kΩ	0.000749	0.0002105	1.212E-07	**0.043**	0.086

m= promedio

Tabla 4. Resultados de la calibración de termopares.

TTT	TTK	Coeficientes
0	0.02134085	c_0
-10.2221008	5.37468245	c_1
341.124141	307.893224	c_2
-1028.21263	-1102.25359	c_3
1255.9806	1465.24322	c_4
-757.519955	-938.661358	c_5
240.000454	313.213964	c_6
-38.3347093	-52.5154994	c_7
2.43660212	3.49894951	c_8
0.009	0.004	EMC
0.018877315	0.008080521	k=2

TTT= termopar tipo T
TTK= termopar tipo K

Tabla 5. Coeficientes de las ecuaciones de calibración de los sensores evaluados.

	$R(T)=R_0(1+\alpha T+\beta T^2)$			EMC	*k*
	R_0	σ_{Ro}	α		
PT1000	1005.748932	0.422560375	0.003822445	0.1265	0.2531
PT100	100.981519	0.036226629	0.003773477	0.3025	0.6049
	$\frac{1}{T}=A+B\ln R*C(\ln R)^3$			EMC	*k*
	A	B	C		
Termistor 2kΩ	0.001478245	0.000218441	4.93212E-07	0.1291	0.2583
Termistor 20kΩ	0.001161952	0.000202275	2.0318E-07	0.2863	0.5725
Termistor 100kΩ	0.000749665	0.000210 56	1.21293E-07	0.0428	0.0857

α es el coeficiente de temperatura lineal; R_0 es la resistencia medida en Ω a 0°C; T es la temperatura en °C o K; β es el coeficiente de temperatura cuadrática; *R* es la resistencia medida en Ω; A, B, C son constantes de Steinhart-hart; α y β son constantes definidos por la norma (IEC- 60751 para platino); y *k* es el factor de cobertura, *k*=2.

En la Fig. 3 se presenta la comparación entre la T_{REF} y la temperatura que registra el sensor PT1000, abarcando cuatro pruebas a temperaturas de 0, 10, 50 y 90°C. Las curvas de ambas líneas presentan el mismo comportamiento con diferencias poco significativas, lo que sugiere que el sensor tiene una precisión y estabilidad en su respuesta. Mientras que, en la Fig. 4 se presenta el error de medición promedio, que

varía entre -0.6°C y +0.4°C, mostrando una tendencia inicial a subestimar la temperatura (ΔT negativo). El comportamiento indica una ligera desviación en las primeras mediciones, aunque el sensor exhibe un rendimiento confiable en todo el rango de temperaturas evaluado. Aunque se observan picos y valles en el comportamiento de la diferencia de temperatura estos se deben tanto al sensor como al instrumento de medición. Sin embargo, como se observa en la Fig. 4, estas variaciones no tienen efecto sobre las mediciones de temperatura.

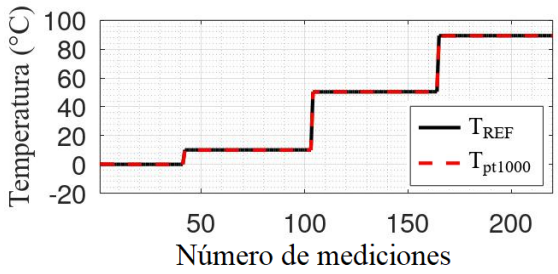


Fig. 3. comportamiento de la temperatura del PT1000 respecto a la temperatura de referencia.

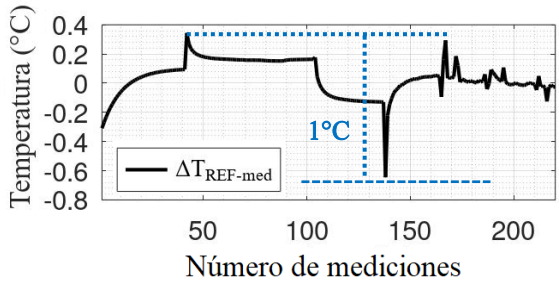


Fig. 4. Resultados del PT1000 calibrado a diferentes valores de temperatura.

Tabla 6. Concentrado de las diferencias de temperatura de los sensores calibrados.

Sensores	Intervalos de variación (Min a Máx)	ΔT REF
PT1000	-0.6°C a +0.4°C	1.0 °C
PT100	-0.4°C a +0.8 °C	1.2°C
Termistor 2kΩ	-273.5 K a -272.9 K	0.6K
Termistor 20kΩ	-273.5 K a -271 K	2.5 K
Termistor 100k	-273.5 K a -273 K	05K
Termopar tipo T	-0.015°C a +0.017°C	0.032°C
Termopar tipo K	-0.05°C a 0.02°C	0.070°C

El resto de los sensores calibrados mostraron un comportamiento similar al obtenido con el PT1000 respecto a su poca diferencia significativa entre la T_{REF} y la temperatura medida por el sensor bajo prueba. Las diferencias de temperatura encontradas se presentan en la Tabla 6. Como se puede observar en esta tabla, el PT100 y el PT1000 presentaron las mayores diferencias, aun así, siguen siendo poco significativas. Por su parte, los termopares presentaron los menores valores. Las pequeñas variaciones se deben al alto orden que se utilizaron para los polinomios de ajuste para convertir la fuerza electromotriz (mV) en temperatura (°C o K), lo cual ocasiona que se obtenga una ecuación de trabajo más precisa, como se muestra en la Tabla 4 y 5. Los coeficientes presentados en dicha tabla muestran el comportamiento que corresponden a los coeficientes de una ecuación polinómica de calibración para un termopar tipo T y tipo K. Los termopares tienen una respuesta que se modela con polinomios de alta orden para convertir la fuerza electromotriz (mV) en temperatura (°C o K).

4. CONCLUSIONES

En este estudio se presentó un método de calibración extendida de sensores de temperatura basada en la norma ASTM E220-19, para incluir no solo termopares sino también termistores y sensores de resistencia de platino (PT100 y PT1000), comúnmente utilizados en aplicaciones experimentales relacionadas con confort térmico en edificaciones. La metodología fue validada mediante pruebas experimentales controladas, usando un baño térmico recirculante y un baño de hielo como puntos de referencia. A partir del análisis de los resultados obtenidos, se destacan los siguientes hallazgos:

- Los sensores PT1000 y PT100 mostraron comportamientos estables y precisos durante las pruebas, con errores medios cuadráticos (EMC) muy bajos (0.127 °C y 0.302 °C respectivamente), lo que los convierte en opciones confiables para aplicaciones donde se requiere una alta precisión.
- Los termopares tipo T y K registraron diferencias mínimas respecto a la temperatura de referencia (variaciones menores a ±0.05 °C), gracias a un modelo polinómico de ajuste de alta precisión basado en la norma ASTM E230-17.
- Los termistores presentaron buena sensibilidad, sin embargo, mostraron mayor variación en la temperatura calibrada, especialmente el de 20 kΩ con un intervalo de hasta 2.5 K. Esto refleja su dependencia en función del ajuste utilizado y sus limitaciones frente a otros sensores en rangos amplios de temperatura.

Los resultados obtenidos de la aplicación del método de calibración muestran que este es eficaz para las diferentes tecnologías de los sensores utilizados, lo cual permitió que se pudieran hacer comparaciones y obtener las ecuaciones de trabajo. En conjunto, los resultados obtenidos respaldan la validez del método de calibración estandarizado, flexible y preciso, que puede ser utilizada como referencia para futuras investigaciones o aplicaciones que requieran una alta fiabilidad en la medición de temperatura.

REFERENCIAS

ASTM E220-19, American Society for Testing and Materials (2019), *Standard test method for calibration of*

thermocouples by comparison techniques. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM E 230-17, American Society for Testing and Materials (2017). *Standard specification and temperature-electromotive force (EMF) tables for standardized thermocouples*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

E1159-15-2020-e1, American Society for Testing and Materials (ASTM), 2020. *Standard Specification for Thermocouple Materials, Platinum-Rhodium Alloys, and Platinum.* ASTM International, West Conshohocken, PA.

Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía, s.f. (2023). Teoría de errores. En Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía (Ed.), *Teoría de errores*, pp. 1-6. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía, Torrelavega.

IEC 60751:2022, International Electrotechnical Commission. (2022). Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. IEC, Geneva, Switzerland.

MetAs & Metrólogos Asociados. (2009). La Guía MetAs: Callendar - Van Dusen. MetAs & Metrólogos Asociados.

Preston-Thomas, H. (1990). The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). *Metrologia, 27*(1), 3-10.

Steinhart, J. S. & Hart, S. R. (1968). Calibration curves for thermocouples. Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts, 15(4), 497-503.

Ruiz Espejo, M. (2017). Estimación de la desviación estándar. *Estadística Española*, 59(192), pp. 37-44. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/319332721 [Accedido: 9 de mayo de 2025].

Experimental Study Of Heat Transfer In A Solar Still With Phase Change Material

Félix Félix, Adán *, Piña Ortíz, Armando*✉, Maytorena Soria, Víctor *, Moreno Velázquez, Saúl *, Iriarte Cornejo, Cuitláhuac**

**Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Centro, 83000 Hermosillo, Son.*

***Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas, Centro, 83000 Hermosillo, Son.*
(e-mail: adan.felix.ing@gmail.com, armando.pina@unison.mx, victor.maytorena@unison.mx, saul.moreno@unison.mx, cuitlahuac.iriarte@unison.mx).

Abstract: The study of a solar still with phase change material is presented. The main objective is to study the heat transfer in the device and to monitor the temperature at different strategic points. For this purpose, the solar still was fabricated and instrumented with k-type thermocouples at selected locations. A data acquisition system connected to a computer was used to record the temperature as well as a pyranometer to track the direct solar radiation on the glass surface around the glass. A float level control system connected to a submersible pump was developed and implemented to maintain the water film at a three-centimeter height. The phase change material used was PureTemp 60 placed in a metal enclosure at the bottom of the solar still filled to 60% of its volume. It was experimented for 8 months under real conditions in a desert climate. Energy fluxes were recorded obtaining the maximum on March 17 with a value of 1108.74 W/m^2 with solar durations between 10 and 14 hours. Maximum temperature values were reported at the absorber surface and inside the solar still of 71.83 °C and 78.3 °C, respectively, reflecting temperature increases on the dates between 0.84% and 9.8%. Values for the convective heat transfer coefficient and Nusselt number for the glass and absorber surface were also reported. After the implementation of the phase change material (PCM) the yield increased to 21.4%. Likewise, when comparing the performance of the still on the first date of operation with PCM with respect to its previous performance without this material, an increase of 45.24 % in production was observed.

Keywords: Solar still, Phase Change material , Solar energy.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contextualización del problema

La tecnología para el tratamiento de agua ha sido una prioridad para la humanidad en las últimas décadas. Aproximadamente 1.8 mil millones de personas en el mundo consumen agua de alguna fuente contaminada o no apta para consumo humano. Es lógico que proyectos de investigación tengan como objetivo el desarrollar nuevos sistemas para proveer agua a poblaciones en riesgo o aquellas que no cuentan con ésta. La problemática de su escasez se vuelve un factor de importancia aún más apremiante cuando se trata del estado de Sonora, donde en 2021, se observó una reducción histórica del 25% de precipitaciones en temporadas de lluvia, una cifra jamás antes vista [1].

Por ello, una alternativa para obtener agua limpia es la desalinización de agua, específicamente, con el uso de destiladores solares de bandeja, los cuales son dispositivos que aprovechan la radiación solar para evaporar el agua en una solución salina y obtener agua libre de sales.

La propuesta de los destiladores solares permite una alternativa simple, sostenible y de fácil acceso para comunidades vulnerables. Además, estos sistemas suelen requerir mantenimiento mínimo y tienen costos operativos bajos una vez instalados. Recientemente, la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés), como almacenamiento de energía térmica en estos sistemas, han abierto un área de oportunidad para el aumento del rendimiento de estos [2].

1.2 Estado del arte.

Rubio *et al.* [3] analizaron la influencia que tiene en la producción la inclinación de los destiladores solares de una y doble pendiente. En este estudio se hizo uso de un modelo experimental de un destilador solar de doble pendiente con una resistencia eléctrica en la base para simular el ingreso de energía al sistema, con un flujo de aire y de energía automatizados para mantener condiciones óptimas.

Tras analizar los resultados se observó que en los destiladores solares de una y doble pendiente se mostraba una producción muy parecida, por lo que se demostró que la producción de agua destilado es independiente de la geometría de la cavidad siempre y cuando se trate de equipos pequeños en las mismas condiciones de agua y profundidad.

Sathyamurthy *et al.* [4] probaron un montaje de destilador solar piramidal y agregaron un sistema de almacenamiento de calor térmico latente (PCM). Con esta adición lograron aumentar la producción un 35% para un total de 5.5 L/m^2-dia, una producción incluso superior que la del destilador solar de bandeja con material de cambio de fase.

Kailas *et al.* [5] realizaron un estudio sobre los diferentes tipos de materiales de cambio de fase y su uso en destiladores solares. Tras un estudio de la literatura concluyeron que los materiales de cambio de fase (PCM) de tipo orgánico (en especial la parafina) tienen un uso mucho más elevado con respecto a sus alternativas inorgánicas las cuales son menos investigadas. Finalmente se concluye que un destilador con PCM obtiene en promedio un 67% más de destilado con respecto a uno que no lo usa.

Prakash *et al.* [6] detallan los parámetros que afectan al rendimiento de un destilador solar. Entre ellos está la proporcionalidad entre el área de absorción del agua y la razón de evaporación. Finalmente argumentan que la profundidad del volumen de agua es el parámetro central en un destilador solar.

2. METODOLOGÍA

Para este trabajo se fabricó un destilador solar con PCM y un sistema controlador de nivel y adquisición de datos. A continuación, se detallan los sistemas físicos y las ecuaciones utilizadas.

2.1 Modelo físico

El cuerpo del destilador solar fue diseñado como un paralelepípedo de acero con una inclinación de 30° en la parte superior correspondiente a la latitud del lugar donde se desarrolló la experimentación. Las dimensiones del destilador son de 28 cm de largo, 28 cm de ancho y 14 cm de altura con un canal inclinado en la parte inferior que concluye en una perforación por donde el destilado es extraído por medio de una manguera. La superficie absorbedora se diseñó con esa área por la disposición de PCM con la que se contaba de tal manera que pudiera funcionar con aproximadamente un kilogramo de PCM mientras que la profundidad se diseñó con la intención de probar diferentes tipos de recintos. La superficie interior fue pintada de negro mate con el objetivo de maximizar la cantidad de calor absorbido. Posteriormente, se construyó un recubrimiento aislante con poliestireno expandido (k=0.03$W/m\,K$) de 5 cm de grosor que cubría toda la superficie exterior con el fin de minimizar las pérdidas de calor del interior del destilador hacia las paredes exteriores. En la cara superior del destilador se colocó un vidrio (k=0.8$W/m\,K$) de 3 mm de espesor.

Dentro del destilador se colocó un recinto del material de cambio de fase y el perfil de temperatura que consta de 12 termopares, lo anterior se puede apreciar en la Figura 1.

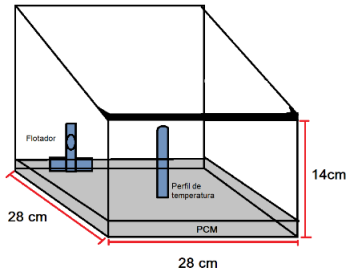


Figura 1 Esquema de destilador solar.

2.2 Controlador de nivel

El mecanismo consta de un contenedor de agua en el cual se encuentra una bomba sumergible que bombea agua hacia el interior del destilador por medio de una manguera. Una vez dentro el nivel es controlado por un medio de un flotador. El nivel se mantuvo al mínimo permitido por el montaje, que fue de 3 cm. Para la introducción del agua al destilador se usó una bomba sumergible eléctrica de 12 V con una capacidad de 600 L/h. Finalmente, para el control de la bomba se construyó un flotador, como se puede apreciar en la Figura 2. Consta de un bulbo móvil que acciona un sistema electrónico diseñado para activar o desactivar la bomba en un intervalo de altura. El sistema electrónico se encuentra contenido en una caja de madera conectado por un cable eléctrico al flotador y a la bomba.

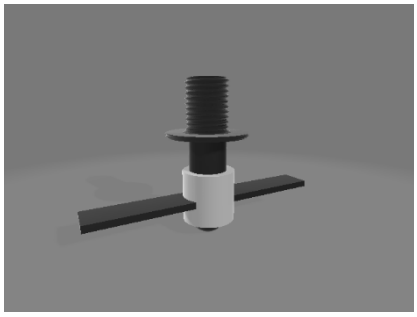


Figura 2 Esquema del flotador.

2.3 Adquisición de datos

Para el monitoreo de la temperatura en el destilador se usaron 37 termopares tipo “k” calibre 30 AWG con un diámetro de 0.2546 mm (rango de temperaturas de 0°C a 1250°C), distribuidos por la pared interior y exterior del destilador, así como el exterior del aislante tal como se muestra en la Figura 3.

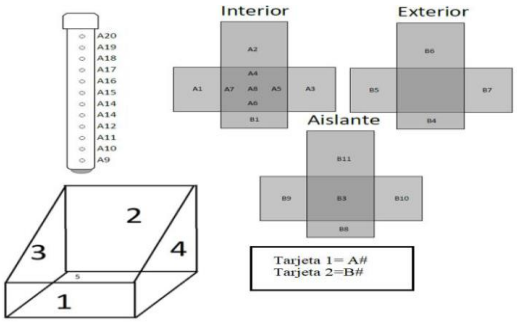


Figura 3 Distribución de termopares por las paredes del destilador solar. Tarjeta 1 asignada a la serie A, Tarjeta 2 asignada a la serie B.

Se colocó un tubo perpendicular a la superficie absorbedora y al PCM para obtener un perfil de temperatura dentro del destilador. Se colocaron termopares en el interior y exterior de la superficie del vidrio, un termopar para el monitoreo de la temperatura ambiente y uno dentro del recipiente de la bomba para monitoreo de la temperatura de entrada del agua. Finalmente 3 termopares fueron colocados en el PCM, dentro y sobre dos de sus caras.

Los termopares fueron conectados a tarjetas multiplexoras en grupos de 20 por tarjeta debido a las capacidades del hardware. Éstas a su vez fueron colocadas en un adquisidor de datos de la marca Agilent modelo 34972a el cual fue conectado a una computadora que registraba y grababa los datos de la temperatura en intervalos de 10 segundos por el tiempo que durara la experimentación (12-14 horas). Este equipo puede verse en la Figura 4.



Figura 4 Adquisidor de datos Agilent 34972ª.

El monitoreo de la radiación solar se realizó mediante un piranómetro CMP11 colocado en una base a 30° de inclinación al costado del destilador, de manera que se capture la radiación solar global recibida por éste, como se puede ver en la Figura 5.



Figura 5 Piranómetro y base experimental.

Para el control de los datos de producción diaria se usó un sistema de monitoreo de video consistente en una videocámara apuntando hacia una probeta con el destilado. Con la ayuda de un software se configuró la videocámara para obtener capturas diarias antes del amanecer del destilado total diario.

2.3 Material de Cambio de fase

El material de cambio de fase utilizado para este experimento fue el modelo Puretemp 60 el cual tiene un punto de fusión de 61 °C, sus propiedades se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1 Propiedades del material de cambio de fase.

Apariencia	Cera sólida, líquido claro
Punto de fusión	61°C
Capacidad de almacenamiento de calor	220 J/g
Densidad (líquido)	0.87 g/mL
Densidad (sólido)	0.97 g/mL
Calor específico (líquido)	2.38 J/(g°C)
Calor específico (sólido)	2.04 J/(g°C)
Conductividad térmica (líquido)	0.15 W/m °C
Conductividad térmica (sólido)	0.25 W/m °C

El material de cambio de fase se contuvo en un recinto metálico cuyas dimensiones fueron de 24cm de alto, 24 cm de ancho y1.6 cm de grosor, el cual se llenó a 60% de capacidad correspondiente a la densidad en estado sólido del PCM, terminando en 550g de PCM.

2.4 Balance de energía y eficiencia para un destilador solar.

Para este balance debemos tomar en cuenta la figura 6:

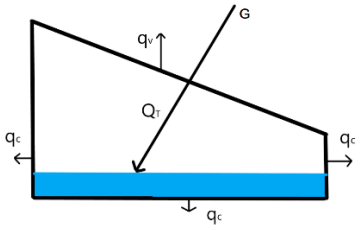


Figura 6 Balance de energía de un destilador solar.

La cantidad de energía requerida para calentar y evaporar el agua de la bandeja está dada por las ecuaciones (1) y (2), respectivamente [28]

$$Q_W = m_w\, C_{pw}\left(T_w - T_{v,in}\right) \quad (1)$$

$$Q_{ev} = x\, m_w\, \lambda \quad (2)$$

Donde Q_W es el calor necesario para calentar el agua, m_w la masa de agua, Cp_w es el calor específico del agua, T_w es la temperatura del agua, $T_{v,in}$ es la temperatura interior del vidrio, Q_{ev} es el calor para vaporizar el agua, x es la fracción de agua evaporada y λ es la entalpía de vaporización a temperatura T_W.

La cantidad de calor absorbida por el vidrio para aumentar la temperatura es obtenida por la ecuación (3).

$$Q_v = m_v\, C_{pv}\, (T_v - T_{v,in}) \quad (3)$$

Donde Q_v es el calor necesario para evaporar el agua, m_v es la masa de vidrio, T_v es la temperatura del vidrio y $T_{v,in}$ es la temperatura interior del vidrio

La cantidad de energía necesaria para calentar el destilador solar está dada por la ecuación (4).

$$Q_T = Q_W + Q_{ev} + Qv \quad (4)$$

Donde Q_T es la energía total necesaria.

Por otro lado, para este estudio se utilizó la ecuación de eficiencia experimental determinada por [7]:

$$\eta = \frac{\dot{m} h_{fg}}{AG}(100) \quad (5)$$

Donde η es la eficiencia experimental, $\dot{m}$ es el flujo másico de destilado, h_{fg} es la entalpía de vaporización del agua, A es el área de la superficie absorbedora y G es la radiación solar total.

Para las pérdidas de calor por conducción se usó la ley de Fourier[8]:

$$Q_{perdidas} = kA_p \frac{\Delta T_{p,a}}{\Delta x} \quad (6)$$

Donde $Q_{perdidas}$ son las pérdidas de calor por conducción, A_P es el área del aislante sobre la pared, $\Delta T_{p,a}$ es el gradiente de temperatura entre la pared interior del destilador y el aislante y Δx es el grosor del aislante.

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección se utilizó la ley de enfriamiento de Newton[8]:

$$Q_{perdidas} = hA_s(T_{sa} - T_{v,in}) \quad (7)$$

Donde h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, A_s es el área de interés de la transferencia de calor por convección y T_{Sa} es la temperatura de la superficie absorbedora.

Para la determinación del número de Nusselt se calculó según[8]:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (8)$$

Donde Nu es el número de Nusselt, L_c es la longitud característica y k es la conductividad térmica del aislante.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Durante el estudio se monitorearon las variables ambientales de temperatura e irradiación global. En la Figura 7 podemos ver un gráfico de la irradiación global de 5 días en temporadas diferentes de la primera mitad del año. Se puede observar cómo los 5 casos siguen una distribución normal, característica de un día soleado. El día 17 de marzo registró el flux máximo de 1108.74 W/m^2 mientras que el 7 de julio registró el menor con 931.76 W/m^2.

Se puede observar una mayor duración del día solar con el avance del año. En las fechas de mayo, junio y julio se puede notar un inicio del día muy parecido, habiendo una diferencia aproximada entre estas de 5 minutos, mientras que entre marzo y mayo la diferencia es casi de una hora, y entre marzo y enero media hora. Este comportamiento se ve repetido en el horario del ocaso, teniendo intervalos de 5 minutos de diferencia entre mayo, junio y julio mientras que entre mayo, marzo y enero estas diferencias se disparan a los 40 minutos aproximadamente, dando como resultado que el día solar más largo se registró el 16 de junio de 2024 con una duración de 14.07 horas mientras que el más corto fue el 25 de enero de 2024 con una duración de 10.79 horas.

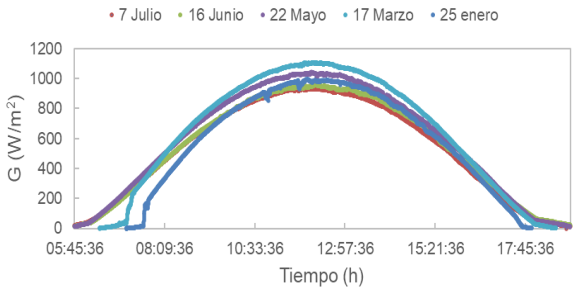


Figura 7 Irradiancia global.

En cuanto a las condiciones registradas en el destilador solar, la Figura 8 muestra el perfil de temperaturas en la superficie absorbedora. Puede notarse como la temperatura máxima se alcanzó el 22 de mayo con un valor de 71.83 °C. Los días correspondientes a enero, marzo y mayo siguen la tendencia de una distribución normal, pero teniendo una temperatura mayor al final del día debido al tiempo que tarda el calor en disiparse del destilador, proceso que se da durante la noche.

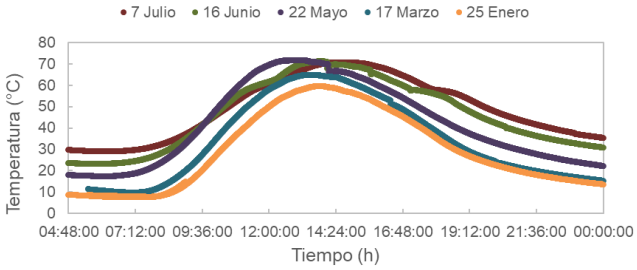


Figura 8 Temperatura de la superficie absorbedora.

Se puede apreciar que en las fechas del mes de junio y julio correspondientes a la adición del recinto con PCM se ve un cambio en la pendiente al llegar a los 60°C, esto se debe a la fusión del PCM dentro del recinto, provocando variaciones en el perfil de temperatura con respecto a sus contrapartes sin PCM.

En la Figura 9 puede analizarse como el perfil de temperatura sigue la tendencia de los días sin PCM como es el caso del 16 de junio, pero cuando se alcanza el punto de fusión el perfil cambia dando como consecuencia la distribución que se observa el día 7 de julio.

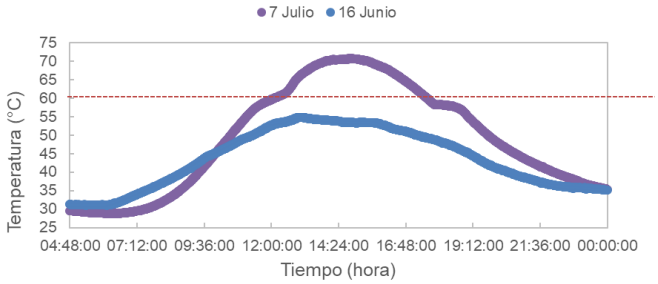


Figura 9 Evolución de temperatura del PCM.

De igual manera, esta tendencia se aprecia en la Figura 10 donde el día 22 de mayo se registró la temperatura máxima de 78.3 °C. Se puede observar como la temperatura inicial del destilador se incrementó conforme más se acercaba a julio, coincidiendo con los datos de la Tabla 3 sobre la temperatura ambiental. Los días de mayo, junio y julio presentan temperaturas máximas parecidas a pesar de la diferencia de 10°C entre el primero y el último. Se puede observar un incremento gradual en la temperatura inicial y final dentro del destilador solar con respecto al avance de las fechas el cual se relaciona con el aumento de la temperatura ambiente entre el lapso de enero y julio en el cual se realizó la experimentación.

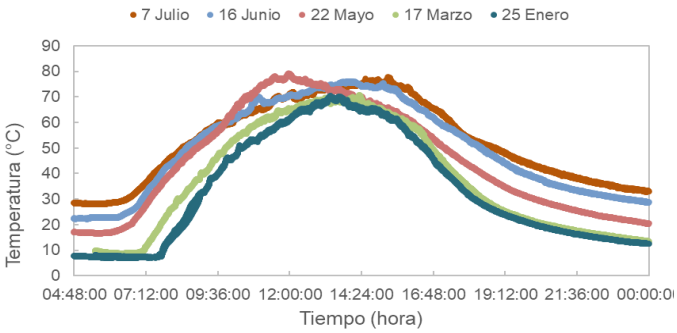


Figura 10 Evolución de temperatura dentro del destilador.

Con respecto al promedio de temperatura en el interior del destilador, las temperaturas obtenidas entre los meses de enero y julio fueron 48.55°C, 48.96°C 53.76°C, 56.61°C y 58.24°C, respectivamente, como se muestra en la Figura 11. La temperatura incrementó de manera casi despreciable entre el mes de enero y marzo en un 0.84% mientras que el mayor incremento se puede notar entre el mes de marzo y mayo con un incremento de un 9.8%, seguido de un incremento entre mayo y junio de 5.3% y finalizando con un incremento entre junio y julio de 2.87 %.

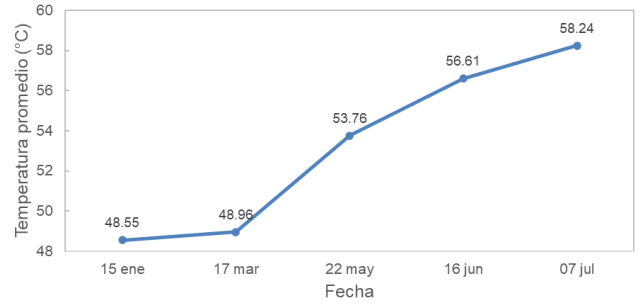


Figura 11 Temperatura promedio en el interior del destilador.

El aumento en la temperatura promedio interna del destilador y el aumento en la duración del día solar provocaron un aumento en la producción como se puede ver en la Figura 12. El incremento de producción entre enero y marzo fue de 41.17%, entre marzo y mayo 16.67%, entre mayo y junio 21.42% y entre junio y julio 11.76%. Podemos notar como el aumento en la producción se redujo entre marzo y mayo e incrementa nuevamente en el intervalo posterior, esto debido a la implementación del material de cambio de fase en el mes de junio.

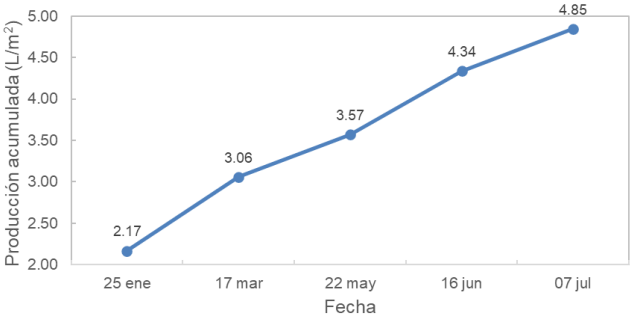


Figura 12 Producción total en el destilador.

Finalmente, en la Figura 13 podemos ver la eficiencia experimental obtenida en las fechas seleccionadas. Se puede apreciar un aumento correspondiente al aumento de la temperatura, hasta la implementación del material de cambio de fase donde se observa un incremento sustancial de la eficiencia.

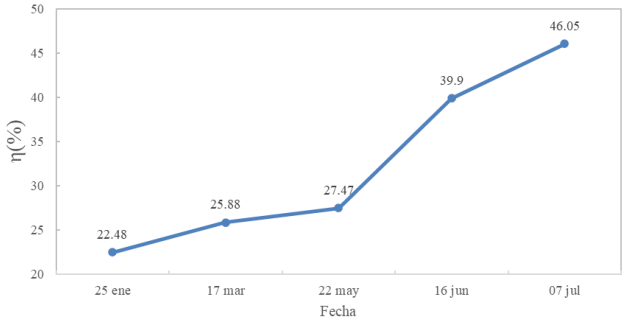


Figura 13 Eficiencia experimental del destilador solar.

El valor del coeficiente convectivo de transferencia de calor del vidrio y la superficie absorbedora se puede observar en la Tabla 2. Se puede apreciar que los valores del coeficiente son mucho mayores en el vidrio que en la superficie absorbedora denotando una mayor cantidad de transferencia de calor. A su vez por los gradientes de temperatura podemos determinar que la transferencia de calor es del agua a la superficie absorbedora mientras que en el caso del vidrio se realiza del interior al exterior del mismo.

Tabla 2 Coeficiente convectivo de transferencia de calor, $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$.

Fecha	Vidrio	Superficie absorbedora
22 de enero	9421	2.0
17 de marzo	11021	2.16
22 de mayo	8544	0.42
16 de junio	11765	12.37
7 de julio	4767	22.15

En la Tabla 3 se presentan los valores del número de Nusselt reportado para todas las fechas en el vidrio y la superficie absorbedora. Se puede observar como en el vidrio se presenta un valor máximo de 3297 para el 22 de enero, mientras que el valor mínimo fue para el día 7 de julio con un valor de 1668.

Se puede observar una tendencia a la disminución hasta la adición del PCM donde se registra un aumento y disminución bruscas consecuencias de las diferencias de temperatura registradas. Por su parte la superficie absorbedora registró valores muchos menores con un mínimo en mayo de 3.91 donde con la implementación del PCM se incrementó considerablemente debido a que el recinto con PCM se encontraba sobre esta superficie, presentando un valor de 206.75.

Tabla 3 Número de Nusselt.

Fecha	Vidrio	Superficie absorbedora
22 de enero	3297.63	14.51
17 de marzo	3857.38	20.21
22 de mayo	2990.48	3.91
16 de junio	4117.90	115.47
7 de julio	1668.77	206.75

4. CONCLUSIONES

En el presente estudio se analizó la transferencia de calor en un destilador solar con la incorporación de un material de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés). Los resultados obtenidos permiten concluir que la adición de este material generó un aumento del 21.4 % en la producción del sistema. Asimismo, al comparar el desempeño del destilador en la primera fecha de operación con PCM respecto a su desempeño previo sin este material, se observó un incremento del 45.24 % en la producción. Esta mejora es aún más significativa al considerar la eficiencia final del sistema, la cual experimentó un aumento total del 67.63 %, demostrando la efectividad del montaje propuesto. Por otro lado, a pesar de la disminución en la radiación solar promedio, el incremento en la temperatura ambiente favoreció el aumento de las temperaturas iniciales del destilador, lo que redujo la cantidad de energía solar requerida para la evaporación del agua. Finalmente, la implementación del PCM permitió una mayor conservación de la temperatura dentro del sistema, manteniendo el dispositivo a temperaturas elevadas durante un período prolongado. Este efecto contribuyó a un aumento adicional en la eficiencia del destilador.

En conclusión, la incorporación del material de cambio de fase (PCM) en la configuración propuesta mejoró significativamente la eficiencia del destilador solar. No obstante, los resultados obtenidos en este estudio podrían optimizarse aún más mediante la implementación de ciertas mejoras. Uno de los parámetros con mayor impacto en la eficiencia del sistema es la altura del agua almacenada dentro del destilador.

Se estima que una reducción de 3 cm a 1 cm en este parámetro podría generar mejoras sustanciales en la eficiencia del dispositivo. Además, es fundamental garantizar un sellado adecuado en las superficies de contacto entre el aislante y el destilador, así como en sus uniones. La utilización de materiales de sellado de mayor calidad podría minimizar las pérdidas de calor, favoreciendo así el rendimiento térmico del sistema. Finalmente, en el caso específico de este montaje, el diseño de un recinto especializado para el PCM o su integración directa en la estructura inicial del destilador permitiría reducir las fallas por fugas y minimizar las pérdidas de calor por contacto con el agua. Esta modificación contribuiría a una mayor eficiencia del sistema en su conjunto.

REFERENCIAS

1. Estadísticas del agua en México (Edición 2011). (2011). http://bva.colech.edu.mx/xmlui/handle/1/1286?show=full (Accedido: 4 de abril de 2024).

2. Freire, H.A.S., Ones, O.P. y Muñoz, S.R. (2019) 'Límites termodinámicos a la productividad de los destiladores solares pasivos', Revista ION, 32(1), pp. 7-20. https://doi.org/10.18273/revion.v32n1-2019001.

3. Rubio, E., Porta, M.A. y Fernández, J.L. (2000) 'Cavity geometry influence on mass flow rate for single and double slope solar stills', Applied Thermal Engineering, 20(12), pp. 1105-1111. https://doi.org/10.1016/s1359-4311(99)00085-x.

4. Sathyamurthy, R. et al. (2014) 'Effect of Water Mass on Triangular Pyramid Solar Still Using Phase Change Material as Storage Medium', Energy Procedia, 61, pp. 2224-2228. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.114.

5. Deore, K., Salunke, N. P., & Pawar, S. B. (2023). Phase change materials (PCMs) in solar still: a review of use to improve productivity of still. Materials Today: Proceedings.

6. Prakash, P., & Velmurugan, V. (2015). Parameters influencing the productivity of solar stills–A review. Renewable and sustainable energy reviews, 49, 585-609.

7. Duffie, J.A. y Beckman, W.A. (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons.

8. Incropera, F.P. y DeWitt, D.P. (1999) Fundamentos de transferencia de calor. Pearson Educación.

FEM analysis for stresses and deformations of a wind turbine

Garcia Vidal Ana Yatziri[1], Dr. Badillo Ruiz Carlos Alberto[2], Cruz Mendoza Jesus[1].

[1]Instituto Tecnológico de Iztapalapa Campus 1, C.P. 09208.
(e-mail: cinklint587@gmail.com)
**[2]*Instituto Politécnico Nacional, Unidad UPIICSA, C.P. 08400.*

(e-mail: cbadillor@ipn.mx)

Abstract: This work addresses the structural analysis of a wind turbine using the Finite Element Method (FEM), in order to evaluate the stresses and deformations that are generated in its main components during operational conditions. The study is based on the need to guarantee the structural integrity of wind turbines, whose geometry and operation exposes them to complex and varied loads that, if not correctly evaluated, can lead to fatigue failures, permanent deformation or structural collapse.

The main objective was to model and analyze a horizontal axis wind turbine using the SolidWorks Simulation software, focusing specifically on the tower, rotor and gondola, all made of AISI 1020 steel. Representative mechanical loads (own weight, rotor rotation and inertial forces) were applied, and the results were evaluated in terms of stress distribution (Von Mises criterion) and elastic deformations.

The results showed that the maximum forces in the tower were located near the base, with Von Mises values close to 290 MPa, remaining below the elastic limit of the AISI 1020 steel (~350 MPa). The most significant deformations occurred at the top of the tower and at the tip of the blades, although within admissible ranges for elastic behavior.
As a conclusion, the FEM analysis allowed to validate that the structural design is safe under the conditions studied, although areas with concentrations of effort that could require reinforcement or redesign were identified. Likewise, possible errors in the meshing were detected near the joints, which could affect the accuracy of the local analysis. It is recommended to carry out complementary fatigue and vibration studies for a comprehensive design.

Keywords: *Wind turbines, technological development, wind energy, eco-friendly technology*.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis estructural mediante el Método de Elementos Finitos (FEM) es una herramienta fundamental en el diseño y evaluación de aerogeneradores, debido a la complejidad geométrica y funcional de sus componentes. Un aerogenerador está compuesto por varias estructuras críticas que deben soportar cargas mecánicas variables a lo largo de su vida útil. Entre las principales se encuentran la torre (estructura vertical de soporte), el rotor (que incluye el eje y el conjunto de palas), la góndola (contenedor de sistemas mecánicos), y el sistema de fundación[1].
Cada una de estas estructuras está expuesta a esfuerzos internos que generan deformaciones en el material. Estas deformaciones pueden clasificarse en axiales, flexionales, y torsionales, dependiendo de la geometría y las condiciones de carga. El análisis FEM permite simular estas condiciones aplicando cargas estáticas y dinámicas.[1]
Los resultados del análisis incluyen la distribución de esfuerzos internos, representados comúnmente mediante el criterio de Von Mises, y las deformaciones totales del material, las cuales deben mantenerse dentro del rango elástico para garantizar la integridad estructural. Una correcta interpretación de estos resultados es esencial para evitar fallos por plastificación, fatiga o inestabilidad estructural, asegurando así la durabilidad y seguridad del aerogenerador.
Este tipo de análisis es especialmente importante en componentes fabricados con materiales como el acero AISI 1020, empleado frecuentemente en la torre y la base por su resistencia mecánica y ductilidad[2]. La validación de estos diseños mediante FEM permite optimizar la geometría, minimizar el peso estructural y garantizar un rendimiento confiable bajo condiciones operativas reales.[2]
Los aerogeneradores de eje horizontal consisten en delgadas estructuras de materiales compuestos con una distribución muy sofisticada de resinas laminadas a lo largo de la envergadura y la cuerda. La optimización del diseño mecánico de las aspas se debe realizar modelándola como un conjunto de láminas delgadas más que con una aproximación mediante elementos viga.[3]
La energía renovable es energía creada a partir de fuentes que no se agotan, como solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica[1]. La mayoría de las turbinas eólicas están hechas de materiales compuestos para la generación de energía eólica, realizaron el experimento para la estructura de viga sándwich compuesta de

fibra de carbono/epoxi y encontraron que cuando la densidad del núcleo era pequeña, la falla era el resultado del daño por cizallamiento del material del núcleo.[4]
Tiene dos características distintivas, una es reserva infinita, y la segunda característica está demostrando que la energía limpia (cero emisiones de monóxido de carbono) es contraria a otras fuentes de energía como el carbón, el gas natural, el petróleo crudo y el uranio que dañan el medio ambiente.
La adecuada evaluación de las fuerzas interlaminares requiere un cálculo detallado del campo de fuerzas externas, es decir, del campo de presiones.[5]
No obstante, la acción de las fuerzas aerodinámicas induce una serie de deformaciones y esfuerzos en las aspas que deben ser analiza das desde un punto de vista estructural con el objeto de estimar la fatiga y/o ruptura del material, así como también el optimizar la forma, ya que la relación peso-resistencia de las aspas es un factor que define su diseño.[6]
La acción de las fuerzas aerodinámicas inducirá una serie de deformaciones y esfuerzos en las aspas que deben ser analizadas desde un punto de vista estructural, con el objeto de estimar la fatiga y/o ruptura del material, así como también el optimizar la forma, ya que la relación peso- resistencia de las aspas es un factor que define su diseño. En este momento la geometría de la pala y dicho campo de presiones son los datos introducidos en el paquete de elementos finitos dado por software de simulación por el elemento finito.[7]

2. METODOLOGÍA

Análisis Estructural (FEM / Analítico)

Modelado numérico (FEM - Método de Elementos Finitos):

- Discretización del modelo 3D en elementos finitos.
- Aplicación de condiciones de contorno.
- Empotramiento en la base.
- Conexiones mecánicas entre góndola y torre.
- Aplicación de cargas según escenario operativo.

En Este trabajo de investigación se divide en las siguientes secciones. La sección 1 se determina el tipo de diseño del aerogenerador además de la selección del tipo de aspas de este:

Diseño mecánico.
El diseño de la estructura mecánica fue realizado en el software SolidWorks con el fin de llegar a un análisis de esfuerzo-deformación con énfasis en la torre y el rotor, empleando acero AISI 1020 como material estructural.

2. Componentes modelados

- Torre: Cilíndrica de base cónica.
- Góndola: Caja estructural que contiene el sistema de transmisión.
- Rotor: Eje central donde se fijan las palas.
- Base de anclaje: Placa de acero con orificios para anclaje al suelo.

3. Material utilizado: Acero AISI 1020

- Tipo: Acero bajo carbono, dúctil, soldable.

Propiedades mecánicas:

- Límite elástico: ~350 MPa
- Resistencia a tracción: ~420 MPa
- Módulo de elasticidad: 205 GPa
- Densidad: 7870 kg/m³

Usado principalmente en la torre, base, y partes del rotor, gracias a su buena resistencia mecánica y bajo costo.

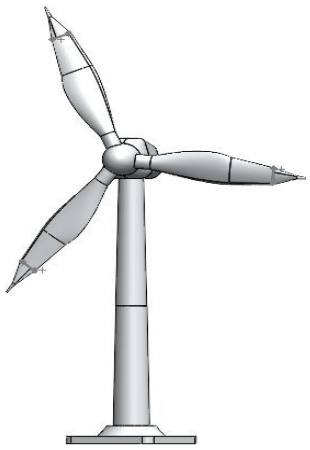


Figura 1. Diseño de la estructura en SolidWorks.

Las Análisis de elemento finito (FEM).
El análisis de la estructura fue realizado por el método de elementos finitos en SolidWorks. Este método consiste en realizar análisis estructurales y simular el comportamiento de un modelo bajo diferentes condiciones de carga, temperatura, etc.

Para realizar el análisis, primeramente, se creó el modelo o la estructura al cual fue sometida, se eligió el tipo de material y el tipo de estudio que se le aplicaría.
Ecuación de deformación:

$$\varepsilon = (L - L_o) / L_o$$

ε(épsilon): Representa la deformación unitaria, que es una medida adimensional que indica cuánto se ha deformado un material.
L: Es la longitud final del objeto después de la deformación.
L_o: Es la longitud original del objeto antes de ser deformado.

Fue un estudio estático el que se aplicó, el cual permite simular deformaciones y tensiones bajo cargas estáticas.

Por consiguiente, se tiene que definir la malla, este proceso divide el modelo en pequeños elementos. La malla es crítica porque determina la precisión del análisis y el tiempo de simulación. Una malla más fina dará mayor precisión, pero también aumentará el tiempo de cálculo.
Por último, se analizan los resultados del estudio después de completar el análisis, por ejemplo:

- Deformaciones: El modelo se deforma bajo las cargas aplicadas.
- Esfuerzos (tensiones): La distribución de las tensiones en el modelo.

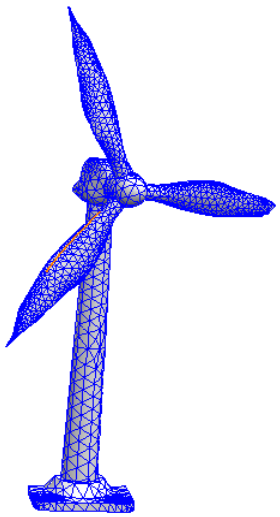


Figura 2. Sistema de mallado.

La figura 2 muestra el sistema de malla permite especificar diferentes tamaños de los elementos, caras realizadas.
Para realizar el análisis, primeramente, se creó el modelo o la estructura al cual fue sometida, se eligió el tipo de material y el tipo de estudio que se le aplicaría.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados muestran que los esfuerzos principales se concentran en las aspas y la torre, siendo estos los componentes más críticos debido a la acción del viento y las variaciones de carga.

La deformación muestra el cambio en la forma o posición de las piezas debido a cargas aplicadas.

Interpretación:

- Se mide en metros o milímetros, aunque suele visualizarse amplificada gráficamente.
- Componentes como las palas pueden experimentar deformaciones flexionales, mientras que la torre puede presentar flexión y compresión axial.
- La deformación total debe mantenerse dentro de los límites elásticos del material, para asegurar que la estructura pueda recuperar su forma original tras cesar la carga.

El esfuerzo de Von Mises es una medida escalar que representa el estado de esfuerzos en un punto del material. Indica cuán cerca está un material dúctil de fallar por fluencia (plastificación).

Interpretación en el análisis:

- Valores bajos (azul): la estructura está subutilizada estructuralmente.
- Valores medios (verde-amarillo): zona de trabajo normal del material.
- Valores altos (rojo): zonas críticas; el material está cerca de su límite de fluencia.

Si el esfuerzo de Von Mises excede el límite elástico del material, existe riesgo de deformación permanente o colapso local.

La calidad y precisión del análisis FEM en aerogeneradores dependen fuertemente de una definición realista de los materiales utilizados, no solo por sus propiedades mecánicas básicas, sino también por su comportamiento ante deformaciones, uniones y solicitaciones combinadas. El acero AISI 1020 se comporta adecuadamente para estructuras resistentes como la torre, mientras que los materiales compuestos requieren enfoques más avanzados en modelado. Una correcta combinación de materiales, unida a un modelado fiel en FEM, permite lograr un diseño seguro, eficiente y estructuralmente optimizado.

Comportamiento estructural:

Las deformaciones lineales observadas en los componentes de acero se mantienen dentro del rango elástico, lo cual asegura que no hay plastificación bajo condiciones normales.

En contraste, los materiales compuestos en las palas permiten mayores deformaciones sin llegar a la falla, pero requieren validaciones adicionales por fatiga y análisis no lineales si se busca precisión.

En general, la distribución de materiales dentro del diseño afecta no solo el rendimiento estructural, sino también la eficiencia del análisis FEM, ya que un mal modelado de propiedades puede llevar a interpretaciones erróneas sobre la seguridad estructural.

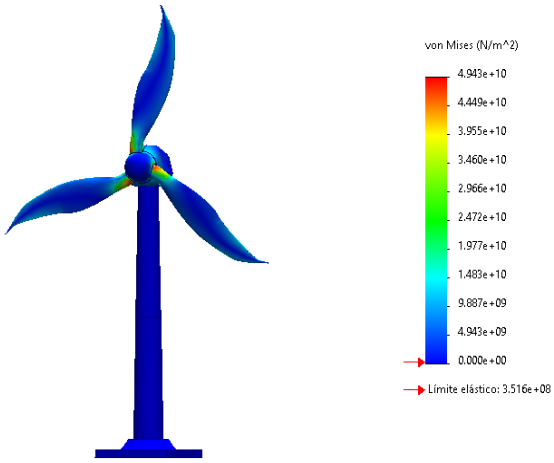


Figura 3. Análisis de deformación de Von Mises.

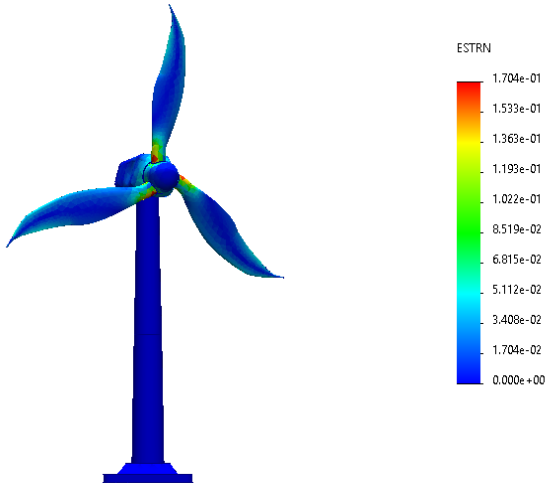


Figura 4. Deformación unitaria de la estructura aerogenerador

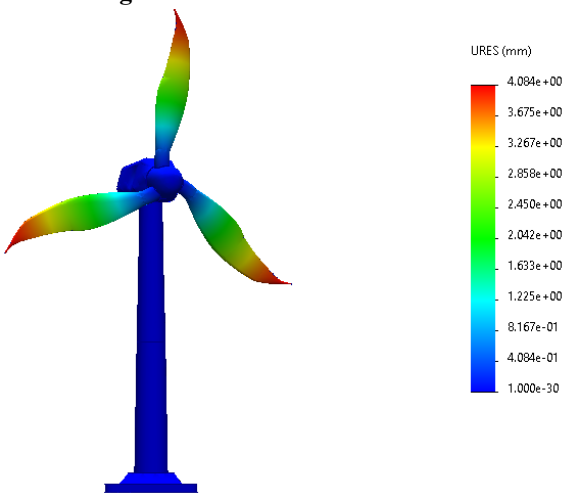


Figura 5. Desplazamiento resultante

Análisis estructural en SolidWorks Simulation

- Tipo de análisis: Estático lineal.
- Condiciones de frontera:
- Torre empotrada en la base.
- Rotor unido rígidamente a la góndola.
- Cargas aplicadas:
- Peso propio.
- Aceleración centrífuga sobre el rotor.
- Fuerzas inerciales de operación.

Los aerogeneradores, o turbinas eólicas, son dispositivos fundamentales en la producción de energía renovable a partir del viento.

Sin embargo, para que estos equipos funcionen de manera eficiente y segura, deben soportar una serie de esfuerzos y deformaciones estructurales debido a las fuerzas del viento y las condiciones ambientales extremas. Las deformaciones, tanto elásticas como plásticas, que experimentan las estructuras de las aspas, la torre y otros elementos, pueden influir en el rendimiento y la durabilidad del aerogenerador.[5]

4. CONCLUSIONES

El análisis de un aerogenerador es fundamental para garantizar su eficiencia, durabilidad y seguridad operativa. A lo largo del estudio, se han evaluado diversos factores que influyen en su desempeño, incluyendo cargas aerodinámicas, esfuerzos estructurales, fatiga de materiales y condiciones ambientales, el análisis de esfuerzos en un aerogenerador es esencial para su diseño óptimo y su operación segura, el uso de herramientas avanzadas como el software SolidWorks para el diseño estructural y el método de elementos finitos (FEM) para el análisis de esfuerzos y deformaciones permite garantizar la robustez y fiabilidad de la estructura en condiciones operativas.

La combinación de materiales innovadores, estrategias de monitoreo y mejoras en el diseño aerodinámico permite desarrollar turbinas más eficientes y sostenibles, contribuyendo al aprovechamiento de la energía eólica como fuente renovable clave para el futuro energético

Análisis estructural:

-Si todos los esfuerzos de Von Mises se mantienen por debajo del límite elástico, el diseño es estructuralmente viable.

-Las zonas con mayor concentración de esfuerzo deben revisarse:

-Geometría (esquinas, uniones, agujeros).

-Calidad de la malla.

-Posibles puntos de acumulación de tensiones residuales.

-La deformación debe ser elástica, reversible, y no comprometer el funcionamiento mecánico (por ejemplo, desalineaciones en el rotor).

Material y diseño:

-El diseño es estructuralmente viable bajo condiciones mecánicas típicas.

-El uso de AISI 1020 permite un buen equilibrio entre resistencia, ductilidad y economía.

-Se recomienda realizar análisis adicional de fatiga y modal para garantizar comportamiento a largo plazo.

La calidad y precisión del análisis FEM en aerogeneradores dependen fuertemente de una definición realista de los materiales utilizados, no solo por sus propiedades mecánicas básicas, sino también por su comportamiento ante deformaciones, uniones y solicitaciones combinadas. El acero AISI 1020 se comporta adecuadamente para estructuras resistentes como la torre, mientras que los materiales compuestos requieren enfoques más avanzados en modelado. Una correcta combinación de materiales, unida a un modelado fiel en FEM, permite lograr un diseño seguro, eficiente y estructuralmente optimizado.

REFERENCIAS

[1] Navadeh, N., Goroshko, I., Zhuk, Y., Etminan Moghadam, F., & Soleiman Fallah, A. (2021). Finite element analysis of wind turbine blade vibrations. *Vibration*, *4*(2), 310-322.
[2] Boudounit, H., Tarfaoui, M., Saifaoui, D., & Nachtane, M. (2020). Structural analysis of offshore wind turbine blades using finite element method. *Wind Engineering*, *44*(2), 168-180.
[3] Yeh, M. K., & Wang, C. H. (2017, October). Stress analysis of composite wind turbine blade by finite element method. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 241, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
[4] Muskulus, M., & Schafhirt, S. (2014). Design optimization of wind turbine support structures-a review. *Journal of Ocean and Wind Energy*, *1*(1), 12-22.
[5] Lozano-Minguez, E., Kolios, A. J., & Brennan, F. P. (2011). Multi-criteria assessment of offshore wind turbine support structures. *Renewable Energy*, *36*(11), 2831-2837.
[6] Tarfaoui, M., Khadimallah, H., Imad, A., & Pradillon, J. Y. (2012). Design and finite element modal analysis of 48m composite wind turbine blade. *Applied Mechanics and Materials*, *146*, 170-184.
[7] Raičević, N., Petrašinović, D., Grbović, A., Petrašinović, M., Balać, M., & Petrović, M. (2022, July). The wind speed impact on stress and deformation of composite wind turbine blade. In *International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies* (pp. 114-130). Cham: Springer International Publishing.
[8] Wiegard, B., König, M., Lund, J., Radtke, L., Netzband, S., Abdel-Maksoud, M., & Düster, A. (2021). Fluid-structure interaction and stress analysis of a floating wind turbine. *Marine structures*, *78*, 102970.

Electronic Instrumentation Platform for Wireless Signal and Dynamic Systems Analysis

Amaya Martínez, Israel * **Torres Mendoza, Manuel Enrique** *

* *Bachillerato Tecnológico Salesiano Carlos Gómez, J. Venegas 105 Virreyes, 78240, (e-mail: Isra775577@gmail.com and e-mail: manutm2007@gmail.com)*

Abstract: The present article outlines and details a reduced price and versatile laboratory equipment, consisting of an oscilloscope, a signal generator and a symmetrical direct current power supply designed for didactic purposes in the area of electronics and mechatronics, based on qualitative data from this group of professionals and technicians. Thus, we managed to create a complete electronics laboratory equipment model, contemplating our main objective of reverse innovation to provide low-value educational resources, at an uncertainty of barely 2%.

Keywords: Amplifier, DC/DC, PCB, FFT.

1. INTRODUCTION

In this day and age, high-level pedagogical tools for areas such as electronics and mechatronics are difficult to acquire, particularly in regions with complex socioeconomic situations. In Mexico, this problem is exacerbated in rural areas and communities without financial support, where the lack of infrastructure and adequate equipment makes it impossible for students to receive technical and professional training; (Ramírez and Bustos-Aguirre, 2022). According to the "Inventario de Residuos Electrónicos en México" (2021), the country produces more than 1.1 million tons of electronic waste each year, which is also evidenced by an environmental hazard for this country.

Addressing the above listed issues, there is a critical ongoing need to develop affordable solutions to provide access to low environmental impact, low-cost electronics laboratory equipment. Oscilloscopes, signal generators and power supplies usually incur a significant expense for most schools or institutions, making it problematic to strengthen practical skills among pupils. Thus, faced with this situation, a portable, multipurpose and low-cost electronic laboratory that embeds these three critical functions in a single device is required.

This project is mainly based on the concept of reverse innovation; (Hou and Li, 2023), pursuing the development of economical and functional solutions for emerging markets, where it is possible to sacrifice certain aspects of the equipment without jeopardizing the quality of the measurements made. In addition, previous studies strongly suggest that providing quality equipment to students can bridge the technology gap in education; (Rivera and Rojas, 2021), permitting more students to have access to laboratory equipment without relying on expensive and inaccessible instruments.

In tandem with its focus on access, this equipment features environmental sustainability criteria that promote the reuse of electronic components and aid in reducing the impact of e-waste on the surrounding environment. The integration of a digital oscilloscope with a signal generator and a symmetrical adjustable power supply in a single small space, not only saves space and resources, but also facilitates pedagogical tasks. Ergo, PCB layout, component selection, amplification and DC/DC conversion were implemented to achieve this goal. Other aspects include portability, manageability and durability to guarantee that the device is fully functional in the scenarios discussed above.

The discoveries of the present research not only fulfill the basic demand for training in electronics and mechatronics in Mexico, but also provide a feasible solution to other locations facing this very same dilemma. The whole equipment symbolizes a progress towards educational equity and the search for closing the technological gaps within electronics through an intervention where reverse innovation and knowledge of the branch itself are applied.

2. HARDWARE DESIGN

Interviews were carried out to learn about the various needs of electronics and mechatronics specialists, who shared valuable qualitative data about their personal experiences. This was further enhanced with the use of CAD and ECAD design tools using KiCad. (Kanagachidambaresan, 2021). In KiCad, we were given the opportunity to design printed circuit boards with a circuit tolerance of ±0.2 mm. Their associated costs and specifications were compared with representative educational equipment from Tektronix, once they were completed. Note that the ADC pins were designed to withstand only a limit of 3.3 volts of direct current, hence the oscilloscope was built with a Raspberry Pi Pico W in conjunction with an inverting operational amplifier that changes the input voltage to the

microcontroller without altering the native signal shape. The proposed schematic for obtaining measurable electrical signals on the Raspberry Pi Pico W is shown in Figure 1.

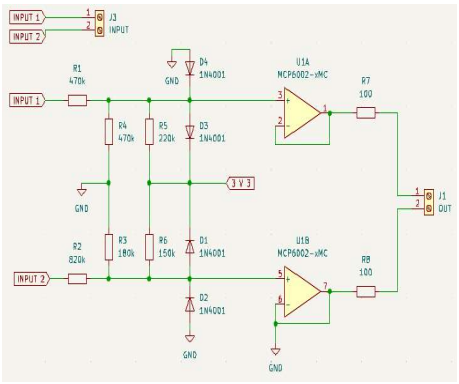


Figure 1. Proposed schematic circuit of the oscilloscope.

The ICL8038 integrated circuit was implemented to configure the function generator; (Tietze et al., 2020) incorporating also filters with ceramic capacitors, as shown in Figure 2. These components were selected for their accelerated response at high frequencies (1 Hz to 1 MHz in this project) and their stability; (Kanagachidambaresan, 2021).

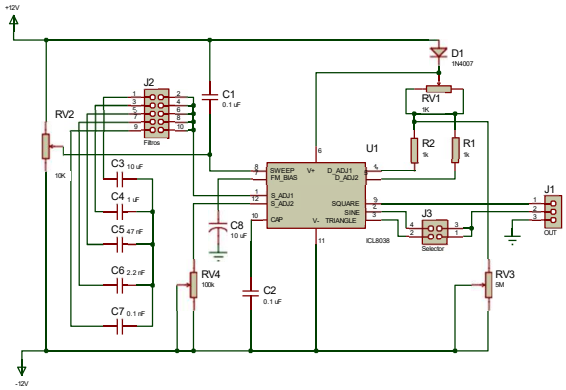


Figure 2. Schematic circuit of the function generator.

For the power supply, a buck/boost converter was used, combined with a voltmeter/ammeter to display voltage and current on a screen, as shown in Figure 3.

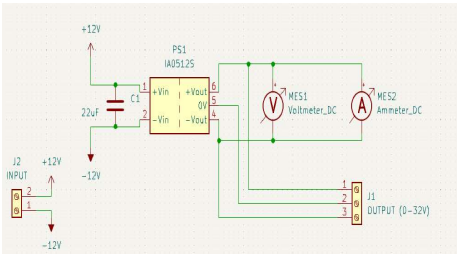


Figure 3. Schematic circuit of the voltage source.

To improve the presentation and optimize the use of space, PCBs were developed for the function generator and the oscilloscope; (Aparicio, 2022). As a result, the size of the device was reduced and its versatility and portability were ensured, as shown in Figures 4, 5 and 6.

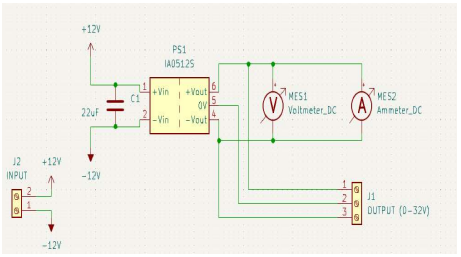


Figure 4. Schematic circuit of the voltage source.

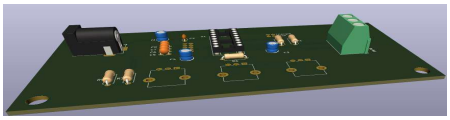


Figure 5. PCB of the function generator.

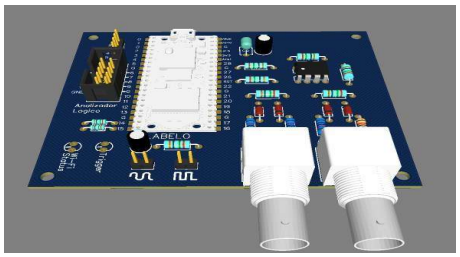


Figure 6. Oscilloscope PCB.

As shown in Figures 5 and 6, the aim was to cut down on the space required by the PCBs. When compared to conventional oscilloscopes, this one occupies only 6% of the size of a Tektronix oscilloscope in the electronics workshop of the "Instituto Salesiano Carlos Gómez" and the "Universidad Autónoma de San Luis Potosí". In addition, the structures were manufactured with recycled filament from 3D printing, highlighting the importance of considering the environmental impact that their manufacture may have entailed.

3. DESIGN RATIONALE: QUANTITATIVE JUSTIFICATION

The choice of the Raspberry Pi Pico W is primarily driven by its performance-to-cost ratio, highly supporting our reverse innovation goal. Key quantitative factors include:

- **Cost:** The Raspberry Pi Pico W microcontroller is available for approximately $7 USD. Thus, the key to producing a finished product that is budget-friendly (an order of magnitude less expensive than basic commercial oscilloscopes) is the incredibly low cost of the components.
- **Analog-to-Digital Converter (ADC):** The RP2040 chip features onboard ADCs with:
  - Resolution: 12-bit. It supplies $2^{12} = 4096$ distinct voltage levels, supplying sufficient vertical resolution for a variety of basic signal analysis uses.
  - Maximum Sampling Rate: Up to approximately 500 kS/s (kilosamples per second). According to the Nyquist-Shannon sampling theorem; (Vitulyova et al., 2023). While practical bandwidth will be lower due to processing overhead and front-end limitations, it is more than adequate to provide satisfactory performance for PWM (Pulse Width Modulation) signals, audio signals, communication protocols and even differential and chaotic circuit measurements; (Adi et al., 2024).
- **Processing Power:** The dual-core ARM Cortex-M0+ processor (Pico and Smith, 2023), runs at up to 133 MHz which provides adequate power for:
  - Acquiring data from the ADC at high rates.
  - Performing basic digital signal processing.
  - Handling data transfer, whether via USB or WiFi.
- **Memory:** It possesses 264 KB on-chip SRAM, allowing reasonably sized acquisition buffers and enabling the capture of signal segments for deeper analysis.
- **Connectivity:** Integrated Wi-Fi, which enables effective communication between user and computer or cell phone via Wi-Fi.

4. PROJECTED CORE SPECIFICATIONS

Based on the properties given by the Raspberry Pi Pico W, we can highlight these features:

- **Max Sampling Rate:** ≈ 500 kS/s (single channel).
- **Analog Bandwidth:** ≈ 1 Hz – 1 MHz (limit based on the practical use of the oscilloscope).
- **Vertical Resolution:** 12-bit.
- **Native Input Voltage Range:** 0 to 3.3 V.
- **Input Voltage by Means of the Amplifier:** −17.6 to 17.6 V
- **Connectivity:** USB, Wi-Fi.
- **Target Cost:** Significantly below $50 USD (including case).

5. NUMERICAL ANALYSIS

The following tables show the capacities of the laboratory equipment, delimiting the maximum and minimum of each characteristic.

Table 1. Oscilloscope features.

Feature	Minimum	maximum
Division per second	20 ns	20 s
Input voltage	-17.6 V	17.6 V
Bandwidth	1 µHz	2 MHz
Output amplitude	1 mVp-p	3.3 Vp-p
Power supply	3.3 VDC	3.3 VDC

The oscilloscope has limitations in such matters as bandwidth and supply voltage. However, it has measurements for all types of signals, two channels with BNC connectors, 8 channels of digital logic analyzers and the ability to perform mathematical functions (addition, subtraction, multiplication, division, inverse, logarithmic, neperian logarithm and FFT(Fast Fourier Transform)). It also has a WiFi connection with a maximum range of 3 meters of radio generated by the oscilloscope itself and, therefore, every time the user moves away from the microcontroller, there will be a longer delay in obtaining data.

Table 2. Voltage source features.

Feature	Minimum	Maximum
Output voltage	0 VDC	30 VDC
Output amperage	0 A	5 A

The voltage source includes a potentiometer for adjustment and a sensor to verify measurements on the LABELO website. The 8 cm long function generator generates square, sine and triangular waves, powered from 9 to 12 VDC.

The key equations for the circuits are:

- Inverting operational amplifier; (Kim et al., 2022):

$$V_{out} = V_m \frac{R_1}{R_f} \quad (1)$$

Where V_{out} is the output voltage, R_1 is the series resistor and R_f s the feedback resistor.

- Function generator ICL8038; (Saputra, 2023):

$$f = \frac{0.33}{RC} \quad (2)$$

Where f is the frequency, C is the capacitor and R is the timing resistor.

- Fast Fourier Transform (FFT); (Li et al., 2023):

$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-i2\pi fn/N} \quad (3)$$

Where $X(f)$ is the frequency spectrum, $x[n]$ are the temporary samples and N is the quantity of samples.

An error of 2% is considered due to environmental factors and tolerances.

Using Python, the FFT of the oscilloscope was simulated, as shown in Figure 7. This simulation reflects the first physical version, limited to 3.3 V and the maximum current of the ADC pins.

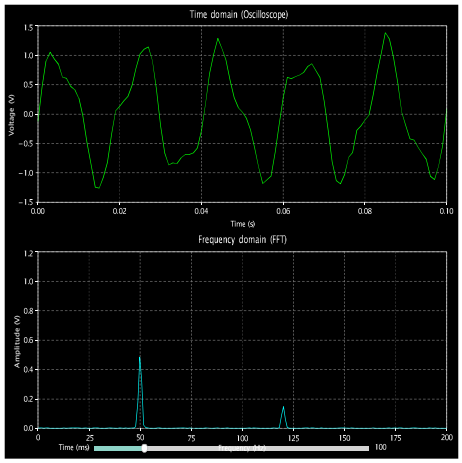


Figure 7. FFT simulation in Python.

6. RESULTS

The two oscilloscope channels and their mathematical functions were tested with signals from the function generator (Figure 8) and an electric violin (Figures 9, 10 and 11). The simulated violin signal included a fundamental frequency of 196 Hz, harmonics (2× and 3×) and noise.

Table 3. Identified frequency components in violin signal.

Component	Frequency (Hz)
Fundamental	196
First harmonic	392
Second harmonic	588

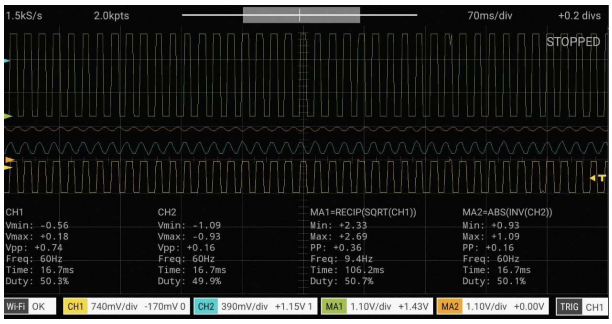


Figure 8. Test with function generator signals showing square wave output.

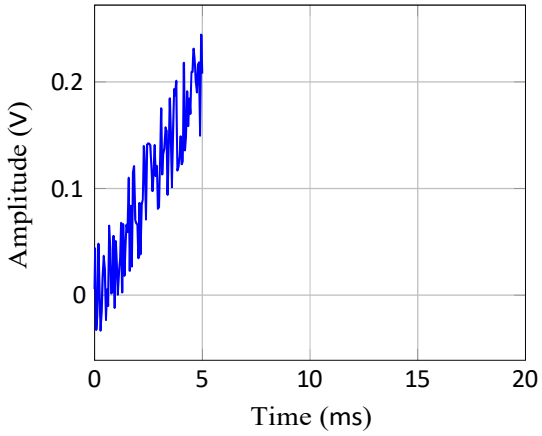


Figure 9. Time-domain signal captured from electric violin (G string).

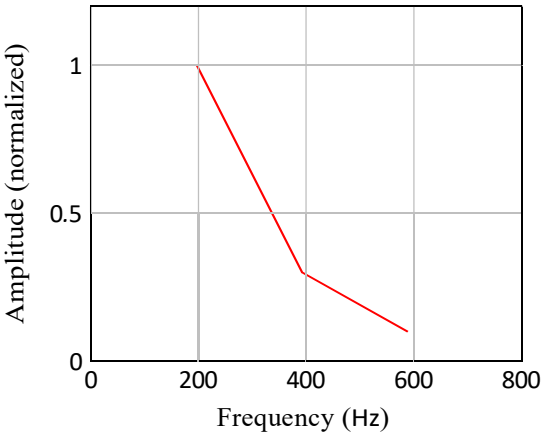


Figure 10. Frequency spectrum obtained through FFT analysis.

The frequency measurement error between simulated predictions and experimental results was 2 Hz (1.02% relative error), demonstrating good agreement between theoretical models and practical implementation as shown in Figure 11.

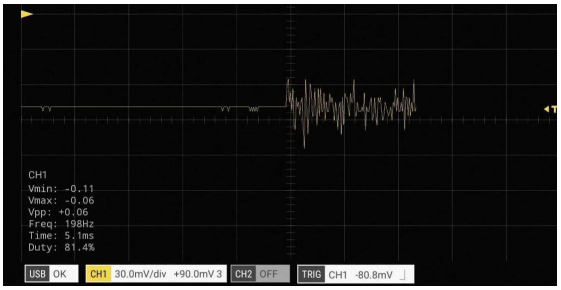


Figure 11. Oscilloscope display showing real-time violin signal analysis.

7. OBSERVATIONS

Experiments with noise, square, sine and triangular signals were successful, demonstrating the capability of the Raspberry Pi Pico W as an oscilloscope in a limited range. The device generates measurement files without the need for external storage connection. Its limitations include a bandwidth 10 times smaller than a conventional Tektronix-brand oscilloscope and a function generator limited to 1 MHz, offset by its portability with a rechargeable 9 V battery, making it independent of AC power or a fixed connection. The voltage source outperforms conventional ones in local workshops in San Luis Potosí, in terms of amperage and adjustment to the requirements of the connected load. The total cost was 1000 MXN, about 7% of the price of conventional equipment.

8. CONCLUSIONS

The objective of providing measurements close to educational laboratory equipment was achieved. The components were versatile and efficient, offering an economical alternative for electronics and mechatronics students. The function generator maintained distortion under 2% and stability between 9 and 12 VDC. The Raspberry Pi Pico W firmware was adapted for wired and wireless connection to Android, significantly reducing the cost. Based on what has been obtained, a future plan is to implement an independent function selector in the function generator. Also, we plan to potentially increase the sampling rate of the LABELO oscilloscope, in order to display more accurately the data of each frequency obtained. Additionally, an additional channel for a symmetrical DC power supply will be added.

REFERENCES

Adi, P.D.P., Kristiyanto, A., Sopandi, A., Nirmala, I., Tahir, M., and Wijaya, E.Y. (2024). Performance evaluation of raspberry pi pico for internet of things and its analysis. In *2024 4th International Conference on Electronic and Electrical Engineering and Intelligent System (ICE3IS)*, 7–12. IEEE.

Aparicio, M.P. (2022). *Diseño y desarrollo de circuitos impresos con KiCad*. Rc Libros.

Hou, F. and Li, C. (2023). Reverse innovation and firm value in emerging markets: Evidence from china. *Accounting & Finance*, 63(1), 161–198.

Kanagachidambaresan, G. (2021). Introduction to kicad design for breakout and circuit designs. In *Role of Single Board Computers (SBCs) in rapid IoT Prototyping*, 165–175. Springer.

Kim, S.M., Burgos, R., and Kwon, T. (2022). Design of rogowski switch-current sensor with offset compensation for three-phase sic inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(10), 11636–11649.

Li, L., Zhang, C., Cai, Y., Zhang, H., Li, Y., Li, X., Xiao, X., Wong, K.K.Y., and Zhang, X. (2023). Real-time fourier-domain optical vector oscilloscope. *Science Advances*, 9(18), eadg2538.

Pico, R.P. and Smith, S. (2023). Rp2040 assembly.

Ramírez, A.R. and Bustos-Aguirre, M.L. (2022). Beneficios, inconvenientes y retos de los cursos coil: las experiencias de los académicos. *Educación Superior y Sociedad (ESS)*, 34(2), 328–352.

Rivera, A.H. and Rojas, L.R. (2021). Brecha de género tecnológica en la educación financiera universitaria en méxico. *Revista Venezolana de Gerencia*, 26(93), 48–64.

Saputra, T. (2023). *Analisis Kinerja Rangkaian Pembangkit Sinyal Ultrasonik (5 Hz–400 KHz) dengan Menggunakan ICL8038*. Ph.D. thesis, Universitas Sumatera Utara.

Tietze, U., Schenk, C., and Gamm, E. (2020). *Electronic circuits: handbook for design and application*. Springer.

Vitulyova, Y.S., Suleimenov, I., Matrassulova, D., and Bakirov, A. (2023). Discrete form of the huygens-fresnel principle: to the multi-dimensional analog of the nyquist–shannon sampling theorem. *International Journal of Information Technology*, 15(7), 3751–3759.

Design and construction of an electrical conductivity measurement system for polymeric proton exchange membranes

Juan Carlos Carranza Cruz* Roberto Fernando Medina Juárez Celso Hernández Tenorio*** Hilda Moreno Saavedra**** Ismael Cosme Torres***** Omar César Díaz Lobatón******

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico s/n, Agrícola Bellavista, CP. 52149 Metepec, Edo. de México, México. (e-mail: jcarranzac@toluca.tecnm.mx).*

*** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico s/n, Agrícola Bellavista, CP. 52149 Metepec, Edo. de México, México. (e-mail: L20280616@toluca.tecnm.mx).*

**** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico s/n, Agrícola Bellavista, CP. 52149 Metepec, Edo. de México, México. (e-mail: chernandezt@toluca.tecnm.mx).*

***** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico s/n, Agrícola Bellavista, CP. 52149 Metepec, Edo. de México, México. (e-mail: hmorenos@toluca.tecnm.mx).*

****** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico s/n, Agrícola Bellavista, CP. 52149 Metepec, Edo. de México, México. (e-mail: ismaelct@toluca.tecnm.mx).*

******* Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico s/n, Agrícola Bellavista, CP. 52149 Metepec, Edo. de México, México. (e-mail: m24281941@toluca.tecnm.mx).*

Abstract: The measurement of proton conductivity is a key parameter for the evaluation of the performance of proton exchange membranes (PEM), widely used in fuel cells. In this study, the application of the Van der Pauw technique as a method to characterize the proton conductivity of these membranes is presented. The Van der Pauw technique is a widely recognized procedure for the determination of electrical resistivity in conductive materials with thin film geometry. This methodology is based on the combination of two four-point measurement configurations (current-voltage), which allows accurate results to be obtained without the need to use samples with specific or complex geometries.

In the present work, an electronic system has been developed for the measurement of resistivity in materials, in this case, semiconductor membranes, by means of the Van der Pauw technique. The conductivity obtained for the polymeric samples analyzed reaches a value close to 1.2 S/m.

It is concluded that the Van der Pauw technique represents a robust and effective tool for the characterization of proton exchange membranes, providing relevant information for the development and optimization of semiconductor materials for high efficiency energy technologies.

Keywords: Conductivity, resistivity, membrane, Van der Pauw, measurement.

1. INTRODUCTION

Conductive polymers can be considered reactive materials, since they modify their properties when immersed in a solution and subject to oxidation and reduction processes. This variation in their characteristics opens wide possibilities for new applications, such as fuel cells, artificial muscles, solar panels and smart membranes. For the effective fabrication of these devices, it is essential to know their electrical, morphological, mechanical properties and film thickness, since all of them directly influence the performance of the applications (Roca et al., 2010).

Among the most relevant properties of polymeric materials are resistivity and electrical conductivity, because they determine how these materials interact with other components in composite devices, which can affect their mechanical, thermal and chemical characteristics. Resistivity and conductivity provide a quantitative measure of a material's ability to resist or allow the flow of electric current. To study these properties in composite materials, the Van der Pauw technique has been employed, which has the advantage of allowing accurate measurements on small samples and without requiring a specific geometry, using only four electrical contacts (Salgado-Delgado et al., 2016).

In recent decades, numerous theoretical studies have focused on the analysis of resistivity measurements using the Van der Pauw method. Some of these works have identified combinations of factors that can generate deviations in the results obtained. Among the main sources of error are incorrect

location of current and voltage contacts, contacts distant from the perimeter of the sample, the use of non-point contacts, significant thickness of the sample and inhomogeneity in the properties of the material analyzed (Weiss, 2013). For the technique to provide reliable results, it is essential that the sample is homogeneous, that the contacts are located on the perimeter of the active region and that the active region is in the form of a thin, flat layer (Ausserlechner, 2017).

Van der Pauw's technique represents an accessible, accurate and efficient alternative for the measurement of electrical conductivity in semiconducting membranes, especially compared to more sophisticated methods that require expensive equipment and complex procedures. Unlike techniques such as electrochemical impedance spectroscopy (EIS) or conductive atomic force microscopy (C-AFM), which require highly specialized instrumentation, the Van der Pauw technique can be implemented with basic equipment such as a current source, a high-precision voltmeter and a suitable electrode configuration. This not only significantly reduces operating costs but also decreases preparation and analysis time by not requiring strictly defined geometries or the fabrication of complex contacts. In addition, its applicability to thin samples and samples of arbitrary geometry makes it a versatile and effective tool for electrical characterization in laboratories with limited resources.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Van der Pauw Technique

Using the Van der Pauw technique, a sample holder, preferably rectangular, was placed with four contacts located at the ends and labeled 1, 2, 3 and 4. The methodology establishes that in two of these contacts current is supplied, and in the opposite neighboring contacts voltage is measured. To calculate the electrical conductivity, the average resistances in horizontal and vertical orientation, labeled R-A and R-B, respectively, were measured using the Van der Pauw technique (Fig. 1) (Lara Velázquez et al., 2024).

To eliminate errors associated with contact resistance and ensure measurement accuracy, the average value of the first four resistance readings in the horizontal direction was obtained. This average corresponds to the value of R-A Equation (1), (Fig. 2). Similarly, the average of the four measurements in vertical orientation allowed determining the resistance R-B Equation (2), (Fig. 3).

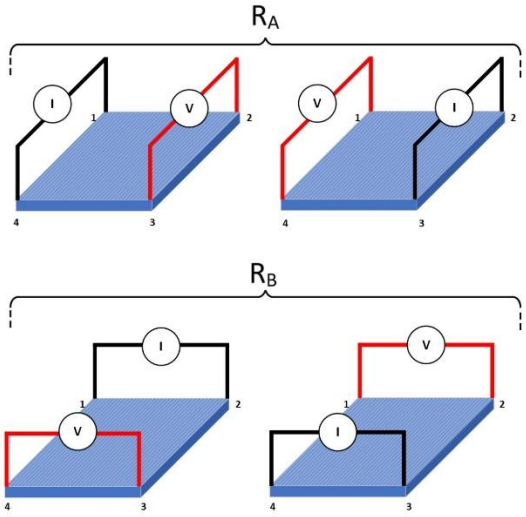


Figure 1. Experimental setup for the determination of RA and RB resistance using the Van der Pauw technique.

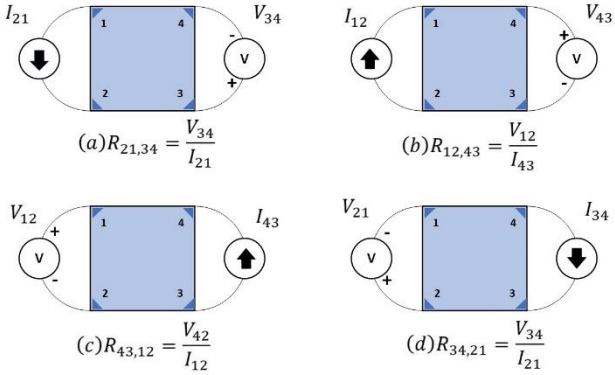


Figure 2. Initial configurations used to determine R_A resistance

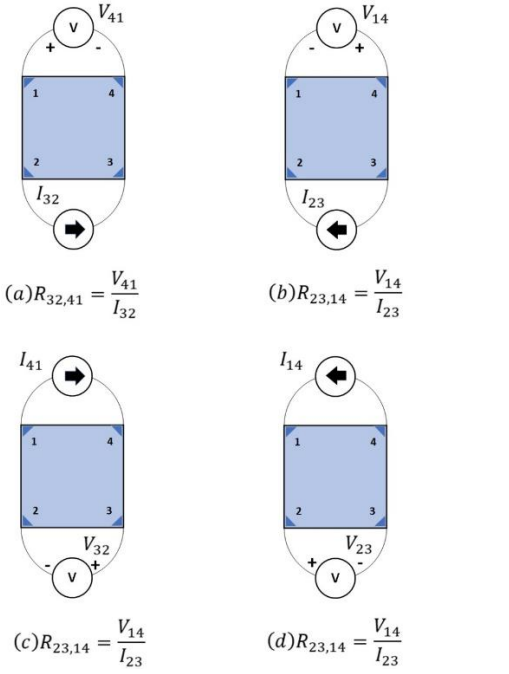


Figure 3. Initial configurations used for R_B resistance determination.

$$RA = \frac{R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21}}{4} \quad (1)$$

$$RB = \frac{R_{32,41} + R_{23,14} + R_{41,32} + R_{14,23}}{4} \quad (2)$$

Once the values of RAR_ARA and RBR_BRB were obtained, the resistivity was calculated using Van der Pauw's equation, which is expressed as follows (Equation 3):

$$e^{-\frac{\pi t}{\rho}R_A} + e^{-\frac{\pi t}{\rho}R_B} = 1 \quad (3)$$

Where:

- t: sample thickness (mm),
- ρ: conductivity (S/m)

2.2 Electronic design

To automate the measurement process based on Van der Pauw's technique, an electronic switching system was designed to sequentially and accurately perform the different configurations required to obtain the resistances corresponding to R-A and R-b. This electronic controller integrates a set of relays operated by means of a microcontroller (PIC16F877A), which enables the automatic selection of the electrode pairs for current injection and voltage measurement. This automation minimizes manual intervention and reduces systematic errors. It also improves the repeatability and efficiency of the test, and facilitates the execution of serial measurements, which is a significant advantage for the electrical characterization of multiple samples, especially in laboratories with limited resources.

2.2.1 Schematic of the measurement system

The measurement system consists of a switching module, a sample holder, a current source, and a KEITHLEY 2450-EC voltage and current measuring device (Fig. 4). Currently, data acquisition is performed manually, using the values provided by the voltage measurement equipment.

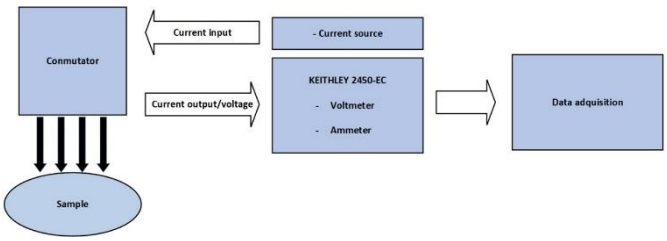


Figure 4. Measurement system schematic.

2.2.2 Electronic switching system

To automate the measurements required by the Van der Pauw technique, a truth table (Table 1) was developed, which defines the necessary switching configurations to obtain the different resistances. This table establishes the logical activation states of each relay, depending on the desired current and voltage configuration between the four electrodes located at the edge of the sample. The implementation was carried out based on the circuit shown in Figure 5, where the electronically controlled relay system is schematized. Each logical combination defined in the truth table allows automatic selection of the current emitting electrode pair and the voltage receiving pair, precisely replicating the conditions required by the technique. This approach ensures controlled and reproducible switching, which facilitates sequential data acquisition and allows integration into automated measurement systems.

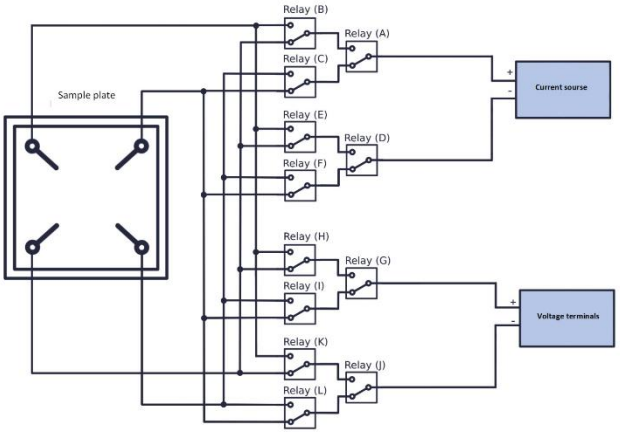


Figure 5. Configurations to measure the 8 states of Van der Puw's method.

Table 1. Switching Truth Table

Current/ voltage	Truth Table								
Position	RA0	RB0	RB1	RB2	RB3	RB4	RB5	RB6	RB7
I12, V34	0	1	0	1	0	1	1	0	0
I23, V14	0	0	0	1	1	1	0	1	0
I34, V21	0	0	1	0	1	0	0	1	1
I41, V32	0	1	1	0	0	0	1	0	1
I21, V34	1	1	0	1	0	1	1	0	0
I32, V14	1	0	0	1	1	1	0	1	0
I43, V21	1	0	1	0	1	0	0	1	1
I14, V32	1	1	1	0	0	0	1	0	1

2.3 Mechanical design

As part of the automated measurement system, a mechanical prototype was developed that integrates a sample holder specifically designed to house the membrane during measurements, as well as a contact press responsible for applying constant pressure on the sample. This component is fundamental, since the Van der Pauw technique requires stable and uniform contact pressure to guarantee an adequate electrical connection between the electrodes and the membrane surface, avoiding variations in the results (Fig. 6). The press mechanism consists of a rigid structure driven by a motor (NEMA17), which, by means of a worm screw, allows pressure to be applied in a controlled manner, either manually or automatically. The geometry of the system ensures a homogeneous distribution of the force on the sample. This design not only guarantees repeatability of measurements but also protects the physical integrity of the membranes during the experimental process.

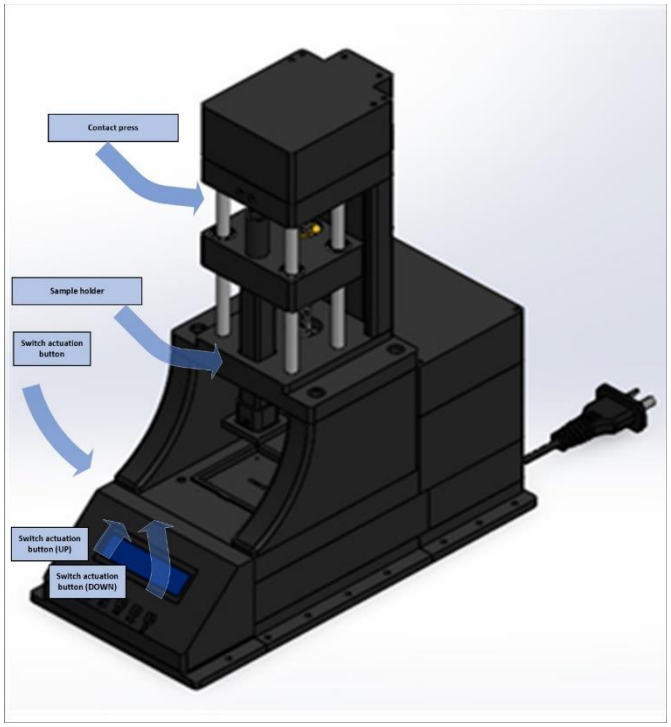


Figure 6. Mechanical design of the measuring system

2.4 Obtaining the polymeric samples

The polymeric samples used in the measurement were obtained by the in situ chitosan synthesis process (Carranza et al., 2024). 100 mL of deionized water, 3 g of chitosan, 3 mL of glycerol, 1 mL of acetic acid and 15 µL of ethylene glycol diglyceride were used. These components were sonicated and stirred until a homogeneous mixture was obtained, which was subsequently evaporated to form the polymeric membrane (Fig. 7).

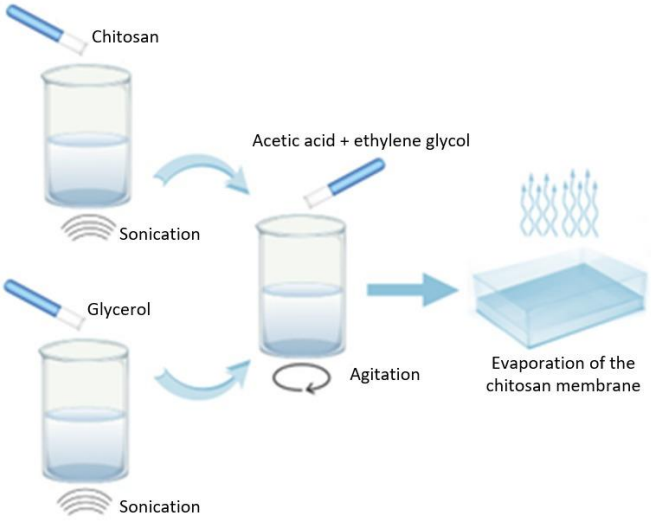


Figure 7. Preparation of chitosan polymeric membrane.

3 RESULTS

3.1 Characterization of polymeric samples

Figure 8 shows the chitosan membranes used in the measurements, these showed good homogeneity with thicknesses ranging from 0.10 mm to 0.30 mm, determined using a precision micrometer (Insize 3109-25A).

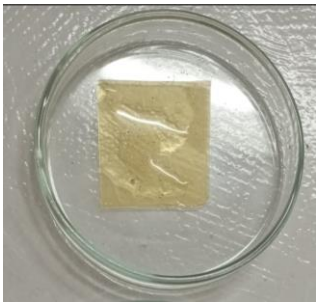


Figure 8. Preparation of chitosan polymeric membrane.

3.2 Electronic design

Figure 9 shows the printed circuit, where the operation of the PIC microcontroller together with the other electronic components can be observed. This stage allowed validating the design and schematization of the system, which facilitated its subsequent implementation.

After completing the testing and schematic phase, the different components of the physical circuit were assembled. These were mounted on printed circuit boards (PCB), which simplified both the design and prototyping of the system. The modules in charge of press control and contact switching were integrated on these boards, ensuring efficient and compact operation.

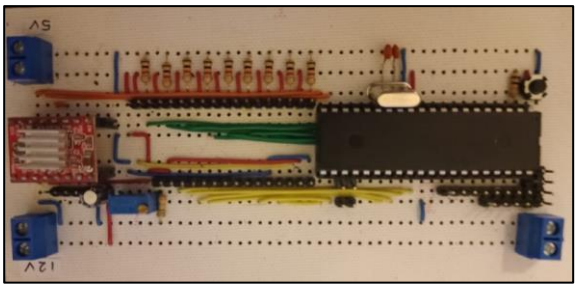


Figure 9. Printed circuit of the control module.

3.3 Mechanical design

A sample holder was fabricated by 3D printing to carry out the measurement tests. To protect the polymeric membranes, a copper alloy foil with a small amount of tin and a thickness of 0.1 mm was used. The distance between the contacts was 2.5 cm per side (Fig. 10).

The mechanical module of the system was designed to control the vertical movement of a compact press, whose main function was to apply pressure on the membrane in the sample holder, ensuring proper contact during the measurement. This movement was performed by a stepper motor, which was operated by means of two digital outputs through push buttons to control the direction of rotation.

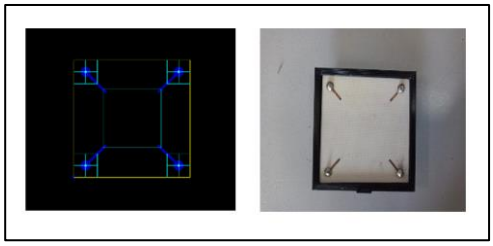


Figure 10. Design and manufacture of the sample holder.

3.4 Measurement results.

To characterize the electrical contacts and obtain reliable data, current-voltage (I-V) measurements were performed by varying the voltage between -12 V and 12 V. Measurements were made in the eight possible configurations defined by the Van der Pauw technique to obtain the current and voltage values necessary for the subsequent resistivity and conductivity calculations. The device has a 16x2 LCD display that shows the states of the R_A and R_B configurations (Fig. 11).

Using Van der Pauw's equation 3 and considering the individual thicknesses of the samples, the electrical resistivity (ρ) and conductivity (σ) values were calculated for each polymer membrane. Table 2 presents the results, detailing the thickness, resistivity, and electrical conductivity of each sample evaluated.

Table 2: Resistivity and conductivity data of polypyrrole doped chitosan membranes.

SAMPLE	THICKNESS (mm)	RESISTIVITY (Ωm)	CONDUCTIVITY (S/m)
1	0,213	12,78	0,0782
2	0,213	14,91	0,0672
3	0,213	21,42	0,0467
4	0,261	16,12	0,0621
5	0,261	1,063	0,941
6	0,261	1,07	0,935
7	0,3014	0,929	1,08
8	0,204	8,98	0,111
9	0,204	22,44	0,0446
10	0,204	6,955	0,1438
11	0,19	1,629	0,6137
12	0,2	4	0,25
13	0,2	3,2	0,3125
14	0,2	4,5	0,222
15	0,124	53,63	0,01865
16	0,124	0,827	1,21
17	0,124	5,414	0,185



Figure 11. Measurement tests of polymeric membranes.

4. CONCLUSIONS

The implementation of the Van der Pauw technique for measuring electrical conductivity in polymeric membranes proved to be an effective, accurate, and accessible alternative to more sophisticated conventional methods. The design of the automated system, which integrates an electronic switching module, a sample holder with a contact clamp, and a relay-based controller, enabled sequential measurements to be performed in a controlled and reproducible manner,

significantly reducing manual intervention and associated errors.

The experimental results confirmed the variability in the membranes' electrical properties, with conductivity values ranging from 0.0187 to 1.21 S/m, depending on the thickness and composition of each sample. These values are within the range reported for conductive polymeric materials, validating the reliability of the proposed system.

Furthermore, the mechanical design of the system ensured constant contact pressure during the measurements, meeting the fundamental requirements of the Van der Pauw technique. This aspect was key to ensuring the consistency of the results obtained. Taken together, the advances presented in this work contribute to the development of more accessible and replicable electrical characterization methodologies in resource-limited laboratory settings, opening new possibilities for the evaluation of functional materials in energy, electronics, and bioelectronic applications.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the Instituto Tecnológico de Toluca and the COMECYT Investigadores program, folio CAT2024-0010, for the facilities provided for the development of this work.

6. REFERENCES

Ausserlechner, U., 2017. Van-der-Pauw measurement on devices with four contacts and two orthogonal mirror symmetries. Solid State Electron 133, 53–63. https://doi.org/10.1016/j.sse.2017.04.006

Carranza, C., Hernández, T., Moreno, S., & Escobedo, C. (2024). Preparación de películas de Quitosano/Polipirrol para su funcionamiento en celdas de combustible tipo PEM. Simposio Ambiente y Bioenergía 2024.

González-Díaz, G., Pastor, D., García-Hemme, E., Montero, D., García-Hernansanz, R., Olea, J., del Prado, A., San Andrés, E., Mártil, I., 2017. A robust method to determine the contact resistance using the van der Pauw set up. Measurement (Lond) 98, 151–158. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.11.040

Lara Velázquez, I., Rivera Bravo, E., Ortiz, P.M., Iván, R., Blanco, R., Isaías, F., Torres, T., 2024. Implementación de un sistema de conmutación para medición de efecto hall usando myopenlab implementation of a hall effect measurement system using myopenlab, Tecnológico Nacional de México en Celaya Pistas Educativas.

Ramadan, A.A., Gould, R.D., Ashour, A., 1994. On the Van der Pauw method of resistivity measurements.

M. Inés Roca, José G. Martínez, Mercedes Alfaro, M" Ángeles Pérez, Joaquín Arias-Pardilla, Toribio F. Otero., 2010. Influencia de distintos parámetros en la reacción de oxidación del polipirrol. En III Jornadas de introducción a la investigación de la UPCT, mayo 2010, no 3, 53-55 p. ISSN: 1888-8356. En III Jornadas de introducción a la investigación de la UPCT no 3, 53-55 p.

Salgado-Delgado, R., Olarte-Paredes, A., Salgado-Delgado, A.M., Vargas-Galarza, Z., García-Hernández, E., Rubio-Rosas, E., López-Lara, T., Hernández-Zaragoza, J.B., n.d. 56 Caracterización eléctrica y térmica de un material compuesto de HDPE/PPy/CB/CNT |.

L. J. van der Pauw, “A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape,” Philips Research Reports, vol. 13, no. 1, pp.1-9, 1958.

Weiss, J.D., 2013. A comparison of two van-der-Pauw measurement configurations of resistivity. Mater Sci Semicond Process 16, 1637–1644. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2013.05.013

Design and Implementation of an IoT-Based Remote Light Quality Monitoring System

Marifer Jimenez Luna*. Jorge Salvador Valdez Martínez Iván Alcalá Barojas** Luis Jaime López Vega** Enrique Contreras Calderón** Guillermo Ramírez Zúñiga****

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490 México; (e-mail: m24ce121@cenidet.tecnm.mx)*

***Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos, Emiliano Zapata, Morelos, 62760 México; (e-mail: jorgevaldez@utez.edu.mx, ivanalcala@utez.edu.mx, luislopez@utez.edu.mx, enriquecontreras@utez.edu,mx, guillermoramirez@utez.edu.mx)*

Abstract: Recent advancements in IoT technologies have revolutionized environmental monitoring systems, enabling more precise and automated measurements across various institutional settings. This manuscript presents the development and implementation of an embedded system for luminous intensity telemetry, based on a hardware/software architecture integrating: (1) a NodeMCU ESP8266 module with WiFi connectivity, (2) a 16-bit GY-302 (BH1750) sensor with I²C interface, and (3) a Modbus TCP/IP protocol for wireless data transmission. The results demonstrate 97% correlation with reference measurements from an industrial-grade lux meter, achieving a ±3% margin of error through polynomial calibration modeling. The proposed solution establishes a scalable framework for smart buildings applications, combining low-cost implementation, metrological precision, and compatibility with industrial platforms such as LabVIEW® and OPC Server®.

Keywords: Telemetry, ModBUS TCP/IP, Embedded systems, Light monitoring, Industrial IoT.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad lumínica en entornos de trabajo es un factor crítico que impacta directamente el bienestar y el rendimiento de los individuos. A medida que la sociedad moderna evoluciona hacia una mayor dependencia de entornos de trabajo cerrados, la iluminación adecuada se ha vuelto esencial para garantizar condiciones laborales óptimas. Sin embargo, la falta de sistemas de monitoreo eficientes y adaptados a las necesidades específicas de cada entorno dificulta la evaluación objetiva de la intensidad luminosa, lo que puede derivar en fatiga visual, disminución del rendimiento e incluso problemas de salud a largo plazo (Boubekri et al, 2014). Y estos factores influyen directamente en la productividad y el rendimiento cognitivo de los empleados, afectando así la eficacia general de las actividades laborales. La introducción de sistemas embebidos como un sistema de monitoreo remoto con sensores lumínicos como GY-302 podría ser la resolución de este problema, y no solo mejoraría las condiciones laborales y la salud de los empleados, sino que también contribuiría a la eficiencia energética y a la sostenibilidad en el contexto laboral. Al mismo tiempo, la implementación de un sistema de monitoreo remoto, respaldado por tecnologías de telemetría, facilitaría la recopilación y análisis continuo de datos en tiempo real sobre la intensidad luminosa.

Por esta razón el presente manuscrito contempla el desarrollo de un sistema de monitoreo remoto de la intensidad luminosa mediante el uso del sensor GY-302 que se comunicará con una interfaz gráfica hecha en LabVIEW con el fin de determinar la calidad lumínica en la UTEZ. Esto es debido a que estudios previos han demostrado que una iluminación inadecuada puede afectar negativamente la concentración, el aprendizaje y por consecuencia el desempeño de los alumnos en cualquier centro de enseñanza (Heschong et al, 2002). Además, la falta de datos cuantitativos en tiempo real impide la toma de decisiones informadas para optimizar el consumo energético y mejorar el confort visual.

Entonces para poder concretar el objetivo de este trabajo, se desarrollará un sistema de monitoreo basado en el sistema embebido con conexión inalámbrica ESP8266, con un programa que permita la comunicación del sensor GY-302 con el sistema embebido y a su vez, envíe la intensidad lumínica medida del sistema embebido al Software de LabVIEW usando el protocolo de comunicación MODBUS. El valor medido por el sensor será comparado con el medidor EXTECH Easyview 33, esto con el fin ajustar el valor mediante una aproximación polinomial.

Este desarrollo pretende demostrar cómo el diseño y desarrollo de un sistema embebido, junto con el sensor de Intensidad lumínica, pueden desempeñar un papel crucial en la obtención y transmisión eficiente de datos mediante una conexión de red inalámbrica. La razón fundamental del proyecto es facilitar el monitoreo remoto destinado a evaluar la calidad lumínica en áreas específicas de la UTEZ, enfatizando la importancia de la integración de tecnologías para optimizar la gestión y comprensión del entorno lumínico en dicha institución.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y TRABAJOS RELACIONADOS

En esta sección se presentan los conceptos utilizados en este manuscrito, así como los trabajos relacionados relevantes para la investigación realizada.

2.1 Protocolo de comunicación MODBUS TCP/IP

Modbus TCP/IP es una variante del protocolo Modbus RTU con una interfaz TCP que se ejecuta en Ethernet, se comunican utilizando una técnica de maestro-esclavo (cliente-servidor) en el que sólo un dispositivo (el maestro/cliente) puede iniciar transacciones (denominadas consultas). Los otros dispositivos (esclavos/servidores) responden mediante el suministro de los datos solicitados al maestro o mediante la adopción de las medidas solicitadas en consulta. La estructura de mensajería Modbus es el protocolo de aplicación que define las normas para la organización y la interpretación de los datos independiente del medio de transmisión de datos. TCP / IP se refiere al Protocolo de Internet y Protocolo de control de transmisión, que proporciona el medio de transmisión de mensajes Modbus TCP / IP. La función principal de TCP es asegurar que todos los paquetes de datos se reciben correctamente, mientras que IP se asegura de que los mensajes se abordan y colocados correctamente (Automation Networks, 2021).

2.2 NI OPC SERVER

Un servidor OPC es un software que se utiliza para conectar diferentes sistemas y dispositivos industriales, permitiendo que estos sistemas intercambien información de forma rápida y precisa. Sirve como intermediario entre los dispositivos de campo y las aplicaciones de supervisión y control, permitiendo que estos sistemas diferentes se comuniquen entre sí. Los servidores OPC pueden usarse para recopilar y distribuir datos en tiempo real desde dispositivos de campo, como sensores, actuadores, controladores de procesos, PLCs, etc (Veliz, 2022). Un servidor OPC funciona como un intermediario entre los dispositivos de campo y las aplicaciones de supervisión y control, permitiendo que estos sistemas diferentes se comuniquen entre sí. El servidor OPC se comunica con los dispositivos de campo mediante protocolos específicos, como Modbus, Profinet, EtherNet/IP, etc. y recopila la información de estos dispositivos, el servidor OPC convierte esta información en un formato estandarizado, como OPC DA (Data Access) o OPC UA (Unified Architecture) y la distribuye a las aplicaciones de supervisión y control que están conectadas al servidor OPC (SENSORICX, 2024).

2.3 NodeMCU ESP8266 WIFI

El módulo NodeMCU es una placa con Wifi, la cual tiene integrado el microcontrolador ESP8266, el cual ofrece una solución completa y autónoma de redes Wi-Fi, lo que le permite alojar la aplicación o servir como puente entre Internet y un microcontrolador (Ver figura 1). El ESP8266 tiene la capacidad de procesamiento y almacenamiento que le permiten integrarse con sensores y dispositivos específicos de aplicación a través de sus GPIO's. Su alto grado de integración en el chip permite una circuitería externa mínima, y la totalidad de la solución, incluyendo el módulo está diseñado para ocupar el área mínima en un PCB (Espressif, 2023).

2.4 Sensor GY-302

En la figura 2, se muestra al sensor GY-302, el cual tiene la capacidad de obtener la intensidad luminosa y está basado en el chip BH1750. Cuenta con un convertidor analógico/digital (ADC) de 16 bits, lo que lleva a que su señal de salida sea en forma digital con el protocolo I2C lo cual permite una interacción más sencilla entre el sensor y dispositivos digitales. Las aplicaciones del módulo GY-302 abarcan desde el control de la intensidad lumínica en dispositivos de visualización hasta su integración en sistemas de domótica, así como la realización de mediciones de la iluminación ambiental (Unit Electronics, 2024).



Figura 1. Node MCU (Espressif, 2023)



Figura 2. Sensor GY-302 (Unit Electronics, 2024)

2.5 Estado del arte

Con el objetivo de comprender el panorama tecnológico actual y fundamentar el desarrollo del presente proyecto, se consultaron y examinaron avances relevantes que serán abordados en esta sección.

(Silva, 2017) desarrolló un sistema de telemetría y representación de datos para un monoplaza de competición, con el objetivo de monitorear remotamente los parámetros críticos del vehículo y facilitar la comunicación entre sus subsistemas durante pruebas en pista. El estudio implementó un esquema de adquisición distribuida mediante 22 sensores ubicados estratégicamente en el chasis, permitiendo validar el funcionamiento integral del vehículo previo a competencias. Para el procesamiento de datos, se emplearon las plataformas LabVIEW y MATLAB, las cuales dieron pauta a desarrollar lo siguiente:

- Almacenamiento histórico de mediciones para análisis posterior.
- Visualización en tiempo real de variables operativas.

La transmisión inalámbrica requirió un alcance mínimo de 500 m, para lo cual se seleccionó el protocolo CAN bus (Controller Area Network), estándar en automoción debido la capacidad de manejar flujos de datos multiplexados, y por la tolerancia a interferencias en entornos dinámicos. Durante las pruebas, se identificó que una falla en el bus CAN provocó la interrupción completa de la telemetría, así como una pérdida de datos críticos, a pesar del correcto funcionamiento de subsistemas individuales. Este incidente evidenció que la robustez del sistema depende integralmente

de la comunicación CAN, ya que su colapso anula la capacidad de monitoreo remoto, incluso con sensores y unidades de procesamiento operativos. El trabajo subraya la necesidad de implementar mecanismos de detección de interrupciones en la comunicación en arquitecturas de telemetría para entornos de alta exigencia, como competiciones automovilísticas. En la figura 3 se puede observar una parte del panel frontal de los datos generales de la telemetría realizada por el trabajo de (Silva, 2017).

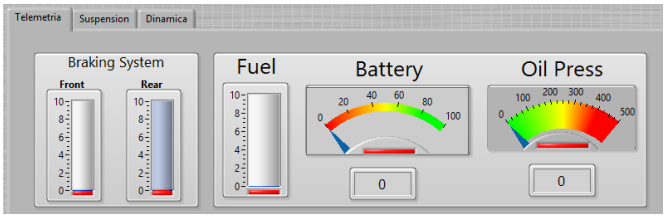


Figura 3. Datos generales de la telemetría de la monoplaza del desarrollo de (Silva, 2017).

En (Gil, 2016) se desarrolló un sistema de telemetría en tiempo real utilizando la plataforma embebida Intel Edison, con el objetivo de adquirir, almacenar y transmitir datos de magnitudes físicas y químicas a un sistema remoto para su posterior procesamiento y visualización. El estudio se centró en la adaptación de hardware-software para lograr la integración de sensores (acelerómetro, sensor de efecto Hall, potenciómetro) con la plataforma Intel Edison y en una rutina de adquisición de datos, esto con el fin de lograr una implementación de un esquema de muestreo con restablecimiento programable de frecuencias para cada sensor. En forma adicional, se realizó el diseño de un servidor para recepción, visualización y análisis de datos en tiempo real mediante protocolos de comunicación por Internet.

De los resultados obtenidos, se evaluó la tasa de transferencia de datos, confirmando la capacidad de enviar información en tiempo real sin pérdidas significativas. Se implementó una interfaz de usuario para acceder a mediciones históricas y en tiempo real. Con esto se pudo demostrar que la plataforma Intel Edison es viable para sistemas de telemetría de baja complejidad y requisitos específicos. Lo que permite una adquisición y transmisión eficiente de datos, aunque con limitaciones en escalabilidad. En la figura 4 se puede observar el panel frontal del programa desarrollado y se corrobora el funcionamiento de la recepción de datos.

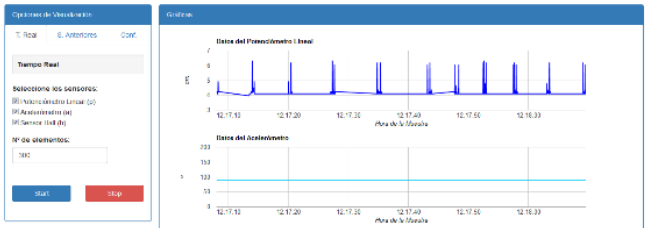


Figura 4. Panel frontal del software desarrollado para la telemetría de la plataforma embebida de (Gil, 2016).

(García y Suárez, 2008) desarrollaron un sistema didáctico de telemetría inalámbrica para el monitoreo de variables industriales (presión, temperatura y nivel), caracterizado por su configuración modular adaptada a las especificaciones de cada sensor. El estudio tuvo como objetivo principal implementar un prototipo funcional que integrara a un sistema de transmisión/recepción digital en banda UHF, un modulador-demodulador (MODEM) digital para el acondicionamiento de señales y un manual técnico para operación y mantenimiento. Con estas consideraciones, lograron obtener un alcance efectivo de 20 metros en condiciones de línea de vista sin obstáculos. Con esto, el prototipo demostró ser efectivo como herramienta pedagógica, aunque no optimizado para entornos industriales reales.

3. DESARROLLO

El desarrollo del prototipo se llevó a cabo en la Universidad Tecnológica Emiliano Zapata (UTEZ), Morelos, como iniciativa del Cuerpo Académico "Mantenimiento y Mecatrónica" (CA UTEZEM-CA-8) de la División de Mecánica Industrial, con el propósito de implementar una solución tecnológica para el monitoreo ambiental institucional. El sistema propuesto integra un sensor GY-302 para la medición cuantitativa de intensidad lumínica (en lux), con el fin de evaluar las condiciones de iluminación en las instalaciones universitarias. La arquitectura consta de:

- Un módulo de telemetría basado en sistemas embebidos
- Transmisión inalámbrica de datos mediante protocolos estandarizados
- Visualización en tiempo real mediante una interfaz desarrollada en LabVIEW® (National Instruments, 2023)
- Validación de mediciones utilizando un luxómetro certificado (EXTECH® EasyView 33, precisión ±3%) (Extech, 2025)

Para la comunicación entre sistemas, se utilizó el protocolo MODBUS TCP/IP debido a sus ventajas técnicas para sistemas de adquisición continua de datos, como lo es el manejo eficiente de flujos de datos en alta frecuencia, soporte nativo para mapeo de registros (Registros Holding 40001-49999), y baja latencia en transmisiones para monitoreo en tiempo real (Cevallos, 2007)

El subsistema de comunicación inalámbrica emplea un microcontrolador NodeMCU ESP8266 (Espressif, 2023), seleccionado debido a que cuenta con un transceptor WiFi integrado (IEEE 802.11 b/g/n). Tiene una arquitectura de procesador RISC de 32 bits (Tensilica Xtensa LX106 (Tesca, 2025)), con un bajo consumo energético (80-170 mA en operación). Para garantizar operación en campo, el sistema incorpora una batería recargable de polímero de litio (3.7V, 2000mAh) con circuito de gestión de potencia, permitiendo autonomía continua ≥8 horas entre recargas. Para la validación del sistema, el prototipo funcional fue sometido a pruebas de calibración y validación, cumpliendo con los requerimientos técnicos establecidos para aplicaciones de monitoreo ambiental en entornos educativos. El circuito electrónico, propuesto se puede ver en la figura 5.

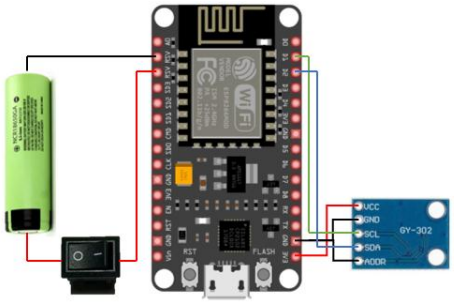


Figura 5. Circuito eléctrico propuesto.

3.1 Programación de la placa NodeMCU como Maestro MODBUS

Para su programación se usó el IDE de Arduino el cual es un entorno de programación con el que se pueden crear aplicaciones para las placas Arduino y otras adicionales como la placa NodeMCU (Jecrespom, 2016).

La implementación inició con la configuración del sensor de intensidad lumínica GY-302 basado en el chip BH1750, el cual opera mediante el protocolo I²C. Para el direccionamiento I²C, el pin ADDR del sensor permite seleccionar entre dos direcciones. De acuerdo a la figura 5, ADDR está conectado a GND lo que significa que la comunicación será al espacio de memoria 0x23. El sensor ofrece 3 diferentes resoluciones de medición que afectan tanto la precisión como el tiempo de respuesta y la selección del modo de operación se realiza mediante configuración software. Si se elige la opción de "High resolution Mode2", la resolución será de 0.5 Lx con un tiempo de medición de 120 ms. Si se escoge la opción de "High resolution Mode", la resolución será de 1 Lx con un tiempo de medición de 120 ms. Si es elegida el modo bajo, entonces la resolución será de 4 Lx con un tiempo de medición de 16 ms.

El sensor BH1750 presenta adicionalmente dos modos operativos fundamentales para la adquisición de datos: Modo CONTINUOUS, en donde se realizan mediciones periódicas de forma autónoma y mantiene activo el sensor de forma permanente. Y el modo Modo ONE_TIME, en donde se ejecuta una única medición por comando y desactiva automáticamente el sensor tras cada lectura esto con el fin de optimizar el consumo energético en aplicaciones de bajo poder. Tambien cuenta con funciones principales de control para iniciar la comunicación I²C, para reconfigurar dinámicamente los parámetros de medición y para ejecutar la lectura de intensidad lumínica. Estas opciones de configuración, permite una gestión flexible del sensor, adaptándose a diversos requerimientos de aplicación, desde sistemas de monitoreo continuo hasta dispositivos de bajo consumo con activación por evento.

Para la programación en el IDE de Arduino, se usó la biblioteca BH1750, ESP8266WIFI y ModbusIP_ESP8266, y se asignaron algunas variables para determinar la dirección de memoria del sensor BH1750, así como para la asignación de ciertos parámetros que se usaron con la comunicación con ModbusIP. En la sección de configuración, se agregó el tipo de lectura de datos, la función del servidor de Wifi en donde se agrega una SSID y la contraseña, una función de espera hasta que se conecte a la red; para la parte del sensor se agregara el tipo de inicio de la comunicación I2C, el tipo de medición y velocidad de lectura, para finalizar con crear el registro de Modbus con datos de entrada. Mientras que en el ciclo principal, se agregó una línea de código para mandar a llamar el registro de Modbus, como el tiempo de lectura y envió del registro de los datos del sensor, también se agregó la constante declarada de lightMeter y que los datos adquiridos sean de manera flotante a partir de la lectura de iluminación del sensor. En la figura 6, se puede observar el diagrama de flujo del programa desarrollado:

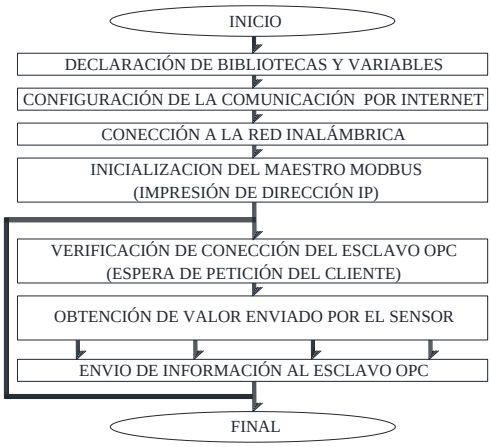


Figura 6. Diagrama de flujo del programa.

3.2 Programación del software LabVIEW como Esclavo MODBUS

Se implementó un servidor OPC (OLE for Process Control) para gestionar los datos telemétricos almacenados en los registros Modbus de la ESP8266. En esta arquitectura la tarjeta ESP8266 actúa como maestro Modbus, enviando mediciones obtenidas del sensor BH1750 y el servidor OPC funciona como esclavo, recibiendo y almacenando los datos. La configuración requirió de la identificación de la dirección IP de la ESP8266 (mostrada en el Monitor Serial del IDE Arduino) y de la asignación de la misma IP en las propiedades del dispositivo OPC, utilizando el protocolo Modbus TCP/IP. Para la creación de etiquetas y validación, se configuró con una address 30001, correspondiente al registro de entrada Modbus (Holding Register), esto permite la lectura de datos en LabVIEW mediante enlace directo. La verificación de Comunicación se realizó mediante el Quick Client del NI OPC Server (Ver figura 7)

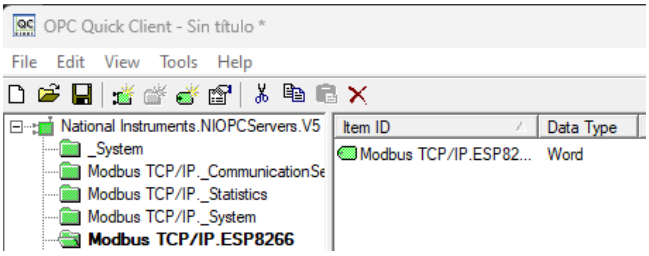


Figura 7. Quick Client del NI OPC Server.

Este enfoque permitió una integración eficiente entre el hardware de sensado y las capacidades de comunicación inalámbrica del microcontrolador, sentando las bases para un sistema de monitoreo remoto confiable.

Despues de ello, se llevó a cabo la elaboración del programa en LabVIEW, en donde se pueden visualizar los datos transmitidos desde la ESP8266 al OPC y, posteriormente, a LabVIEW. Para lograr esto se diseñó un VI (Interfaz Virtual) como se ilustra en la Figura 8.



Figura 8. Panel frontal y diagrama a bloques desarrollado.

Para tener el dato del OPC en el indicador se estará dirigiendo a propiedades y después en Enlace de datos/Data Binding, con la selección de DataSocket, un tipo de acceso/-access Type de solo lectura y en camino/path se seleccionará DSTP server para después solo buscar la dirección en donde se encuentra el dato a usar. Por consiguiente, se creó y diseño la interfaz para el panel frontal en donde se muestra el valor recibido por el OPC a través del Protocolo Modbus TCP/IP, además de tener un botón de paro para el programa. Tras completar las etapas anteriores, se procedió con el ensamblaje y montaje de los elementos junto con la estructura externa. Este proceso se basó en el diseño conceptual previamente establecido, que incluía los elementos delineados en el diagrama eléctrico. La Figura 9 presenta una visión completa del ensamblaje, mostrando cómo todos los componentes se integran en la estructura diseñada.

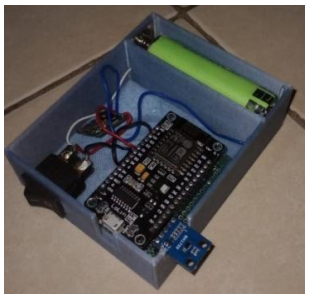


Figura 9. Ensamblaje del sistema.

4. RESULTADOS

4.1 Verificación del prototipo

Para la siguiente fase se observó que había una variación entre el sensor del GY-302 y el medidor EXTECH Easyview 33, por lo tanto, se planteó realizar una tabla con la comparación de varias de las medidas de ambos, para tener una base de datos recopilados en donde ambas medidas fueran lo más cercanas posibles y obtener después una ecuación que aproximaría los datos de ambos. Para realizar la tabla se tomó muestras de las medidas dadas por el sensor y el medidor; por lo consiguiente se tomó en cuenta tener un rango de medidas, donde se comenzó con la lectura de ambas a partir de las 8:00 am hasta las 5:00 pm y a partir de ellos cada 5 minutos se registraba un dato, mediante esto se obtuvo una tabla de comparación de datos con un numero de 108 muestras en total, estos datos se muestran en la figura 10 donde se encuentran registradas en el tiempo de muestreo establecido anteriormente.

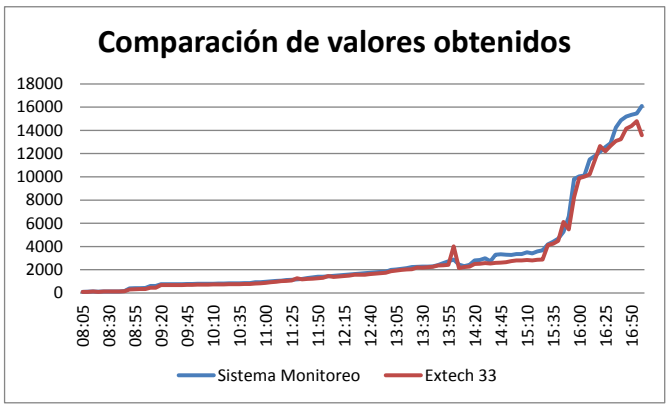


Figura 10. Comparación de datos obtenidos entre el sistema de telemetría y el medidor Extech® 33.

Al tener la tabla de los datos se pasó con la búsqueda de una forma en que ambos datos tengan la mayor similitud posible, para ello se planteó la idea de hacer uso de una aproximación polinomial, y esto se hizo con la ayuda de herramientas de Excel. Para obtener la ecuación primero se selección uno de los datos obtenidos del medidor, después se agregó una línea de tensión, con ello seleccionar la opción de polinomio y así saber cuál será el tipo de polinomio a usar para obtener la ecuación; por lo tanto, se fue modificando hasta tener una línea de tensión donde se adaptará lo más posible a los datos del medidor, así es como se obtiene la ecuación de los datos. En (1) se puede ver la aproximación polinomial obtenida.

$$y = -4E-17x^5 + 1E-14x^4 - 7E-09x^3 + 1E-05x^2 + 0.9282x - 8.8158 \quad (1)$$

Al tener la ecuación se consideró en modificar en uno de los programas realizados durante pruebas anteriores, al final se decidió que la mejor manera era modificar el programa de LabVIEW en Diagrama de bloques dado que se podía agregar una función extra el cual ayudaría de mejor forma y fácil de realizar la modificación sin tener que modificar demasiado el programa base. La función utilizada fue Formula Node encontrada en función de estructura, para hacer uso de ella se debe agregar una entrada y una salida, este depende de los datos de la ecuación que se requieran, después solo se conecta lo requerido. En la figura 11, se muestra la modificación del diagrama a bloques de LabVIEW®.

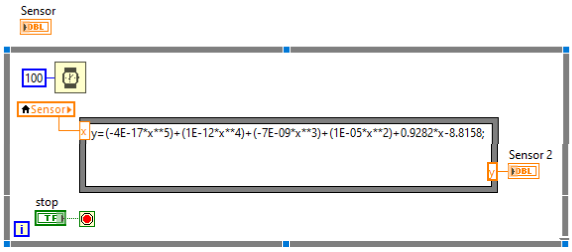


Figura 11. Diagrama a bloques modificado con la ecuación polinomial..

Como último paso de la verificación con el medidor, se realizó una prueba con ya con la modificación realizada en donde la ESP8266 se conectaba de forma wifi al OPC y es por último a LabVIEW®. En la Figura 12 se muestra la prueba realizada con la última modificación, así mismo se puede observar que hay una diferencia de variable de. 2.67 aproximadamente en esta prueba.

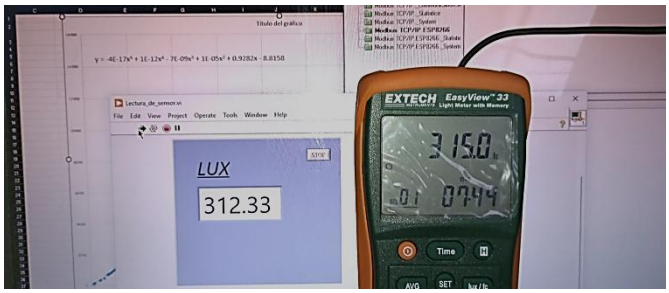


Figura 12. Prueba de verificación.

5. CONCLUSIONES

El prototipo cumplió satisfactoriamente con el objetivo general de desarrollar un sistema de monitoreo remoto de intensidad lumínica mediante el sensor GY-302, sistemas embebidos y comunicación inalámbrica, validando su funcionalidad en las instalaciones de la UTEZ. Los resultados obtenidos demuestran que: (1) Se logró una comunicación efectiva entre el sensor GY-302, la placa ESP8266 (vía I²C) y el protocolo Modbus TCP/IP, permitiendo la transmisión inalámbrica de datos. (2) La configuración del servidor OPC y su vinculación con LabVIEW® facilitaron la visualización y análisis de los datos en tiempo real. (3) Las mediciones del sistema mostraron concordancia con las obtenidas por el luxómetro EXTECH EasyView 33, confirmando la precisión del prototipo (±3% de margen de error). (4) La arquitectura implementada garantizó estabilidad en la adquisición de datos, incluso en condiciones variables de iluminación. (5) La circuitería electrónica y la carcasa de protección cumplieron con los requisitos de funcionalidad y estética, aunque se identificaron oportunidades de mejora en el diseño mecánico (ver recomendaciones).

Como trabajo futuro se pretende rediseñar la carcasa para homogeneizar sus dimensiones con las del medidor de referencia, asegurando un acoplamiento preciso y protección adecuada de los componentes. Se pretende también realizar pruebas en un mayor rango de condiciones ambientales (ej.: diferentes horarios, ubicaciones geográficas) para mejorar la robustez del modelo de calibración. Así como implementar algoritmos de filtrado digital para reducir fluctuaciones en las lecturas. Tambien se podría incorporar redundancia en la comunicación para aumentar la confiabilidad en entornos industriales. Ademas de explorar el uso de OPC UA (en lugar de OPC DA) para mayor seguridad y compatibilidad con estándares Industry 4.0.

Este proyecto no solo alcanzó sus metas técnicas, sino que también demostró la viabilidad de usar sistemas embebidos de bajo costo (ESP8266) en aplicaciones de telemetría industrial y sentó las bases para futuros desarrollos en monitoreo ambiental automatizado dentro de la UTEZ.

REFERENCIAS

Automation Networks. (2021). *Protocolo MODBUS*. Disponible en: https://automation-networks.es/glossary/modbus-tcpip (Accedido Abril de 2024)

Boubekri, M., Cheung, I., Reid, K., Wang, C., & Zee, P. (2014). "Impact of windows and daylight exposure on overall health and sleep quality of office workers: a case-control pilot study". *Journal of clinical sleep medicine10(6)*, 603-614. DOI: 10.5664/jcsm.3780.

Cevallos, W. (2007). *Diseño y construcción fr un sistema didáctico de comunicación industrialbajo el protocolo MODBUS.* Tesis de Ingeniería. Escuela Politecnica Nacional,.

Espressif. (2023). *ESP8266 A cost-effective and highly integrated Wi-Fi MCU for IoT applications*. Disponible en: https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266 (Accedido: Marzo de 2024)

Extech. (2025). *EXTECH EA33: EasyView™ Light Meter with Memory*. Disponible en: https://www.extech-online.com/index.php?main_page=product_info&cPath=78_23&products_id=214 (Accedido: Marzo de 2024)

García, M., & Suárez, D. (2008). *Módulo de telemetría inalámbrico para el monitoreo de señales de presión, temperatura y nivel.* Tesis de Ingeniería. Universidad Pontificia Bolivaria Facultad de Ingeniería Electrónica Bucaramanga.

Gil, A. (2016). *Desarrollo de un sistema de telemetría basado en la plataforma Intel Edison.* Tesis de Ingenieria, Escuela Tecnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación Universidad Politécnica de Cartegena.

Heschong, L., Wright, R., & Okura, S. (2002). "Daylighting Impacts on Human Performance in School". *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 101-114. DOI: 10.1080/00994480.2002.10748396

Jecrespom, J. (2016). *IDE Arduino*. Disponible en https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/12/11/ide-arduino/ (Accedido: Abril de 2025)

National Instruments. (2023). *¿Qué es LabVIEW?* Disponible en: https://www.ni.com/es-mx/shop/labview.html (Accedido: Abril 2025)

SENSORICX. (2024). *OPC SERVER. Todo lo que necesitas saber.* Disponible en: https://sensoricx.com/control-logico-programable-plc/opc-server-todo-lo-que-necesitas-saber/ (Accedido: Abril de 2024)

Silva, J. (2017). *Sistema de telemetría y representación de datos para un monoplaza de competición.* Tesis de Ingeniería. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.

Tesca. (2025). *Item Name - ESP8266 NodeMCU.* New Delhi, India: TESCA TECHNOLOGIES PVT. LTD.

Unit Electronics. (2024). *Gy-302 Módulo Sensor De Intensidad Luminosa Bh1750*. Disponible en: https://uelectronics.com/producto/gy-302-modulo-sensor-de-intensidad-luminosa-bh1750/ (Accedido: Abril de 2024)

Veliz, L. (2022). *LabVIEW entorno gráfico de programación*. Disponible en: https://dokumen.tips/documents/labview-entorno-grafico-de-programacionpdf.html?page=1 (Accedido: Abril de 2024)

Aerothermodynamic Design Of An Axial Compressor Developed With The Free Vortex Methodology

Gonzalez-Neria, Israel *, Arreola Robles, Susana M. *, Contreras Nuñez, Erika *, Alonzo-Garcia, Alejandro **, Martínez-Delgadillo, Sergio A. *, Huerta Chávez, Oliver M. ******

**Universidad Tecnológica de Nezahualcóyotl, Circuito Rey Nezahualcóyotl, Manzana 010, Benito Juárez, Ciudad Nezahualcóyotl, 57000, México (e-mail: israel.gonzalezne@utn.edu.mx).*

*** CONACyT-Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Nuevo León, Avenida Eloy Cavazos No. 2001, Colonia Tolteca, Ciudad Guadalupe, 67170, Nuevo Leon.*

**** Universidad Autónoma Metropolitana, Avenida San Pablo 180, Colonia Reynosa Tamaulipas, 02200, Ciudad de México.*

***** Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, Av. Ticomán 600, Col. San José Ticomán, Mexico City 07340, Mexico*

Abstract: The design of an axial compressor presents a significant challenge activity. This complexity stems from the numerous variables involved in the design process, which have the potential to influence the performance of the resulting compressor. The present study focuses on the selection of rotational speed, axial velocity and altitude for the design point for an axial compressor. In light of these considerations, two configurations were identified: one exhibiting maximum efficiency and another demonstrating maximum pressure ratio. A design approach based on radial equilibrium theory is used, which is often coupled with tangential velocity distribution such as exponential, forced vortex, half vortex, or free vortex. Notwithstanding, the aforementioned developments occurred a considerable time ago and the prevalence of computational fluid dynamics software in the industry, they continue to be a fundamental component in the initial phase of the design cycle. In this instance, the free vortex methodology was selected for its expeditious and efficient implementation. The objective is to obtain the optimum performance geometry for a seven-stage axial compressor, which will serve as the baseline configuration for further analysis.

Keywords: axial compressor, free vortex, radial equilibrium, aerothermodynamic.

1. INTRODUCTION

The axial compressor design has historically been a subject of interest in the aeronautical industry, particularly among engine manufacturers. This is due to the fact that the utilization of the centrifugal compressor is constrained by its inability to accommodate high mass flow, thereby relegating the axial compressor to the exclusive domain of most airplanes as the sole viable option in the present context (Charles E. O. et al, 2002, Glencoe, 1995).

Following the initial designs intended exclusively for military aircraft, the performance of the axial compressor became a paramount concern for the designers. This was due to the necessity of ensuring the reliability and profitability of the engine for its application in civil aviation. Consequently, there has been a prevailing emphasis on identifying the optimal configuration, thereby ensuring acceptable performance within the operational range. In addition to these considerations, the future demands of the aircraft industry necessitate a fuel burn reduction of up to 50%. This reduction is expected to be achieved to a great extent by the engines themselves (Waschka W. et al, 2005).

On the other hand, the increased utilization of gas turbines in the power generation industry has enabled manufacturers to enhance their efficiency and utilize their technological advancements in the aeronautical industry. This has led to the emergence of aircraft-derived gas turbines, which have significant potential in the field of power generation. The aircraft engines basically were adapted with power turbines to transform the kinetic energy of exhaust gases into electricity energy. This adaptation plays a crucial role in enhancing the efficiency and performance of gas turbines in the field of power generation. (Horlock J. H., 2003).

According to the relevant literature, there are several methodologies employed at the inception of compressor design, including the free vortex, the forced vortex, the constant reaction, and the exponential, among others. In the contemporary context, these methodologies continue to be employed during the early stages of the design process, with the objective of investigating the configurations of the compressor and identifying the baseline configuration. (Bruna D. et al., 2007, Horlock J. H. et al., 2005, Xiaoqing Q. et al., 2008, Olivier L. et al., 2008, Larosiliere L. M. et al., 2002, Gordon C. O., 1998, Jack D. M. et al., 2002).

The present study implements a design approach based on radial equilibrium theory coupled with tangential velocity distribution known as free vortex. The objective is to obtain the geometry for two axial compressor configurations. The

first one seeks highest efficiency, and the second one seeks highest pressure ratio over all other parameters, respectively.

2. THE FREE VORTEX METHODOLOGY

Given the compressor's characteristic low hub-tip ratio in the initial stage and its successive rise in the subsequent stages, the annulus's geometry is prone to tapering. This results in the presence of a radial component of velocity. Concurrently, the pressure forces and the inertia forces generate a radial movement of the fluid due to an imbalance in these forces.

It is imperative to conceptualize the flow as three-dimensional to accurately analyze the system's behavior. The free vortex methodology is based on the radial equilibrium equation. This equation considers the equilibrium between pressure forces and inertial forces during the flow of the fluid through the compressor.

In order to obtain the radial equilibrium, it must be assumed that a fluid element is subject to three inertial forces. The first of these is the centripetal force associated with the circumferential flow "Ec. 1", the second is the force associated with the flow along the curved streamline "Ec. 2", and the third is the force associated with the acceleration along the streamline "Ec. 3" (HIH Saravanamutto et al, 2013).

$$F_1 = (\rho r dr d\theta)\frac{C_w^2}{r} \tag{1}$$

$$F_2 = (\rho r dr d\theta)\frac{C_s^2}{r_s}\cos\alpha_s \tag{2}$$

$$F_3 = (\rho r dr d\theta)\frac{dC_s}{dt}\sin\alpha_s \tag{3}$$

The summation of equations 1, 2, and 3 yields the total inertia force, expressed as follows:

$$F_i = \rho r dr d\theta\left(\frac{C_w^2}{r} + \frac{c_s^2}{r_s}\cos\alpha_s + \frac{dC_s}{dt}\sin\alpha_s\right) \tag{4}$$

Subsequently, the pressure force that engenders this inertia force is expressed as follows:

$$F_p = (p+dp)(r+dr)d\theta - prd\theta - 2\left(p+\frac{dp}{2}\right)dr\frac{d\theta}{2} \tag{5}$$

Upon equating 4 and 5 and subsequently performing the necessary algebraic operations, the following equation is obtained:

$$\frac{dp}{\rho dr} = \frac{C_w^2}{r} \tag{6}$$

The equation 6 is referred to as the radial equilibrium equation (HIH Saravanamutto et al, 2013, Gordon C. O., 1998, Jack D. M. et al., 2002). When the variation of enthalpy with radius and the Gibbs equation are introduced in "Ec. 6" and subsequent algebraic procedures are performed, the following result is obtained:

$$\frac{dh_0}{dr} = T\frac{ds}{dr} + C_a\frac{dC_a}{dr} + C_w\frac{dC_w}{dr} + \frac{C_w^2}{r} \tag{7}$$

The equation 7 is referred to as the vortex energy equation. The following considerations are made: 1) the stagnation enthalpy is uniform across the annulus, 2) the work is constant in the radial direction, and 3) the axial velocity is maintained constant across the annulus. Subsequently, "Ec. 7" reduces to the "Ec. 6", which is recognized as the radial equilibrium equation. Upon introducing the variation of enthalpy with radius and the Gibbs equation into "Ec. 6" and subsequent algebraic manipulation, the following equation is obtained:

$$\frac{dC_w}{C_w} = -\frac{dr}{r} \tag{8}$$

The integration of "Ec. 8" yields

$$C_w r = constant \tag{9}$$

Equation 9 demonstrates that the whirl velocity is inversely proportional to the radius. This equation is referred to as the free vortex condition (HIH Saravanamutto et al, 2013, Gordon C. O., 1998, Jack D. M. et al., 2002), which was incorporated into the design under consideration.

3. VARIATION OF EFFICIENCY AND PRESSURE RATIO

In the present study, the values of efficiency and the pressure ratio were calculated considering a variation of the hub-tip radio, the rotational speeds, the altitude, and the axial velocity. The only purpose of this was to reduce the number of variables for the analysis, which was used to select the design point for the baseline configuration.

In general, the first step involved calculating the tip and root radius values for the first stage blade, using the continuity equation and expressing the area in terms of the radios, as derived in "Ec. 10".

$$r_t^2 = \frac{\dot{m}}{\pi C_a[1-(r_r/r_t)^2]} \tag{10}$$

Subsequently, the increment of the stagnation temperature and the increase of the pressure in each stage were determined using "Ec. 11" and "Ec. 12", respectively.

$$\Delta T_0 = \left(\frac{\lambda U C_a(\tan\beta_1 - \tan\beta_2)}{C_p}\right) \quad (11)$$

$$\frac{P_{0out}}{P_{oin}} = \left(1 + \frac{\eta_{pol}\Delta T_0}{T_{oin}}\right)^{k/k-1} \quad (12)$$

At this stage, the air and blade angles at the mean radius were calculated using relations from the velocity triangle, and the variation of these along the blade span was obtained using the free vortex condition, "Ec. 9".

Subsequently, the characteristics of the airfoil were determined using a methodology analogous to that employed for the blades in a cascade (Jack D. M. et al., 2002, Jack D. M., 2005). The number of blades and the deviation angle were calculated with "Ec. 13" and "Ec. 14", respectively.

$$n = \frac{2\pi r}{s} \quad (13)$$

$$\delta = \sqrt{s/c}\left[0.23\left(\frac{2a}{c}\right)^2 + 0.1\left(\frac{\beta_2}{50}\right)\right] \quad (14)$$

The subsequent phase entailed the calculation of stage performance. The efficiency of the blade was calculated using "Ec. 15".

$$\eta_b = 1 - \frac{\bar{w}/0.5\rho V^2}{\Delta P_{th}/0.5V^2} \quad (15)$$

In order to ascertain the efficiency of the stage, it was necessary to combine "Ec. 15" with the degree of reaction.

$$\eta_s = \Lambda\eta_{b_{rotor}} + (1-\Lambda)\eta_{b_{estator}} \quad (16)$$

Subsequently, the pressure ratio is calculated using the value of the stage efficiency, as indicated in "Ec. 17".

$$\left(\frac{P_{0out}}{P_{oin}}\right)_s = \left(1 + \frac{\eta_s \Delta T_{0_s}}{T_{oin}}\right)^{k/k-1} \quad (17)$$

To calculate the overall pressure ratio, the ratio of each stage was first calculated. Subsequently, the product of these stages yielded the compressor pressure ratio, from which the compressor isentropic temperature rise and consequently the overall efficiency, was calculated.

In accordance with the aforementioned procedure, the compressor efficiency and pressure ratio were evaluated for five hub-tip ratios (0.4, 0.5, 0.6, 0.7 and 0.8), four rotational speed (10,000 rpm, 12,500 rpm, 15,000 rpm and 17,500 rpm), three altitudes (sea level, 5,000 m and 10,000 m) and nine axial velocities at the inlet compressor (100 m/s, 120 m/s, 140 m/s, 160 m/s, 180 m/s, 200 m/s, 220 m/s, 240 m/s and 260 m/s).

The selection of the rotational speed and altitude was made based on the results of the compressor performance, with the objective of maximizing efficiency and pressure ratio for each value of the hub-tip ratio. The results obtained with this criterion are illustrated in Figure 1.

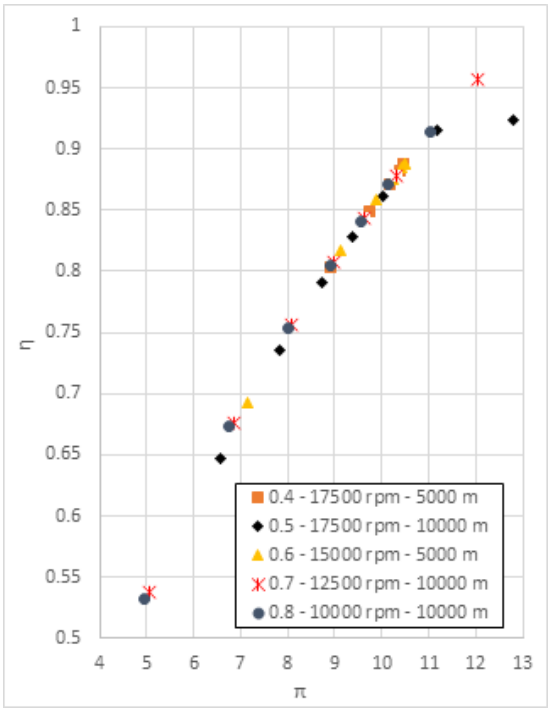


Figure 1. Compression ratio vs efficiency.

In this instance, the maximum efficiency and pressure ratio for a hub-tip ratio of 0.4 were obtained at a rotational speed of 17,500 rpm and an altitude of 5,000 m. For a hub-tip ratio of 0.5, the optimal parameters were determined to be 17,500 rpm and 10,000 m. For a hub-tip ratio of 0.6, the ideal conditions were identified as 15,000 rpm and 5,000 m. In the case of a hub-tip ratio of 0.7, the optimal parameters were found to be 12,500 rpm and 10,000 m. For a hub-tip ratio of 0.8, the ideal conditions were determined to be 10,000 rpm and 10,000 m.

Pursuant to the findings presented in Figure 1, two operating points were identified for consideration. The first point of interest was the one demonstrating highest efficiency (a hub-tip ratio of 0.7, a rotational speed of 12,500 rpm, an altitude of 10,000 m and an axial velocity of 220 m/s). The second point of interest was that with the highest pressure ratio (a hub-tip ratio of 0.5, a rotational speed of 17,500 rpm, an altitude of 10,000 m and an axial velocity of 240 m/s).

The geometry of the two configurations, highest efficiency and pressure ratio, is illustrated in Figures 2 and 3, respectively. It is noteworthy that the mass flow was maintained at a constant rate of 20 kilograms per second, and the analysis considers a seven-stage axial compressor for all configurations. This approach was adopted to establish a foundation for performance comparison.



Figure 2. Compressor with highest efficiency.



Figure 3. Compressor with highest pressure.

Tables 1 and 2 present the principal characteristics of the first-stage rotor blades for the configuration with highest efficiency and pressure ratio, respectively. This facilitates a comparative analysis between the two configurations. Showing that for the configuration with highest efficiency, the blade tip radio and the number of blades are greater than for the highest pressure ratio. On the other hand, the Mach number, the blade angle at the tip and the chord are lower for this configuration.

Table 1. Characteristics of the first-stage rotor, configuration with highest efficiency

Tip radio	0.427 m
Root radio	0.299 m
Mach number at tip	2.127
Mach number at root	1.589
Blade angle at tip	68.539°
Blade angle at root	60.682°
Chord at tip	0.050 m
Chord at root	0.035 m
Number of blades	44

Table 2. Characteristics of the first-stage rotor, configuration with the highest pressure ratio

Tip radio	0.347 m
Root radio	0.173 m
Mach number at tip	2.435
Mach number at root	1.426
Blade angle at tip	69.350°
Blade angle at root	52.994°
Chord at tip	0.075 m
Chord at root	0.037 m
Number of blades	24

4. CONCLUSIONS

In this paper the design of 513 axial compressor configurations has been obtained using the free vortex methodology. This shows the arduous work involved in this activity, even when the variables and their values were limited to a few. The objective of the design was to obtain a configuration with the highest efficiency (hub-tip ratio of 0.7, speed of 12,500 rpm, altitude of 10,000 m and axial velocity of 220 m/s) and one with the highest pressure ratio (hub-tip ratio of 0.5, speed of 17,500 rpm, altitude of 10,000 m and axial velocity of 240 m/s). For all configurations, the compressor was assumed to have seven stages and a mass flow of 20 kg/s, with the aim of comparing their characteristics in a direct way. The methodology used allowed us to obtain all the data needed to create a 3D design using CAD software, as shown in the figures. On the other hand, the paper illustrates the significance of incorporating the various parameters that have the potential to influence the pressure ratio and the efficiency of the compressor. In this study, two baseline configurations were selected for future numerical simulations to assess their feasibility. As presented in tables 1 and 2, the Mach number for both configurations exhibit supersonic velocities throughout the rotor blade, which may impede the achievement of the design objective. This underscores the necessity for implementing the proposed methodology in the early design stages, necessitating validation with a more robust tool, such as computational fluid dynamics software or experimental measurements. This first step in axial compressor design will contribute to the development of an optimal gas turbine for the aeronautical or power generation industry, which will be adapted to the environmental conditions presented in Mexico with the aim of increasing its energy efficiency.

REFERENCES

Bruna D. and Cravero C. (2007). A CDF suite for design and performance prediction of single and multistage axial flow compressors. 8th International symposium on experimental and computational aerothermodynamics of internal flows, Lyon.

Charles E. Otis and Peter A. Vosbury. (2002). Aircraft – Gas turbine – Powerplants, Jeppesen.

Glencoe. (1995). Aircraft gas turbine engine technology. McGraw-Hill Education.

Gordon C. Oates. (1998). Aerothermodynamics of gas turbine and rocket propulsion. American Institute of Aeronautics and Astronautics education series.

HIH Saravanamutto, H. Cohen, GFC Rogers. (2013). Gas turbine theory. Pearson Education, Ltd.

Horlock J. H. (2003). Advanced gas turbine cycles. Elsevier Science Ltd

Horlock J. H. and Denton. (2005). A Review of some early design practice using computational fluid dynamics and a current perspective. *Journal of Turbomachinery*, vol. 127, pp. 5-13.

Jack D. Mattingly. (2005). Elements of gas turbine propulsion. McGraw-Hill Education.

Jack D. Mattingly, William H. Heiser and David T. Pratt. (2002). Aircraft engine design. American Institute of Aeronautics and Astronautics education series.

Larosiliere L. M., Wood J. R., Hathaway M. D., Medd A. J. and Dang T. Q. (2002). Aerodynamic design study of advanced multistage axial compressor. NASA/TP-2002-211568, ARL-TR2859.

Olivier Léonard and Olivier Adam. (2008) A quasi-one-dimensional cfd model for multistage turbomachines. *Journal of Thermal Science*, vol. 17, pp. 7-20.

Xiaoqing Q., Songtao W., Guotai F. and Zhongqi W. (2008). Aerodynamic design and analysis of a low-reaction axial compressor stage. *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 21, pp. 1-7.

Waschka W., Rüd K., Humhauser W., Metscher M. and Michel A. (2005). ATFI-HDV: Design of a new 7 stage innovative compressor for 10 – 18 klbf thrust. 17th International Symposium on Air Breathing Engines, Munich.

Apéndice A. Nomenclature

δ is the deviation angle.

η is the efficiency.

λ is the work-done factor.

ρ is the density.

$\dot{m}$ is the mass flow.

$c$is the chord.

C_a is the axial velocity.

C_p is the specific heat at constant pressure.

C_s is the velocity along the streamline.

C_w is the whirl velocity.

F_1 is the centripetal force.

F_2 is the force associated with the flow along the curved streamline.

F_3 is the force associated with the acceleration along the streamline.

F_i the total inertia force.

F_p the pressure force.

h is the enthalpy.

k is the specific heat ratio.

n is the number of blades.

p is the pressure.

r is the radio.

s is the entropy; blade spacing.

T is the temperature.

U is the blade tangential velocity.

Analysis of the electrical of the Gerencia de Control Regional Oriental (GCROri)

Alejandro Alvarez Organista*, Mónica Borunda Pacheco, Carlos Daniel García Beltrán***, Manuel Adam Medina****.**

**Posgrado del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 624900 Cuernavaca, Morelos. (e- mail: m24ce067@cenidet.tecnm.mx)*

***Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - TECNM, CONAHCYT, Facultad de Ciencias-UNAM (e-mail: monica.bp@cenidet.tecnm.mx)*

**** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 624900 Cuernavaca, Morelos. (e- mail: carlos.gb@cenidet.tecnm.mx, manuel.am@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: Given the urgent need to reduce greenhouse gas emissions, it is imperative to prioritize clean electricity generation. To achieve this, it is essential to understand the hour-by-hour demand profile in order to allocate energy resources—both renewable and fossil-based—according to their availability. However, electricity demand is strongly influenced by local weather conditions. In general, the eastern region of Mexico experiences two main climatic seasons: the rainy season and the dry season. Additionally, energy demand also varies depending on the day of the week, showing different patterns on weekdays and weekends. This study presents an analysis of the hourly daily electricity demand for the Gerencia de Control Regional Oriental (GCROri) of CENACE. A representative hourly demand profile is determined for a weekday and a weekend day during both the rainy and dry seasons.

Keywords: Electric demand, Hourly profile, Climatic seasonality, CENACE, Duck curve, Renewable energy, Energy consumption, demand profile.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el mundo enfrenta una crisis energética que está estrechamente relacionada con el cambio climático y la degradación ambiental. Las fuentes tradicionales de energía, basadas en combustibles fósiles, son limitadas y son responsables de una gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global.

Ante esta situación, la adopción de energías limpias, como la solar, se ha vuelto esencial para avanzar hacia un futuro más sostenible. Entre las tecnologías renovables, como los sistemas de generación eólica e hidráulica que destacan más en el umbral climático en la que se encuentra la región abarcada. Sin embargo, se están considerando los diferentes escenarios climáticos en las que se considera la estacionalidad de temporada de lluvias y de no lluvias. Es crucial finalmente, el agua precipitable por la cantidad de vapor de agua en la atmosfera, lo cual influye en las condiciones meteorológicas como la cobertura nubosa y las tormentas, que a su vez afecta tanto la disponibilidad de energía solar (CENACE, 2024).

Este artículo se obtendrán los perfiles de consumo energético representativos de la región que abarca la gerencia regional de control oriental (GCROri), tomando en consideración Los factores cruciales para mejorar la precisión de la demanda energética en condiciones que impactan directamente en los patrones de consumo de electricidad.

La gerencia de control regional oriental (GCROri) cuanta con las siguientes características:

- Extensión de 370,000 km^2
- 12 millones de Usuarios.
- Consumo energético anual de 55,000 Gwh
- Pico diario siempre entre las 20:00 y las 22:00 hrs primavera o verano en el mismo periodo.
- Ambas costas (Golfo de México y Océano Pacifico y huracanes cada año.

2. METODOLOGÍA

En este artículo se determinará los perfiles representativos de la demanda eléctrica en la región de la gerencia de control regional Oriental del CENACE, durante los dos escenarios estacionales en temporada de lluvia y de no lluvia, con el fin de demostrar analíticamente los perfiles de generación.

El enfoque metodológico considera dos restricciones analíticas: estacionalidad climática (lluvia vs. no lluvia) y tipo de día (Weekday vs. Weekend), con el objetivo de caracterizar patrones diferenciados de consumo eléctrico y generar perfiles representativos de la demanda horaria en un día cada estación de la región (CENACE, 2024).

2.1 Recolección de datos

Para la elaboración de perfiles representativos de demanda energética en la región correspondiente a la Gerencia de Control Regional Oriente (GCROri) del CENACE, se realizó la recopilación de datos históricos con resolución horaria provenientes de fuentes oficiales, principalmente del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), a través de su portal institucional y bases de datos públicas. El periodo de análisis considerado (2024), con el objetivo de capturar patrones estacionales robustos tanto para la temporada de lluvia (de mayo a octubre) como para la temporada de no lluvia (de noviembre a abril). Los datos fueron obtenidos del CENACE, y posteriormente unificados en una sola base de datos estructurada. Cada registro contiene la fecha, la hora del día y el valor de la demanda eléctrica expresado en Mega watts-hora (CENACE, 2024). Para garantizar la uniformidad de la información, se estandarizaron las unidades de medida y se validó la integridad temporal de los datos, verificando la existencia de 24 registros por día. Esta base de datos constituye el insumo principal para el análisis estadístico y la generación de perfiles de carga que serán utilizados para su estudio (Farsi et al. 2021).

2.2 Detección y tratamiento de valores

En esta etapa del preprocesamiento se verificó la integridad de los datos recopilados, confirmando la presencia de registros completos con resolución horaria para cada día del periodo de estudio. No se identificaron valores faltantes en el conjunto de datos, No obstante, con el fin de mejorar la representatividad de los perfiles de demanda, se implementó una clasificación de los días en dos categorías: días laborales (weekday) y fines de semana (weekend). Esta distinción responde a los diferentes patrones de consumo energético observados en función de la actividad económica y social. Para ello, se empleó el índice del día de la semana derivado de la variable de fecha, asignando como días laborales aquellos comprendidos de lunes a viernes, y como fines de semana los días sábado y domingo. Esta segmentación permite un análisis más preciso de los perfiles de carga y contribuye a una mejor caracterización del comportamiento energético según el tipo de día (De Felice et al. 2011).

2.3 Control estadístico a través de la segmentación operativa

En lugar de aplicar técnicas explícitas de detección o corrección de valores atípicos, este estudio adopta un enfoque metodológico que garantiza la calidad estadística del conjunto de datos a través de una segmentación operativa previa. Esta decisión metodológica se fundamenta en la premisa de que gran parte de la variabilidad observada en los registros horarios de demanda eléctrica responde a factores estructurales previsibles, principalmente el tipo de día (laboral o fin de semana) y la estacionalidad climática (lluvia o no lluvia).

Al dividir el conjunto de datos en cuatro subconjuntos homogéneos —Weekday en temporada de lluvia, Weekend en temporada de lluvia, Weekday en temporada de no lluvia y Weekend en temporada de no lluvia— se logró aislar las dinámicas particulares de cada contexto operativo, lo cual permitió un análisis más representativo sin la necesidad de alterar la estructura original de la información.

Esta segmentación cumple una doble función: por un lado, controla la dispersión interna de los datos al evitar la mezcla de comportamientos heterogéneos; por otro lado, conserva los valores extremos dentro de su entorno natural, permitiendo su análisis contextualizado sin clasificarlos automáticamente como errores o anomalías. De esta manera, se garantiza la fidelidad del perfil horario promedio y se mantiene la trazabilidad de fenómenos reales como aumentos abruptos por condiciones meteorológicas extremas, eventos sociales o interrupciones parciales en el servicio (De Felice et al. 2011).

Este enfoque preserva la integridad temporal de la serie original y permite una interpretación más fiel de la variabilidad inherente al comportamiento de la demanda eléctrica, asegurando la validez de los perfiles obtenidos sin recurrir a transformaciones que pudieran comprometer su aplicabilidad en entornos operativos reales.

2.4 Cálculo de perfiles representativos

El cálculo de perfiles representativos tiene como propósito sintetizar el comportamiento típico de la demanda eléctrica en distintos contextos operativos, permitiendo así identificar patrones horarios característicos según la temporada climática (lluvia o no lluvia) y el tipo de día (Weekday o Weekend). Este análisis es fundamental para establecer referencias confiables en el estudio de la operación del sistema eléctrico, la integración de energías renovables y la planificación de capacidad.

2.4.1 Análisis Horario Segmentado de la Demanda

El perfil de carga eléctrica diaria presenta una marcada variabilidad intradía influenciada por los hábitos de consumo de los usuarios. A partir del análisis de series temporales de demanda eléctrica, se identifican cuatro intervalos clave en el comportamiento típico: durante

la madrugada (23:00–04:00) se observa una tendencia decreciente atribuida a la inactividad de empresas y hogares; en

Mañana (04:00–09:00) la carga comienza a incrementarse conforme se retoman las actividades cotidianas;

Mediodía (09:00–17:00) muestra un comportamiento volátil pero relativamente estable debido al horario laboral; y en

Noche (17:00–23:00) se alcanza el consumo máximo seguido de una caída abrupta al finalizar las actividades diarias.

Estas fluctuaciones reflejan patrones estacionales perceptibles, particularmente en invierno, donde se identifica una disminución más pronunciada durante las horas matutinas y una caída acelerada por la tarde. Dichos patrones de variabilidad temporal representan un desafío importante para

los modelos de predicción de carga, justificando el uso de enfoques adaptativos y la selección condicional de modelos de aprendizaje profundo que logren capturar con mayor precisión las dinámicas no lineales y no estacionarias del sistema eléctrico Farsi et al. (2021).

Con el objetivo de caracterizar adecuadamente esta variabilidad, se segmentó la base de datos en cuatro subconjuntos: (i) días laborables lluviosos, (ii) fines de semana lluviosos, (iii) días laborables secos, y (iv) fines de semana secos. Para cada grupo, se calculó el perfil horario promedio agrupando todos los registros de demanda por hora del día (de 0 a 24 horas) y obteniendo el valor medio de la demanda registrada en cada intervalo. Esta desagregación permite identificar diferencias estructurales en los perfiles de carga, fortaleciendo el análisis contextual de los modelos predictivos.

Una vez segmentada la base de datos en los cuatro subconjuntos definidos previamente —(i) Weekday lluvioso, (ii) Weekend lluvioso, (iii) Weekday seco, y (iv) Weekend seco—, se procedió a calcular el perfil horario promedio para cada uno. Este cálculo consiste en agrupar todos los registros de demanda por la hora del día (de 0 a 24 horas) dentro de cada subconjunto, y obtener el promedio de la demanda registrada en ese horario específico.

En términos formales se expresa de la siguiente manera

$$D_{m_k_j} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} D_{m_k_j_i} \ ,$$

donde D se refiere a la demanda, m es el mes en cuestión, que puede ir desde enero hasta diciembre y se etiqueta del 1 al 12, k corresponde al tipo de día bajo estudio, es decir WeekDay o WeekEnd, j se refiere a la hora del día y finalmente i es el índice de la sumatoria referente a la cantidad del tipo de días , siendo n el número total del tipo de días en el mes, i=1,…,n.

2.4.2 Obtención y análisis de la curva de pato.

Para obtener y analizar la curva de pato de la demanda eléctrica en la región de la Gerencia de Control Regional Oriental (GRCOri) del CENACE, se aplicó una metodología estructurada en siete etapas, considerando como restricciones principales la estacionalidad climática y la diferenciación entre días laborables (Weekday) y fines de semana (Weekend). En primer lugar, se recopilaron series temporales horarias de demanda eléctrica total a partir de los registros históricos publicados por el CENACE, abarcando al menos un año calendario completo con el fin de capturar la variabilidad anual y semanal del sistema. En segundo lugar, los datos fueron preprocesados en el entorno RStudio, y generando variables auxiliares como la hora del día, el mes, el día de la semana y el tipo de día. Se definieron dos escenarios estacionales con base en la climatología regional: la temporada de lluvia (de mayo a octubre) y la temporada de no lluvia (de noviembre a abril), asignando a cada registro una etiqueta correspondiente. Posteriormente, se clasificaron los días de la semana en dos grandes grupos operativos: Weekday, comprendido de lunes a viernes, y Weekend, correspondiente a sábados y domingos. Con estas dos restricciones se estructuraron cuatro subconjuntos de análisis: Weekday en temporada de lluvia, Weekend en temporada de lluvia, Weekday en temporada de no lluvia y Weekend en temporada de no lluvia

3.RESULTADOS

El análisis permitió caracterizar de forma precisa el comportamiento horario de la demanda eléctrica en la región operada por la Gerencia de Control Regional Oriental (GCROri) del CENACE, tomando como eje de análisis las restricciones de estacionalidad climática (temporada de lluvia vs. no lluvia) y tipo de día (Weekday vs. Weekend). Mediante la recolección y estandarización de datos con resolución horaria para el año 2024, se consolidó una base robusta que permitió calcular perfiles promedio de demanda segmentados en cuatro subconjuntos homogéneos: días laborables en temporada de lluvia, fines de semana en temporada de lluvia, días laborables en temporada de no lluvia y fines de semana en temporada de no lluvia Farsi et al. (2021) (CENACE, 2024).

3.1 Análisis de resultados de dispersión horarios por mes (Weekday)

Se observa un patrón de incremento progresivo de la demanda a lo largo del día, los valores más bajos se concentran entre las 00:00 y 07:00 h, periodo caracterizado por baja actividad económica y residencial. A partir de las 08:00 h, comienza un incremento sostenido, alcanzando un pico máximo entre las 19:00 y 21:00 h, momento que representa el mayor requerimiento energético diario, coincidiendo con el regreso a casa y el uso intensivo de equipos residenciales y comerciales.

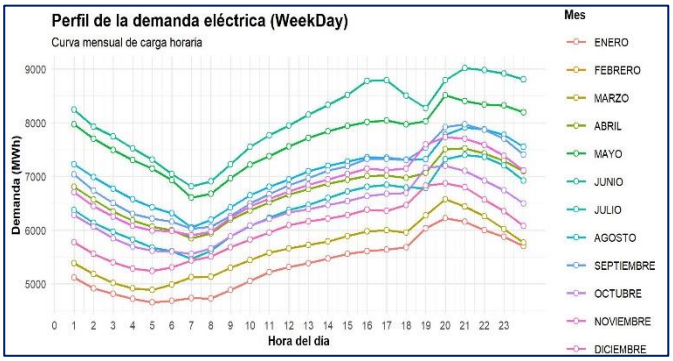


Fig.3.1 Gráfica del análisis promedio anual WeekDay

3.2 Análisis de resultados de dispersión horarios por mes Weekend

En todos los meses, la demanda inicia en valores relativamente altos a las 00:00 h, disminuyendo progresivamente durante la madrugada y alcanzando su mínimo entre las 07:00 y 08:00 h, momento de menor actividad residencial y comercial. A partir de las 09:00 h, comienza un ascenso sostenido en la demanda, que se mantiene durante el día y se acelera considerablemente después de las 18:00 h, alcanzando su pico máximo entre la

20:00 y 21:00 h. Posteriormente, la demanda desciende hacia las últimas horas del día, cerrando el ciclo de carga.

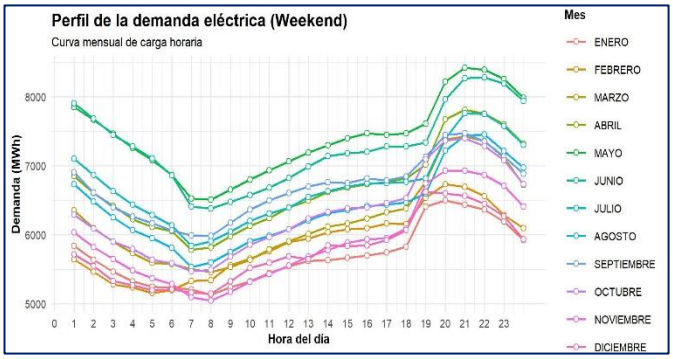


Fig. 3.2 Gráfica del análisis promedio anual Weekend

3.3 Análisis del resultado promedio de Weekday en temporada de no lluvia.

La curva inicia con una demanda moderadamente alta a la 1:00 h (~6200 MWh), seguida de una caída progresiva durante la madrugada, alcanzando el mínimo alrededor de las 6:00–7:00 h, con un valor cercano a los 5,500 MWh. A partir de las 8:00 h, comienza una fase de ascenso sostenido, con incremento constante en la demanda debido al inicio de actividades laborales, comerciales e industriales. Este ascenso se mantiene hasta alcanzar un pico máximo alrededor de las 20:00 h, superando los 7,000 MWh, momento que coincide con el uso combinado de iluminación, electrodomésticos y actividad comercial tardía. Después del pico, la curva muestra un descenso gradual hasta el cierre del día, estabilizándose nuevamente por debajo de los 6,500 MWh a las 24:00 h.

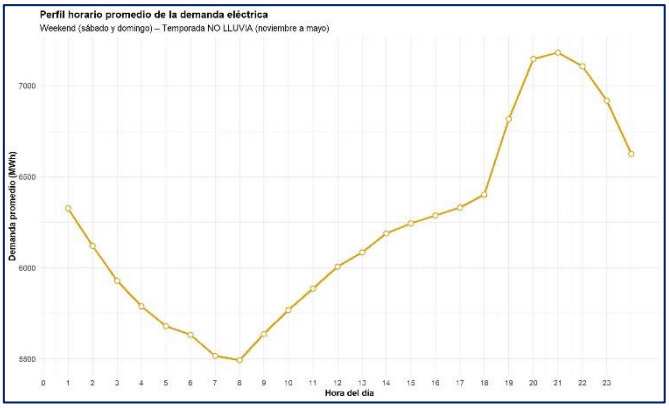


Fig. 3.3 Gráfica del promedio Weekday temporada de no lluvia.

El valle matutino es más pronunciado en esta temporada en comparación con la temporada de lluvia, indicando menor demanda energética relacionada con enfriamiento ambiental durante las primeras horas del día. La rampa de subida entre las 7:00 y 20:00 h es extendida pero no tan abrupta, lo que sugiere un crecimiento estable en la carga que es más fácil de gestionar operativamente. El pico vespertino refleja la superposición de cargas residenciales y comerciales, característica típica de días laborables donde la actividad humana intensifica el consumo.

3.4 Análisis del resultado promedio de Weekday en temporada de lluvia.

La demanda inicia en niveles elevados durante la madrugada (01:00 h ~7,150 MWh) y presenta un descenso progresivo hasta alcanzar un mínimo alrededor de las 07:00 h, con valores cercanos a 6,050 MWh. A partir de las 08:00 h, se observa una rampa de subida sostenida y continua a lo largo del día, evidenciando el reinicio de actividades laborales, escolares e industriales. La curva alcanza su pico máximo entre las 21:00 y 22:00 h, con valores cercanos a 8,000 MWh, lo cual representa un aumento aproximado de 2,000 MWh respecto al valor mínimo del día. Posteriormente, la demanda desciende ligeramente después de las 22:00 h, cerrando el día por encima de los 7,500 MWh, lo que indica una carga nocturna considerable.

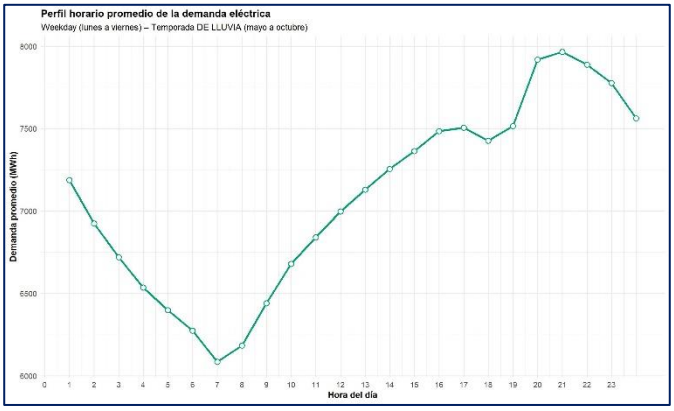


Fig. 3.4 Gráfica del promedio Weekday temporada de lluvia.

Las características de la demanda promedio general en temporada de lluvia es más alta que en la temporada de no lluvia en casi todos los horarios del día, reflejando el efecto climático sobre el uso intensivo de equipos eléctricos. La rampa vespertina entre las 17:00 y las 21:00 h es significativamente más pronunciada, indicando un aumento rápido de la carga que implica mayores exigencias para el despacho de generación y la operación flexible del sistema. El comportamiento horario es más agresivo, con un rango de variación diario más amplio, lo cual puede generar mayor estrés operativo si no se gestiona adecuadamente.

3.5 Análisis del resultado Weekday con las 2 temporadas.

En la temporada de lluvia, el punto de mínima demanda se presenta alrededor de las 07:00 h, con un valor de 6,085.2 MWh. En la temporada de no lluvia, el mínimo se presenta también hacia las 07:00 h, pero con un valor más bajo de 5,539.3 MWh. Esta diferencia de +545.9 MWh en la temporada húmeda evidencia una mayor demanda base, probablemente impulsada por el uso continuo de sistemas de enfriamiento y ventilación durante toda la noche.

En temporada de lluvia, el pico máximo ocurre alrededor de las 21:00 h, alcanzando un valor de 7,966 MWh. En temporada de no lluvia, el pico se da también cerca de las 20:00–21:00 h, pero con un valor de 7,141.1 MWh. La diferencia de +824.9 MWh en la temporada de lluvia refuerza la idea de una carga más exigente durante periodos cálidos y húmedos, principalmente en el horario residencial nocturno.

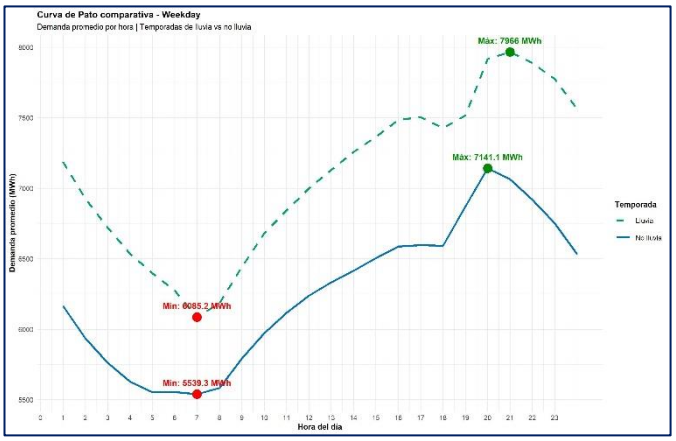


Fig. 3.5 Gráfica del resultado Weekday con las 2 temporadas.

3.6 Análisis del resultado Weekend con las 2 temporadas

Temporada de lluvia: el valor mínimo ocurre alrededor de las 08:00 h, con 5,960.8 MWh. Temporada de no lluvia: el mínimo también se da a las 08:00 h, pero con un valor inferior de 5,492.3 MWh. La diferencia de aproximadamente 468.5 MWh en el valle refleja un consumo basal más alto durante la temporada húmeda, posiblemente relacionado con el uso nocturno de ventilación o enfriamiento.

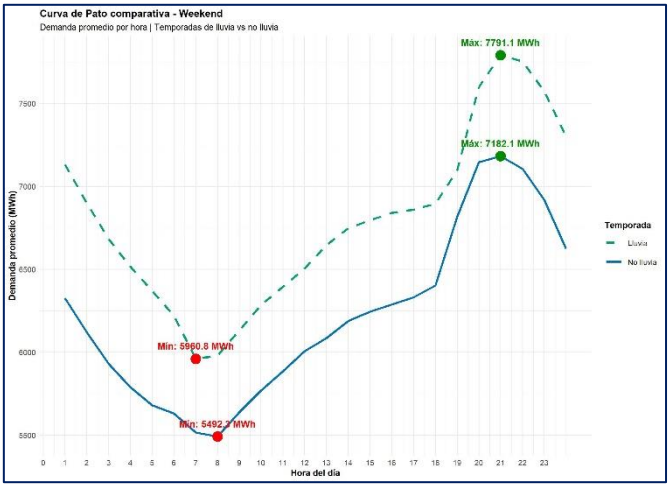


Fig. 3.6 Gráfica del resultado weekend con las 2 temporadas.

Temporada de lluvia: el valor mínimo ocurre alrededor de las 08:00 h, con 5,960.8 MWh. Temporada de no lluvia: el mínimo también se da a las 08:00 h, pero con un valor inferior de 5,492.3 MWh. La diferencia de aproximadamente 468.5 MWh en el valle refleja un consumo basal más alto durante la temporada húmeda, posiblemente relacionado con el uso nocturno de ventilación o enfriamiento.

La demanda máxima diaria en temporada de lluvia: el pico máximo ocurre a las 20:00 h, con 7,791.1 MWh. No lluvia: también a las 20:00 h, con un pico menor de 7,182.1 MWh. La diferencia de 609 MWh indica una mayor intensidad de uso residencial y recreativo en temporada de calor, impulsando el consumo energético durante la tarde-noche.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió caracterizar con precisión el comportamiento horario de la demanda eléctrica en la región de la Gerencia de Control Regional Oriental (GRCOri) del CENACE, mediante el análisis comparativo entre temporadas climáticas (lluvia y no lluvia) y tipos de día (Weekday y Weekend). La segmentación metodológica y el análisis estadístico detallado mostraron que la forma y magnitud de la curva de demanda eléctrica presentan diferencias estructurales relevantes asociadas a factores climáticos y sociales.

Los resultados evidencian que la demanda eléctrica en temporada de lluvia es sistemáticamente más alta en todos los horarios del día, tanto en días laborables como en fines de semana, con picos de consumo más intensos y valles menos pronunciados. Este comportamiento se relaciona con el incremento del uso de sistemas de climatización durante periodos de mayor temperatura y humedad. Por otro lado, la temporada de no lluvia presenta perfiles más moderados, con menor variabilidad intradía, lo cual sugiere una carga más estable y predecible desde el punto de vista operativo.

En días laborables, se identificaron rampas de ascenso más pronunciadas hacia la noche, con diferencias de hasta 800 MWh entre los picos de ambas temporadas. En fines de semana, aunque la forma de la curva se mantiene, la variación entre estaciones también se manifiesta de forma significativa, confirmando que el comportamiento del consumidor cambia de manera predecible con el clima y el tipo de actividad diaria.

La obtención de curvas de demanda representativas para cada subconjunto estacional, permite mejorar la planificación de generación, el diseño de políticas de respuesta a la demanda y la integración eficiente de energías renovables. Este enfoque contribuye directamente al fortalecimiento de estrategias operativas orientadas a la transición energética, garantizando una asignación más racional de los recursos del sistema eléctrico nacional.

Se recomienda usar modelos avanzados de series de tiempo para predecir mejor el comportamiento de la demanda eléctrica en la región GRCOri. Algunos modelos estadísticos como ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average), SARIMA (Seasonal ARIMA) y ETS (Error-Trend-Seasonal) permiten identificar patrones que se repiten por hora o por temporada. Sin embargo, debido a que la demanda cambia de forma brusca y no siempre sigue un patrón fijo (por ejemplo, durante los picos de la noche o los fines de semana con lluvia), también es útil usar redes neuronales más complejas como LSTM (Long Short – Term Memory) y CNN (Convolutional Neural Networks), que aprenden estos

cambios con mayor precisión. Usar estos modelos en el futuro ayudará a mejorar las decisiones de operación, el control del sistema eléctrico y la integración de energía renovable, haciendo el sistema más eficiente y adaptable.

5. REFERENCIAS

Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), 2024. Demanda bruta regional por hora. Disponible en; https://www.cenace.gob.mx,

De Felice, M., Xin Yao, 2011. Short-Term Load Forecasting with Neural Network Ensembles: A Comparative Study [Application Notes]. IEEE Computational Intelligence Magazine 6, 47–56. doi:10.1109/MCI.2011.941590.

Farsi, B., Amayri, M., Bouguila, N., Eicker, U., 2021. On short-term load forecasting using machine learning techniques and a novel parallel deep LSTM-CNN approach. IEEE Access 9, 31191–31212. doi:10.1109/ACCESS.2021.3060290.

Economical Optimization of Surface Coverage of a Grid-Connected PV System in the Residential Sector

Guzmán García Adriel Eduardo* Borunda Pacheco Mónica ** Adam Medina Manuel * García Beltrán Carlos Daniel *

**Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - TECNM (Cel: 7341080377, e- mail: m23ce104, manuel.am, carlos.gb@cenidet.tecnm.mx).*

***Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - TECNM, SECIHTI, (e-mail: monica.bp@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: This study emphasizes the importance of optimizing the collection area in photovoltaic (PV) systems, considering the levelized cost of energy (LCOE) associated with key components such as solar panels, inverters, and microinverters. Focusing on the residential sector, the research addresses the growing need to reduce fossil fuel consumption. A crucial factor in this analysis is the high solar irradiance in Morelos, where the study was conducted, as it significantly enhances the feasibility of PV system implementation. The paper presents an optimization analysis for the collection area based on LCOE and local irradiance, aiming to provide a cost-effective and efficient energy solution.

Keywords: Energy Consumption, Photovoltaic systems, Surface coverage, Numerical solution, equipment costs.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la crisis energética global está básicamente ligada al cambio climático y al deterioro ambiental. Los combustibles fósiles, además de ser recursos finitos, generan la mayor proporción de emisiones de gases de efecto invernadero que aceleran el calentamiento global.

Frente a este escenario, la transición hacia energías renovables, particularmente la solar, se ha convertido en un factor clave para garantizar la sostenibilidad. Los sistemas fotovoltaicos emergen como una solución clave, al transformar la radiación solar en electricidad sin procesos contaminantes. No obstante, su eficiencia depende en gran medida de parámetros técnicos como la optimización del área de captación.

Este estudio analiza y se desarrolla una metodología para maximizar la superficie de captación en instalaciones fotovoltaicas involucrando directamente los costos de los equipos del sistema fotovoltaico, con el fin de incrementar su productividad energética y facilitar una transición hacia sistemas más eficientes.

2. METODOLOGÍA

2.1 Adquisición de datos de Irradiancia.

Para la adquisición de datos de irradiancia reales se consultó una página de acceso libre del Gobierno de México de Estaciones Meteorológicas Automáticas, con estos datos obtenidos, se consideró la irradiancia de un día soleado, como se muestra en la Figura 1.

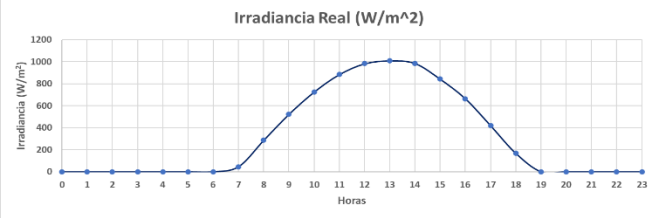


Figura 1. Irradiancia en un día soleado en Morelos [1].

2.2 *Adquisición de datos de consumo energético en viviendas.*

Para la recopilación de datos, se adquirieron equipos de medición como el data logger de la marca Emporia como se muestra en la Figura 2, lo cual posibilita obtener el consumo energético de las viviendas en tiempo real y por intervalos de tiempo.



Figura 2. Equipo de monitoreo para el consumo energético total de la vivienda marca Emporia.

El monitor de energía de la marca Emporia cuenta con tres entradas para sensores principales, lo que permite monitorear redes eléctricas trifásicas. Además, dispone de ocho entradas adicionales para sensores, que permiten el monitoreo independiente de equipos, no obstante, estos sensores se deben adquirir por separado. Las características eléctricas son:

240/127 VCA, 50 A, trifásicas 415 Y/240VCA (sin conexión Delta).

Este dispositivo se instala cerca del centro de carga de la vivienda, esto va dependiendo de la instalación eléctrica, sin embargo, como las viviendas monitoreadas son de una fase, se toma uno de los sensores que contiene el dispositivo Emporia como se muestra en la Figura 3 y se coloca en la fase en el extremo que va del interruptor principal de la vivienda hacia el medidor como se muestra en la Figura 4.

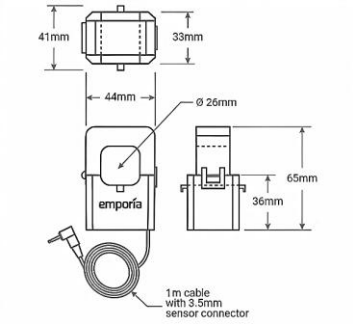


Figura. 3. Sensor (TC) para medir el consumo de la vivienda y registrar en la nube [2].

En el caso de la Figura 4, en el caso de las viviendas monitoreadas son de 1 fase, con base a eso, solo lleva un sensor en el conductor de la fase, los sensores que van instalados en las fases son de 50 A, los sensores para cada línea son de 20 A.

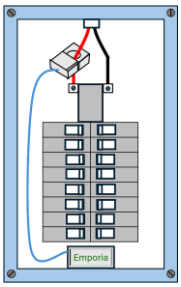
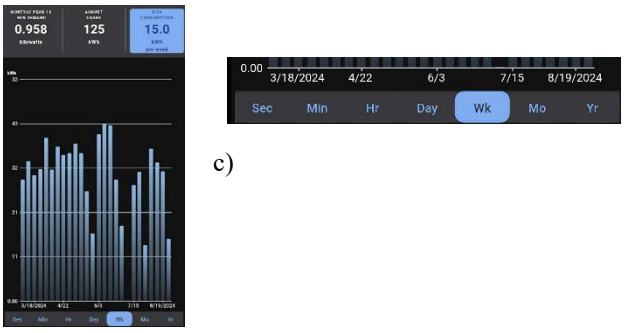


Figura. 4 Conexión del equipo Emporia en las fase del sistema eléctrico de cada una de las viviendas monofásicas [2].

Los datos de energía monitoreados registrados cada segundo sólo se pueden visualizar en la aplicación instalados en el sistema Android o iOS como se muestra en la Figura 5, y se conservan por un periodo de 3 horas. Los datos por minutos y por hora se almacenan en la nube: los datos por minuto se guardan durante 7 días, mientras que los datos por hora se conservan indefinidamente. Esto permite exportar los datos desde la aplicación en cualquier momento que se requieran. Es necesaria una conexión Wifi de 2.4 GHz para el funcionamiento del sistema.



b)



c)

a)

Figura 5. a) Interfaz de la App de Emporia para visualizar los datos adquiridos o monitoreados del consumo energético, b) LA parte superior del interfaz donde se muestra la energía consumida pico de 15 min., y c) es la parte inferior del interfaz donde se muestra las opciones para visualizar el consumo energético.

Esto nos permite visualizar el consumo energético y registrar los datos para su uso en nuestro caso de estudio como se muestra en la Figura 6. En donde se muestra la energía consumida durante un año, en el eje horizontal corresponde al tiempo (h), en el eje vertical corresponde a la energía consumida (kWh), estos datos pertenecen a la vivienda 1.

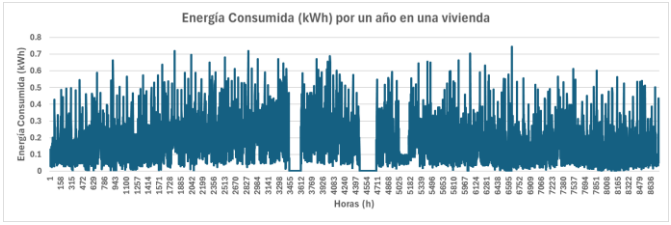


Figura 6. Datos obtenidos con el equipo Emporia, con respecto al consumo energético de la vivienda 1 durante un año.

2.3 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico (SFV).

Una vez que se realizó el estudio del recurso solar y el estudio de la demanda energética, se dimensionó el sistema fotovoltaico de las tres viviendas considerando un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica de Comisión Federal de Electricidad (CFE) como se muestra en la Figura 7. Durante el dimensionado del sistema fotovoltaico se analizaron los datos y balance energético en cada una de las viviendas.

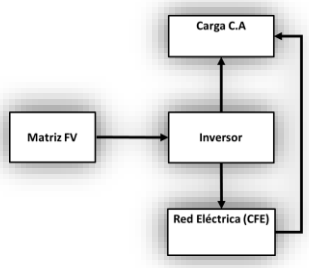


Figura 7. Sistema fotovoltaico seleccionado con propósito de estudio.

3. OPTIMIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DE CAPTACIÓN PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A LA RED.

En la optimización del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica (CFE), se prioriza el costo de la energía horaria diaria, considerando tanto la energía generada por el sistema como la proporcionada por la red. Para el caso de estudio, se compara la energía producida por el sistema fotovoltaico con la suministrada por la red. Por un lado, se analiza la energía generada por el sistema FV, la energía consumida por la vivienda en el momento de la generación y el excedente no utilizada, el cual es inyectado a la red eléctrica para su posterior uso por la vivienda. Se asume que el costo de la energía es el mismo precio de compra y venta [3].

Con base a la información proporcionada en el portal de la CFE, para consultar los costos de los consumos [4], se encontró que se dividen en 3 niveles, el consumo energético que son: básico, intermedio y excedente como se muestra en la tabla 1, es importante mencionar que los costos de la energía cambian con base a la región del país, y estación del año.

Considerando la información tarifaria, para el caso de estudio se toma un promedio del consumo básico e intermedio.

Tabla 1. Tarifa del consumo energético.

Consumo	Tarifa	Descripción
Básico	$ 1.055	Por cada uno de los primeros 75 (setenta y cinco) kilowatts-hora
Intermedio	$ 1.280	Por cada uno de los siguientes 100 (cien) kilowatt-hora
Excedente	$ 3.75	Por cada kilowatt-hora adicional a los anteriores

En la Figura 8 se muestra C(t) y R(t), donde C(t) representa el consumo promedio diario de las 3 viviendas monitoreadas. Pfv corresponde a la potencia generada por un sistema con una superficie de 5 m2 y una eficiencia del panel de 21%, considerando una irradiancia en un día soleado con un pico de 1020 W/m^2, de acuerdo con la ecuación (2).

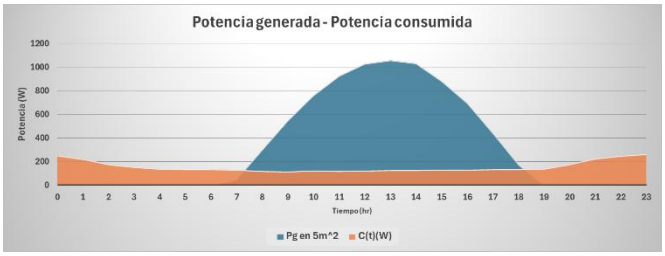


Figura 8. Potencia generada por un sistema fotovoltaico, curva azul, y consumo energético característico de una vivienda, curva naranja.

Para minimizar el costo de la energía diaria, se determina la siguiente ecuación.

$$C_{sist.fv} = Nfv * [C_{fv} + C_{Inv}], \quad (1)$$

$$C_{sist.fv} \approx S_{cap} * (N_{fv} * C_{fv} + N_{inv} * C_{Inv}), \quad (2)$$

donde $C_{sist.fv}$ es el costo del sistema fotovoltaico, N_{fv} es el número de paneles fotovoltaicos, C_{fv} el costo del panel fotovoltaico, C_{Inv} el costo del inversor y S_{cap} la superficie de captación del sistema fotovoltaico.

Asumiendo que el tiempo de retorno de inversión es a 10 años tenemos que la inversión diaria (Inv_{diaria}), depende del costo del sistema fotovoltaico, $C_{sist.fv}$ de la siguiente forma

$$Inv_{diaria} = \frac{C_{sist.fv}}{10} * \frac{1}{365} = \frac{C_{sist.fv}}{3650}, \quad (3)$$

El costo diario de energía (C_{diario}) es determinado por el consumo diario de la energía de la vivienda menos la generación del sistema fotovoltaico, la diferencia de las energías es multiplicada por el costo (kWh) considerando las tarifas de CFE (CkWhCFE). Se muestra en la ecuación 4 el costo diario de la energía:

$$C_{diario} = [Consumo_{diario} - Generación\ PV_{diario}] * C_{kWhcfe}, \quad (4)$$

$$Consumo_{diario} = \int_0^{24} C(t)dt\ , \quad (5)$$

En la ecuación 6, la generación PV diario está dado por el producto de: la eficiencia (η) del panel fotovoltaico, superficie de captación (S_{cap}) e irradiancia (R(t)) integrada en el tiempo, correspondiente al de la zona geográfica o bien, donde se instalará el sistema fotovoltaico.

$$Generación\ PV_{diario} = \int_0^{24} \eta * S_{cap} * R(t) * dt. \quad (6)$$

El costo total del sistema por día está dado por la suma de las ecuaciones 3 y 4.

$$C_{total_sist_diario} = \frac{C_{sist.fv}}{3650} + costo\ diario, \quad (7)$$

Para definir la ecuación de la función objetivo, se considera que la superficie de captación (Scap) debe estar incluida en el costo diario del sistema, el cual debe minimizarse. Así, la función objetivo queda expresada como:

S_{cap} ∋ $C_{total_sist_diario}$ → mínimo (Función Objetivo). (8)

$$C_{total_sist_diario} \approx S_{cap} * \left[\frac{C_{sist.fv} + C_{Inv}}{3650}\right] + \left[\int_0^{24} C(t)dt - \int_0^{24} \eta * S_{cap} * R(t) * dt\right] * \$_{kWhcfe}, \quad (9)$$

Las restricciones consideradas en el modelo incluyen la siguiente condición integral, que garantiza que la energía generada por el sistema fotovoltaico cubra la demanda energética diaria de la vivienda:

$$\int_0^{24} C(t)dt \geq \int_0^{24} \eta * S_{cap} * R(t) * dt, \quad (10)$$

Esta restricción asegura que la energía total producida (lado derecho sea al menos igual a la demanda diaria consumida (lado izquierdo).

4. COSTO NIVELADO DE LA ENERGÍA (LCOE).

El costo nivelado de la energía (LCOE) ayuda a comparar el costo de generación de energía entre diferentes tecnologías y proyectos.

$$\text{LCOE}\left(\frac{\$}{\text{kWh}}\right) = \frac{Costo\ total\ del\ ciclo\ de\ vida\ (\frac{\$}{W})}{Producción\ total\ de\ energía\ durante\ su\ vida\ util\ (\frac{kWh}{kW})}, \quad (11)$$

desglosando cada variable de la ecuación 11, la ecuación queda expresada de la siguiente manera (12)

$$LCOE = \frac{Costo\ de\ instalación + \sum_{n=1}^{N} \frac{Costo\ O\&M}{(1+Tasa\ de\ descuento)} - \sum_{n=1}^{N} \frac{Depresación}{(1+Tasa\ de\ descuento)} x\ (tasa\ de\ impuesto) - \frac{Valor\ residual}{(1+Tasa\ de\ descuento)}}{\sum_{n=1}^{N} \frac{kWh\ basado\ en\ CA}{(1+Tasa\ de\ descuento)} x\ (1 - Tasa\ de\ degradación\ del\ sistema)} \quad (12)$$

LCOE está dada en $/kWh. Costo de instalación, este costo incluye el costo del inversor, costo de los paneles fotovoltaicos, así como el costo de los herrajes, cableado y mano de obra. Costo O&M es el costo de mantenimiento y operación. Tasa de descuento es el porcentaje que se usa traer a valor presente los flujos de efectivo futuro por lo que se usa para evaluar la rentabilidad de proyectos. En otras palabras, es una tasa del sistema financiado, donde se considera el capital y la deuda que se adquiere. Sin embargo, este sistema no es considerado para un financiamiento. Por lo que la fórmula expresada es reducida. Depreciación se asume que el sistema pierde el mismo valor cada año hasta llegar a su valor residual como se muestra en la ecuación 13.

$$Depreciación = \frac{Costo\ inicial - Costo\ residual}{Vida\ Útil\ (años)}, \quad (13)$$

Tasa de impuesto, en México la tasa de impuesto es referente al IVA, que en el caso de las personas morales se considera un 30% y para las personas físicas un 16%. Valor Residual, el valor residual es un porcentaje del costo original del sistema, para un sistema fotovoltaico se puede considerar de dos maneras, una considerar solo los paneles fotovoltaicos y la segunda es el sistema completo como son los paneles fotovoltaicos, inversor, estructuras, cableado, etc.

$$Valor\ residual = Costo\ incial\ x\ \%\ valor\ inicial, \quad (14)$$

se considera 15 – 30% del costo inicial si los paneles siguen operando con eficiencia reducida, de 5 – 10 % si solo se pueden revender como desperdicio o reciclaje, y 0% si se considera que el sistema ya no tiene ningún valor económico.

Producción de energía inicial *(kWh en C.A),* es la energía generada del sistema fotovoltaico, en este caso el valor obtenido por la simulación por PVSyst es de 1062 kWh. Degradación del sistema, es el porcentaje anual de reducción de la producción de la energía del sistema fotovoltaico, esta suele ser de 0.5 a 1%. En nuestro caso es de 0.55% con base a la hoja de datos.

Con base a lo descrito anteriormente nuestra formula queda de la siguiente manera (ecuación 15). Debido a que el proyecto no está considerado de forma de financiamiento ante alguna organización o empresa.

$$LCOE = \frac{Costo\ de\ instalación + \sum_{n=1}^{N} Costo\ O\&M - \sum_{n=1}^{N} Depresación\ x\ (tasa\ de\ impuesto) - Valor\ residual}{\sum_{n=1}^{N} kWh\ basado\ en\ CA\ x\ (1 - Tasa\ de\ degradación\ del\ sistema)} \quad (15)$$

Los resultados que se obtuvieron considerando los costos de los equipos en tiendas departamentales, y precios obtenidos en internet. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados obtenidos. Fuente: Hoja de cálculo, Excel 360.

Vivienda	Energía generada (kWh)	LCOE equipos en internet	LCEO tienda departamental
1	1062	$2.61	$4.66
2	2001	$1.68	$3.19
3	743	$3.73	$4.30

5. RESULTADOS

5.1 Aplicando la optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico interconectado a la red para una vivienda.

En la Figura 9 se muestra la potencia generada con una irradiancia de 1000 W/m^2 en una superficie de 3 m^2. Donde la energía generada por el sistema es de 1920 Wh y la energía consumida por la vivienda 1 es de 1793 Wh.

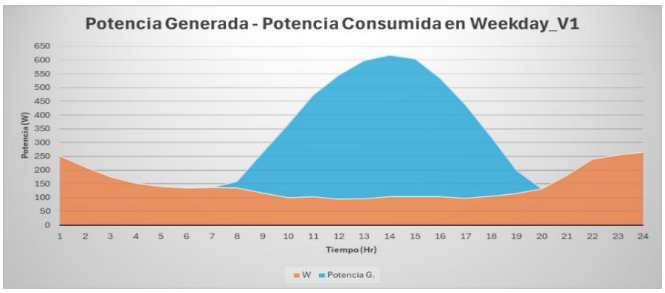


Figura 9. Potencia generada (azul) y potencia consumida (Naranja) por la vivienda 1 con una irradiancia de 1000 W/m^2 para weekday.

Para el caso de weekend la potencia generada con una irradiancia de 1000 W/m^2 en una superficie de 3 m^2. Donde la energía generada por el sistema es de 1920 Wh y la energía consumida por la vivienda 1 es de 2187 Wh.

En la Figura 10 se muestra los resultados obtenidos en la optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico interconectado a la red con irradiancias de 1000, 800 y 600 W/m^2 en este caso para weekday, se obtuvo para irradiancias de 1000 y 800 W/m^2 una superficie de captación de 2 m^2 y con una irradiancia de 600 W/m^2 una superficie optima de 3 m^2. Los resultados obtenidos en la optimización de la superficie de captación para un sistema fotovoltaico interconectado a la red con irradiancias de 1000, 800 y 600 W/m^2 en este caso para weekend, se obtuvo para 1000 y 800 W/m^2 una superficie de captación de 3 m^2 y con una irradiancia de 600 W/m^2 una superficie optima de 4 m^2.

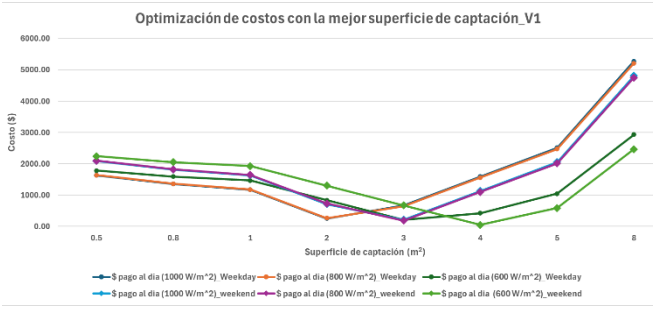


Figura 10. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red, vivienda 1.

En la Figura 11 se muestra una representación de los resultados en una gráfica de superficie para una mejor visualización.

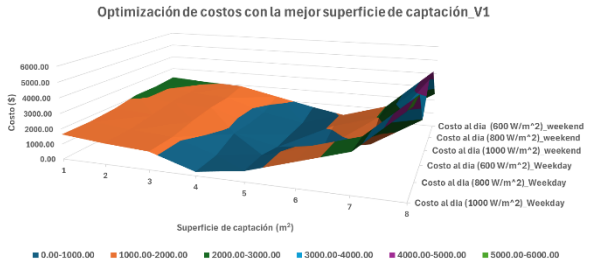


Figura. 11. Optimización del costo de la energía con base a la superficie de captación del sistema fotovoltaico interconectado a la red, vivienda 1.

Se realizó el mismo procedimiento para dos viviendas obteniendo los siguientes resultados (Tabla 3).

Tabla 3. Tabla comparativa de los resultados de la función objetivo con distinta irradiancia. Fuente: Hoja de cálculo, Excel 360.

Vivienda		Superficie m² (1000 W/m²)	Superficie m² (800 W/m²)	Superficie m² (600 W/m²)
1	Weekday	2	2	3
	Weekend	3	3	4
2	Weekday	3	3	4
	Weekend	3	3	4
3	Weekday	1	1	2
	Weekend	1	1	2

5.2 Resultados en MatLab aplicando la técnica de optimización PSO.

Se realizó la comprobación de los resultados obtenidos mediante la optimización de forma discreta, aplicando una técnica de optimización por enjambre de partículas (PSO), utilizando un código en el software Matlab, con el propósito de determinar el área óptima de paneles solares (superficie de captación) que minimice el costo total, donde se considera la inversión inicial en paneles e inversores, el ahorro generado por la energía solar producida y el costo de la energía no cubierta por el sistema FV.

El algoritmo PSO explora diferentes áreas entre 0.5 y 8 m^2. La configuración del algoritmo PSO es con 30 partículas y 100 iteraciones, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 4. Tabla comparativa de los resultados de la función objetivo con distinta irradiancia. Fuente: Simulación en MatLab, 2021.

Vivienda		Superficie m² (1000 W/m²)	Superficie m² (800 W/m²)	Superficie m² (600 W/m²)
1	Weekday	2.10	2.12	2.94
	Weekend	2.61	2.63	3.65
2	Weekday	2.85	2.88	3.99
	Weekend	2.92	2.95	4.09
3	Weekday	1.11	1.12	1.56
	Weekend	1.06	1.07	1.48

5.3 Prueba y validación con PVSyst

Para la vivienda 1 se utilizó un panel solar de la marca JA Solar Modelo JAM72-S30-550-MR de una potencia de 550 Wp, y un microinversor de la marca APsystems modelo DS3.

En la Figura 12 se muestra el diagrama unifilar del sistema fotovoltaico.

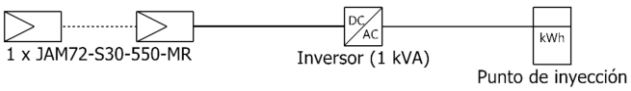


Figura 12. Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico_V1.

En la Figura 13 se muestra los resultados obtenidos en la simulación obteniendo una proporción de rendimiento del 85.7%, del rendimiento en general del sistema. Siendo el índice de rendimiento útil, debido a que no depende directamente de las condiciones climáticas o de la orientación del sistema, lo que permite comparar la calidad de diferentes instalaciones en distintas ubicaciones, por lo que un sistema bien diseñado y mantenido suele tener PR entre el 75 y el 85%.

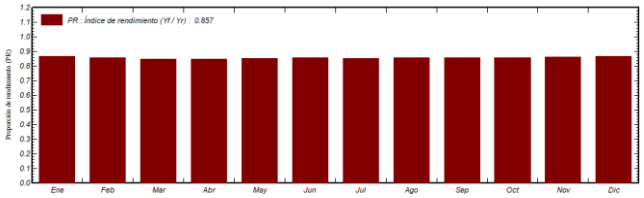


Figura 13. Gráfica de índice de rendimiento.

En la tabla 5 se muestra los resultados obtenidos en la simulación del software PVsyst. Se observa que la energía producida anual es aproximadamente igual a la energía consumida por la vivienda, de esta forma se cubre el 100% del consumo total anual de la vivienda, teniendo un pequeño excedente de 62 kWh.

Tabla 5. Resultados del sistema fotovoltaico_V1. Fuente: Simulación en PVSyst.

Pérdidas en el arreglo fotovoltaico	Pérdidas en el inversor	Producción energética (anual)	Energía consumida del sistema (anual)	Energía inyectada a la red (anual)	Energía consumida de la red (anual)
-9.3%	-3.1%	1062 kWh	482 kWh	579 kWh	518 kWh

Se realizó las pruebas para dos viviendas más y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados del sistema fotovoltaico para 3 viviendas. Fuente: Simulación en PVSyst.

Vivienda	Superficie (m²)	Pérdidas en el arreglo fotovoltaico	Pérdidas en el inversor	Producción energética (anual)	Energía consumida del sistema (anual)	Energía inyectada a la red (anual)	Energía consumida de la red (anual)
1	3	-9.3%	-3.1%	1062 kWh	482 kWh	579 kWh	518 kWh
2	5	-9.8%	-3.8%	2014 kWh	680 kWh	1334 kWh	1041 kWh
3	2	-9.8%	-3.0%	745 kWh	290 kWh	455 kWh	367 kWh

5.4 Resultados de Costo Nivelado de la Energía (LCOE).

Los resultados obtenidos del costo nivelado de la energía (LCEO) se presentan en la tabla 7, para cada una de las viviendas. Donde se muestra una columna el precio que se tiene al implementar equipos que se adquieren en tiendas departamentales, y en otra columna con equipos que se adquieren de forma comercial por internet. De esta manera se demuestra que el costo del LCEO se reduce al buscar equipos de bajo costo y con alta eficiencia.

Tabla 7. Resultados del sistema fotovoltaico para 3 viviendas. Fuente: Hoja de cálculo, Excel 360.

Vivienda	Energía generada (kWh)	LCOE equipos en internet	LCEO tienda departamental
1	1062	$2.61	$4.66
2	2001	$1.68	$3.19
3	743	$3.73	$4.30

6. CONCLUSIONES

Análisis de superficies óptimas de captación solar para viviendas, se obtuvieron los siguientes resultados (ver Anexo A).

La recomendación técnica sugiere 3 m² para V1, 4 m² para V2 y 2 m² para V3, como solución balanceada, ya que ofrece mayor capacidad de captación en condiciones variables y mantiene un impacto económico marginal, proporciona estabilidad operativa en diferentes escenarios

En conclusión, los casos demuestran que la superficie óptima varía significativamente según las condiciones de irradiación. La selección final debe considerar no solo el costo mínimo absoluto, sino también la estabilidad operativa y la adaptabilidad a diferentes escenarios climáticos, donde las soluciones de 3 m^2, 4 m² y 2 m² respectivamente ofrecen el mejor equilibrio entre eficiencia económica y rendimiento energético.

7. REFERENCIAS

[1] CONAGUA. "Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS)." https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-emas (accessed.

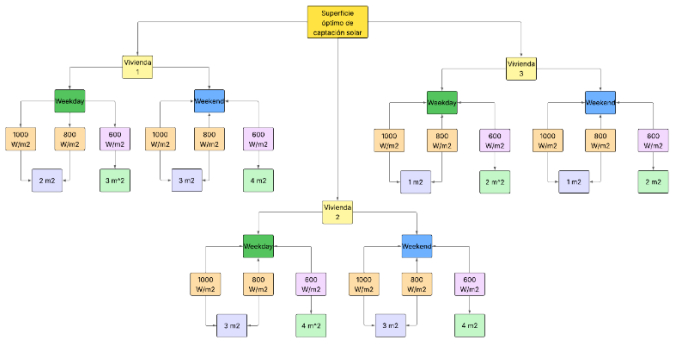
[2] "Emporía." https://shop.emporiaenergy.com/ (accessed.

[3] CFE. "Contratación de suministro para solicitudes de interconexión." https://www.cfe.mx/hogar/infcliente/pages/catalogo-tramites.aspx (accessed.

[4] "TarifasCRECasa," 2024. [Online]. Available: https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/Tarifa1B.aspx.

Anexo A.

Resultados obtenidos de la superficie de captación (m^2) con irradiancias de 1000, 800 y 600 W/m^2, para entre semana (weekday) y fin de semana (weekend).



Methodological Proposal for Predicting Demand at Electric Vehicle Charging Stations Using Random Forest

González-Lorence, Armida*, López-Castillo, Hernesto M.*, Navarrete-Fernández, Ángel C. *, Morales-Morales, Cornelio*, Mondragón-Solís, Ana L. **, Ascencio-Laguna, José A.***

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico #2 esq. Eje Central, San Juan del Río, Querétaro, 76800*
(e-mail: {armida.gl; l20590487; custodio.nf; cornelio.mm}@sjuanrio.tecnm.mx)

*** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Celaya, Antonio García Cubas Pte. 600 esq. Av. Tecnológico, Celaya, Guanajuato, 38010*

**** Instituto Mexicano del Transporte, Km 12+000, Carretera Estatal No. 431 "El Colorado-Galindo", San Fandila, Pedro Escobedo, Querétaro, 76703*

Abstract: The growing adoption of electric vehicles poses significant challenges due to the lack of precise information about future demand. This study proposes the development of a predictive system based on Random Forest to estimate demand at electric vehicle charging stations in Mexican metropolitan areas, optimizing routes considering the vehicle's state of charge, station availability, and real-time route conditions. The proposed model integrates multiple variables including location, usage patterns, traffic, vehicle range, driving habits, and factors that influence energy demand. The methodology comprises data collection and preprocessing, implementation of the Random Forest algorithm, and evaluation using metrics such as coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and mean absolute error (MAE), with the hypothesis that the model could achieve an R^2 greater than 0.75. Using geospatial data and optimization techniques, strategic stops are determined at stations with confirmed availability, minimizing waiting times and maximizing the energy efficiency of the journey. To achieve this, real-time map APIs and public databases that record the location and availability of public charging stations are implemented. The aim is to establish the foundation for the development of an analytical tool that facilitates data-driven decision-making in the electric mobility sector, contributing to better management of energy resources and promoting more sustainable and safer mobility in Mexico.

Keywords: Electric vehicles, Charging stations, Demand prediction, Route optimization, Navigation system, Random Forest, Machine learning.

1. INTRODUCCIÓN

La venta de vehículos eléctricos experimenta un crecimiento exponencial, debido a la creciente conciencia ambiental, los avances en tecnología de baterías y las nuevas políticas gubernamentales de apoyo (Blum et al., 2021). Este aumento de vehículos eléctricos (EVs) requiere una infraestructura de carga robusta y confiable para asegurar su autonomía (Hajibabai & Mirheli, 2022).

En México, esta tendencia de ventas de vehículos eléctricos se refleja de manera constante desde 2016, como lo demuestran los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2024). Según la Electromovilidad Asociación (EMA), conformada por empresas como Tesla, BYD, JAC, Evergo, SEV, VEMO y Volvo, existen actualmente 45,000 unidades de carga para vehículos eléctricos en el país, incluyendo tanto estaciones de corriente directa como de corriente alterna (Dar et al., 2024).

La anticipación de los requerimientos energéticos para automóviles eléctricos constituye un factor fundamental para la incorporación eficaz de estos vehículos al mercado. Esta capacidad predictiva resulta esencial para diversos aspectos estratégicos: permite racionalizar la asignación de recursos disponibles, contribuye al equilibrio y resistencia de la red mediante estrategias anticipatorias de distribución energética, enriquece significativamente la interacción del usuario al

minimizar tiempos de espera y facilitar el acceso, además de proporcionar fundamentos sólidos para la toma de decisiones financieras relacionadas con la expansión y mejoramiento de la infraestructura destinada a la recarga vehicular (Bons et al., 2021).

Uno de los principales problemas identificados es que los sistemas de navegación actuales, como Google Maps, no consideran factores clave como la autonomía del vehículo eléctrico, el consumo energético en tiempo real, el tráfico o la disponibilidad de estaciones de carga. Esto limita la eficiencia y confiabilidad del transporte eléctrico, generando incertidumbre entre los usuarios y afectando la adopción masiva de esta tecnología.

Este trabajo determina una propuesta metodológica para predecir la demanda en estaciones de carga de vehículos

eléctricos utilizando Random Forest, un algoritmo de aprendizaje automático que ha demostrado su eficacia en la captura de relaciones no lineales y complejas. La metodología desarrollada se integra en un sistema de navegación inteligente que recomienda rutas eficientes basadas en el estado de carga, consumo energético y disponibilidad de estaciones en México.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Las investigaciones existentes sobre la predicción de demanda en estaciones de carga de vehículos eléctricos revelan un espectro de metodologías, desde enfoques estadísticos tradicionales hasta algoritmos avanzados de aprendizaje automático, cada uno con fortalezas y limitaciones particulares.

Diversos investigadores han implementado sistemas basados en cadenas de Markov para recrear las características aleatorias esenciales a la utilización de estaciones de suministro eléctrico, extrayendo valor de registros cronológicos sobre desplazamientos para derivar estimaciones probabilísticas de necesidades futuras (Sokorai et al., 2018). Paralelamente, el examen detallado de secuencias temporales, mediante metodologías como el modelo ARIMA o técnicas de alisamiento exponencial ha permitido proyectar comportamientos de demanda a partir de tendencias históricas en los patrones de recarga (Xiong et al., 2018). Estas aproximaciones analíticas frecuentemente incorporan elementos externos como las variaciones meteorológicas y los ciclos estacionales o festivos para incrementar el nivel de exactitud en las proyecciones.

Los enfoques basados en modelos matemáticos dependen de una modelización matemática precisa del sistema y sus incertidumbres; sin embargo, el rendimiento de estos métodos puede verse gravemente afectado si las predicciones son inexactas (Fan et al., 2023), estos métodos tradicionales a menudo tienen dificultades para capturar las relaciones no lineales y las interdependencias complejas inherentes al comportamiento de carga de los vehículos eléctricos.

Los algoritmos de aprendizaje automático, particularmente las redes neuronales y las máquinas de vectores de soporte, han surgido como herramientas capaces de capturar estas complejidades y mejorar la precisión de la predicción (Basturk & Çetek, 2021). El uso de herramientas de aprendizaje automático es una forma eficiente de predecir cuánto tiempo estará ocupado un punto de carga en una estación (Aghsaee et al., 2023). Como se observa en la Figura 1, la adopción de vehículos eléctricos en México mantiene un crecimiento constante desde 2016, con un aumento significativo en los últimos años.

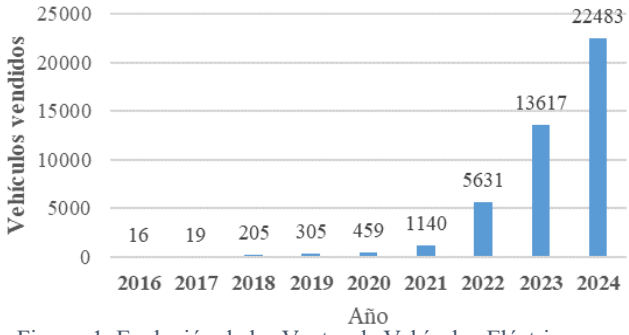


Figura. 1. Evolución de las Ventas de Vehículos Eléctricos en México (2016-2024) (fuente: INEGI, 2024).

Actualmente, los modelos existentes no contemplan las limitaciones de los cargadores disponibles ni diversos factores que influyen en la demanda de carga. Asimismo, implementan un enfoque fragmentado que optimiza de manera aislada el almacenamiento energético, los sistemas fotovoltaicos y los transformadores, en vez de hacerlo de manera interconectada en escenarios reales de funcionamiento (Yan & Ma, 2020).

Se presenta las diferentes tecnologías propuestas para solucionar el problema de la predicción de la demanda de estaciones de carga para vehículos eléctricos (figura 2).

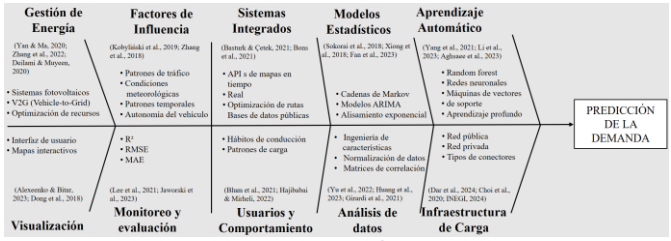


Figura 2. Soluciones para predicción de estaciones de carga de vehículos eléctricos (Fuente: Elaboración propia)

La tabla 1 muestra la distribución actual de la infraestructura de carga en México, destacando tanto la red pública como la privada.

Tabla 1. Datos clave sobre la infraestructura de carga en México (Electro Movilidad Asociación México, 2024)

Total			Var. % 3T24	Tipo de Conector		
				NACS/J3400	CSS1/J1772	GB/T
Red Pública						
DC	Ubicaciones	199	6.40%	35	74	90
	Posiciones	599	6.50%	188	129	282
AC	Ubicaciones	1105	0.18%	545	550	10
	Posiciones	2722	0.40%	1150	1546	26
	Total	3321	1.46%	1338	1675	308
Red Privada						
DC	Residencial	34,694	5.44%	34,694		
	Agencia VE	1,445	5.90%	8	1,437	0
	Corporativa	5,317	3.28%	12	4,450	855
AC	Agencias VE	93	29.00%	11	550	4
	Corporativa	185	18.50%	14	78	83
	Total	41,734	5.00%	45	88	942
Gran Total		45,055	4.98%	1,383	7,728	1,250

3. METODOLOGÍA

Se propone una metodología novedosa para predecir la demanda en estaciones de carga de vehículos eléctricos con el algoritmo Random Forest en conjunto con un enfoque integral

de ingeniería de características. Dicho algoritmo es reconocido por su capacidad para manejar relaciones no lineales, datos de alta dimensionalidad e interacciones complejas y permite manejar las complejidades como las de la demanda de carga de vehículos eléctricos (Yang et al., 2021).

3.1 Adquisición y Preprocesamiento de Datos

La etapa inicial implica la recopilación de datos relevantes de diversas fuentes. Esto incluye:

- **Datos históricos de carga**: Obtenidos de operadores de estaciones de carga, incorporando marcas de tiempo, consumo de energía, duración de carga e identificación de usuarios.
- **Datos de tráfico**: Información en tiempo real e histórica de agencias de transporte y servicios de monitoreo de tráfico, para capturar la influencia dinámica de los patrones de tráfico y los niveles de congestión en la demanda de carga.
- **Datos meteorológicos**: Para capturar la influencia de factores ambientales en el comportamiento de carga, incluyendo lecturas de temperatura por hora, niveles de precipitación y mediciones de irradiación solar.

Para el pre procesamiento de los datos se implementan técnicas que incluyen:

- **Limpieza de datos y detección de valores atípicos**: Se identifican y tratan los valores nulos mediante un análisis de completitud para determinar la proporción de datos faltantes en cada variable. Para la detección de valores atípicos, se utilizan diagramas de caja y métricas de dispersión como: Rango intercuartílico y desviación estándar (Tabla 2).

Tabla 2. Limpieza de datos ejecutada (Fuente: Elaboración propia)

Tiempo [S]	Velocidad [Km/h]	Elevación [m]	Acelerador [%]	Motor[Nm]	Acelerador Longitudinal [m/s^2]
0	0	585	3.03	0	-0.07
0.1	0	585	8.63	0	-0.07
0.2	0	585	11.34	1.72	-0.06
0.3	0	585	13.29	8.09	0.1
0.4	0	585	15.99	14.78	0.09

- **Normalización y escalado de datos**: Se aplica a transformar características numéricas en un rango estandarizado.
- **Codificación de características categóricas**: Mediante técnicas como one-hot encoding para variables categóricas discretas y codificación ordinal para aquellas con jerarquía inherente.

3.2 Ingeniería y Selección de Características

La ingeniería de características es crucial en la extracción de información significativa de los datos brutos y en la construcción de características importantes para mejorar el poder predictivo del modelo Random Forest.

Basado en las características de series temporales de los datos de carga, se crean características de retardo incorporando valores históricos de la demanda de carga en diferentes periodos, como retrasos por hora, día y semana, para capturar dependencias temporales y tendencias en el comportamiento de carga (Zhang et al., 2018).

Además, se incorporan características temporales, como hora del día, día de la semana y mes del año, para capturar el impacto de patrones temporales y estacionalidad en la demanda de carga (Kobyliński et al., 2019).

Se implementa una matriz de correlación para identificar las relaciones entre variables y facilitar la selección de características más relevantes, como se muestra en la Figura 3.

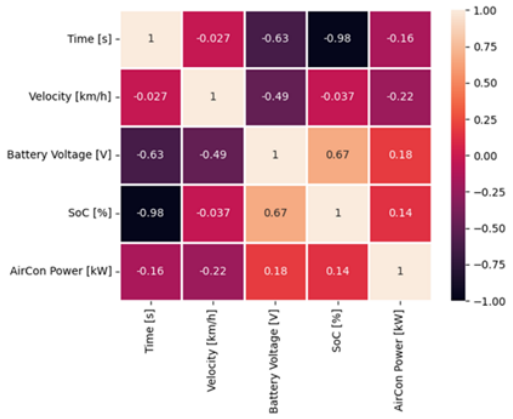


Figura 3. Matriz de correlación (Fuente: Elaboración propia)

Para modelar efectivamente las interacciones complejas entre varios factores, se crean características de interacción combinando características individuales destacadas. Por ejemplo, un término de interacción derivado de "hora del día" y "día de la semana" podría revelar cómo los patrones de carga fluctúan en diferentes días y horas, o una interacción entre "temperatura" y "duración de carga" podría mostrar cómo las temperaturas más frías podrían afectar las sesiones de carga (Yu et al., 2022).

Se aplican técnicas de selección de características para identificar las más relevantes y reducir la dimensionalidad del espacio de características, mejorando la interpretabilidad y generalización del modelo. La eliminación recursiva de características se utiliza para filtrar aquellas que contribuyen menos al entrenamiento y la predicción del modelo, aumentando así su precisión y estabilidad (Huang et al., 2023).

3.3 Entrenamiento y Validación del Modelo

El conjunto de entrenamiento se utiliza para entrenar el modelo Random Forest, el conjunto de validación para ajustar los hiperparámetros del modelo, y el conjunto de prueba para evaluar el rendimiento del modelo en datos no vistos.

Para este estudio, la distribución de los datos del conjunto 'Battery and Heating Data in Real Driving Cycles' (Steinstraeter et al., 2020), que contiene 72 viajes reales con aproximadamente 250,000 muestras, se hace una proporción de 70% (175,000 muestras) para entrenamiento, 15% (37,500 muestras) para validación y 15% (37,500 muestras) para prueba. Se implementa estratificación temporal para preservar

la representatividad de diferentes condiciones de conducción en los tres conjuntos.

El modelo Random Forest se entrena utilizando un enfoque de bagging, donde se construyen múltiples árboles de decisión en diferentes subconjuntos de los datos de entrenamiento, y la predicción final se obtiene promediando las predicciones de todos los árboles.

Se emplean técnicas de optimización de hiperparámetros, como búsqueda en cuadrícula y validación cruzada, para identificar el conjunto óptimo que maximizan la precisión predictiva y la capacidad de generalización del modelo. Las métricas de rendimiento, incluido el Error Medio Absoluto, Error Cuadrático Medio y R-cuadrado, se utilizan para evaluar el rendimiento del modelo en los conjuntos de validación y prueba. Este proceso ajusta meticulosamente parámetros como el número de árboles en el bosque, la profundidad máxima de cada árbol, el número mínimo de muestras requeridas para dividir un nodo interno y el número mínimo de muestras requeridas para estar en un nodo hoja (Girardi et al., 2021).

3.4 Implementación del Sistema de Navegación Inteligente

El modelo entrenado de Random Forest se implementa como parte de un sistema de navegación inteligente que recomienda rutas eficientes basadas en el estado de carga, consumo energético y disponibilidad de estaciones en México.

El sistema de navegación está diseñado para operar de manera eficiente y confiable en entornos dinámicos. Su arquitectura se divide en varias capas para garantizar un flujo de datos ordenado y escalable.

La interfaz de usuario del sistema se diseñó para ser intuitiva y funcional, permitiendo a los usuarios visualizar rutas optimizadas, recibir alertas de carga y obtener recomendaciones en tiempo real (Figura 4).



Figura 4. Interfaz de asignación de ruta/estación de carga. (Fuente: Elaboración propia)

Este sistema se integra con APIs de mapas y servicios en tiempo real para proporcionar información actualizada del tráfico, condiciones de carretera y disponibilidad de estaciones de carga.

La API de Open Charge Map (OCM) se utiliza para obtener información sobre las estaciones de carga disponibles, Google Maps Platform proporciona datos sobre tráfico y rutas. La información se recibe en formato JSON, se procesa para extraer coordenadas geográficas, tipo de acceso y disponibilidad en tiempo real (Figura 5).

```
PS C:\Users\danir\OneDrive\Escritorio\MI-Aula-Digital> &
C:/Users/danir/AppData/Local
Latitud: 20.407347, Longitud: -99.083439, Acceso: Public - Membership Required
Latitud: 20.384501, Longitud: -100.012926, Acceso: Public - Membership Required
Latitud: 20.393268, Longitud: -99.935790, Acceso: Public - Membership Required
Latitud: 20.459336, Longitud: -100.094445, Acceso: Private - For Staff, Visitors or Cl
Latitud: 20.253452727301677, Longitud: -99.92560026953546, Acceso: Public -
Membership
    var trafficLayer = new google.maps.TrafficLayer ();
    trafficLayer.setMap(map);
}
```

Figura 5. Archivo JASON de la información filtrada. (Fuente: Elaboración propia)

Para la consideración de la autonomía y planificación de rutas, se establece la distancia máxima permitida de acuerdo con la autonomía restante del vehículo. Este parámetro se ajusta continuamente para garantizar que el vehículo eléctrico llegue a una estación de carga.

La integración con Google Maps Traffic Layer proporciona datos en tiempo real del tráfico, lo que permite planificar rutas eficientes y evitar zonas con alta congestión.

3.5 Despliegue y Monitoreo

El modelo Random Forest entrenado se despliega como un servicio de predicción en tiempo real, proporcionando pronósticos dinámicos de demanda en estaciones de carga individuales o en una red de estaciones. El modelo se integra con una canalización de datos que recopila y preprocesa automáticamente datos de diversas fuentes, asegurando una actualización continua de las entradas del modelo.

Esta integración permitirá que el modelo se adapte a las condiciones cambiantes y mejore su precisión predictiva con el tiempo. Se puede desarrollar una aplicación web para predecir dinámicamente el ETA utilizando los modelos propuestos (Basturk & Çetek, 2021).

Las predicciones del modelo se visualizan en un tablero, proporcionando a los operadores de estaciones de carga información procesable para optimizar la asignación de recursos, gestionar la carga de la red y mejorar la experiencia del cliente. El rendimiento del modelo se monitorea continuamente utilizando una variedad de métricas, y se activa un reentrenamiento periódicamente para mantener la precisión y relevancia.

4. RESULTADOS ESPERADOS

La eficacia de la metodología propuesta de Random Forest se evaluará a través de una serie de experimentos utilizando datos reales de estaciones de carga. El rendimiento del modelo se comparará con modelos de referencia, como regresión lineal y reales de estaciones de carga. El rendimiento del modelo se comparará con modelos de referencia, como regresión lineal y modelos ARIMA, para evaluar su mejora relativa en la precisión de la predicción (Lee et al., 2021).

Las métricas de evaluación incluirán Error Medio Absoluto, Error Cuadrático Medio y R-cuadrado (R2), que proporcionan una evaluación integral de la precisión del modelo y la bondad de ajuste. Además, el rendimiento del modelo se evaluará bajo

diferentes escenarios, como horas pico de carga, fines de semana y días festivos, para evaluar su robustez y adaptabilidad a patrones de demanda variables.

Los resultados de los experimentos demostrarán la efectividad de la metodología propuesta para predecir con precisión la demanda de carga en estaciones de carga de vehículos eléctricos, proporcionando información valiosa para optimizar la asignación de recursos y mejorar la gestión de la red.

Los resultados del modelo Random Forest se representarán utilizando varios gráficos y diagramas para mejorar la comprensión y facilitar la interpretación. Por ejemplo, los gráficos de series temporales ilustrarán la capacidad del modelo para capturar tendencias temporales y estacionalidad en la demanda de carga, mientras que los diagramas de dispersión representarán la relación entre la demanda de carga predicha y real.

Se espera que el modelo desarrollado muestre una mejora sustancial en la precisión de predicción en comparación con los métodos de pronóstico tradicionales, con un margen de error máximo del 5%. Estas mejoras conducirán a una asignación de recursos más efectiva y reducción de costos de energía mejorando la estabilidad de la red eléctrica.

5. DISCUSIÓN

La propuesta metodológica presenta un enfoque integral para predecir la demanda en estaciones de carga de vehículos eléctricos utilizando un modelo Random Forest. Al integrar diversas fuentes de datos, diseñar características relevantes y emplear técnicas de aprendizaje automático, la metodología propuesta ofrece una solución prometedora para abordar los desafíos del pronóstico de demanda de carga de vehículos eléctricos.

La discusión se centrará en las implicaciones prácticas de la metodología propuesta para diversos actores en el ecosistema de carga de vehículos eléctricos:

Para los operadores de estaciones de carga, las predicciones precisas de demanda pueden permitir una asignación de recursos optimizada, reducción de costos de energía y mejora de la satisfacción del cliente. Pueden gestionar proactivamente la capacidad de la estación de carga y asegurar que haya suficientes recursos de carga disponibles para satisfacer las necesidades de los clientes (Choi et al., 2020).

Para los gestores de red, se puede facilitar una mejor integración de los vehículos eléctricos en la red al proporcionar información sobre la distribución temporal y espacial de la demanda de carga. Será posible optimizar las operaciones de la red, prevenir sobrecargas y mejorar la estabilidad de la red. A medida que la integración de vehículos eléctricos en la red eléctrica continúa creciendo, estrategias como la coordinación V2G se vuelven cada vez más importantes (Zhang et al., 2022).

Para los usuarios de vehículos eléctricos, reduce la incertidumbre respecto a la autonomía y la disponibilidad de estaciones de carga, consecuentemente disminuye la ansiedad por la autonomía y promueve una mayor adopción de la movilidad eléctrica. La capacidad de planificar rutas eficientes y localizar estaciones de carga disponibles mejora significativamente la viabilidad de los viajes de larga distancia en vehículos eléctricos.

6. CONCLUSIÓN

La propuesta metodológica presenta un marco robusto y completo para predecir la demanda en estaciones de carga de vehículos eléctricos utilizando un modelo Random Forest. La metodología propuesta aborda la necesidad crítica de pronósticos de demanda precisos en el panorama de carga de vehículos eléctricos en rápida evolución, proporcionando información valiosa para optimizar la asignación de recursos, gestionar la carga de la red y mejorar la experiencia del cliente (Abdel-Hakim & Abo-Elyousr, 2022; Chifu et al., 2024).

La combinación de diversas fuentes de datos, ingeniería de características avanzada y técnicas de aprendizaje automático robustas aseguran que el modelo pueda adaptarse a patrones de demanda variables y proporcionar predicciones confiables en diferentes escenarios.

Los resultados de esta investigación tienen el potencial de impactar en las operaciones de las estaciones de carga de vehículos eléctricos y la gestión de la red eléctrica (Jaworski et al., 2023; Wang et al., 2020). La capacidad de predecir con precisión la demanda de carga puede permitir una gestión adecuada de la capacidad de las estaciones de carga, reduciendo los tiempos de espera para los clientes y maximizando su utilización (Yao et al., 2017).

Al proporcionar a los gestores de red pronósticos precisos de la demanda de carga de vehículos eléctricos, la metodología propuesta puede facilitar una mejor integración de los vehículos eléctricos en la red, reduciendo el riesgo de sobrecargas y asegurando un suministro de energía estable (Alexeenko & Bitar, 2023). Además, el desarrollo de una herramienta de predicción fácil de usar puede capacitar a las partes interesadas para tomar decisiones informadas sobre las operaciones de las estaciones de carga y la gestión de la red, fomentando un ecosistema de carga de vehículos eléctricos más sostenible y eficiente (Dong et al., 2018).

La integración de más recursos de energía renovable es un factor muy importante para la adopción de vehículos eléctricos (Deilami & Muyeen, 2020), y la metodología propuesta puede contribuir a una gestión más eficiente de la energía renovable en el contexto de la carga de vehículos eléctricos.

REFERENCIAS

Abdel-Hakim, A. E., & Abo-Elyousr, F. K. (2022). Heuristic Greedy Scheduling of Electric Vehicles in Vehicle-toGrid Microgrid Owned Aggregators. Sensors, 22(6), 2408. https://doi.org/10.3390/s22062408

Aghsaee, R., Hecht, C., Schwinger, F., Figgener, J., Jarke, M., & Sauer, D. U. (2023). Data-Driven, Short-Term Prediction of Charging Station Occupation. Electricity, 4(2), 134. https://doi.org/10.3390/electricity4020009

Alexeenko, P., & Bitar, E. (2023). Achieving reliable coordin-

ation of residential plug-in electric vehicle charging: A pilot study. Transportation Research Part D Transport and Environment, 118, 103658. https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103658

Basturk, O., & Çetek, C. (2021). Prediction of aircraft estimated time of arrival using machine learning methods. The Aeronautical Journal, 125(1289), 1245. https://doi.org/10.1017/aer.2021.13

Blum, C., Liu, H., & Xiong, H. (2021). CoordiQ : Coordinated Q-learning for Electric Vehicle Charging Recommendation. arXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.2102.00847

Bons, P., Buatois, A., Schuring, F., Geerts, F., & Hoed, R. van den. (2021). Flexible Charging of Electric Vehicles: Results of a Large-Scale Smart Charging Demonstration. World Electric Vehicle Journal, 12(2), 82. https://doi.org/10.3390/wevj12020082

Choi, B.-G., Oh, B.-C., Choi, S., & Kim, S.-Y. (2020). Selecting Locations of Electric Vehicle Charging Stations Based on the Traffic Load Eliminating Method. Energies, 13(7), 1650. https://doi.org/10.3390/en13071650

Dar, A. R., Haque, A., Khan, M. A., Kurukuru, V. S. B., & Mehfuz, S. (2024). On-board chargers for electric vehicles: A comprehensive performance and efficiency review. Energies, 17, 4534. https://doi.org/10.3390/en17184534

Deilami, S., & Muyeen, S. M. (2020). An Insight into Practical Solutions for Electric Vehicle Charging in Smart Grid. Energies, 13(7), 1545. https://doi.org/10.3390/en13071545

Dong, M., Li, D., Chen, R., Shu, H., & He, Y. (2018). Coupling mechanism of electric vehicle and grid under the background of smart grid. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 121, 42032. https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/4/042032

Fan, J., Wang, H., & Liebman, A. (2023). MARL for Decentralized Electric Vehicle Charging Coordination with V2V Energy Exchange. arXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.2308.14111.

Girardi, I., Vagenas, P., Arcos-Díaz, D., Bessaï, L., Büsser, A., Furlan, L., Furlan, R., Gatti, M., Giovannini, A., Hoeven, E., & Marchiori, C. (2021). On the explainability of hospitalization prediction on a large COVID-19 patient dataset. arXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.2110.15002

Hajibabai, L., & Mirheli, A. (2022). A Game-Theoretic Approach for Dynamic Service Scheduling at Charging Facilities. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 23(12), 23919. https://doi.org/10.1109/tits.2022.3212017

Huang, H., Chen, H., Lin, W.-W., Huang, C.-J., Chen, Y.-C., Wang, Y.-H., & Yang, C. (2023). Employing feature engineering strategies to improve the performance of machine learning algorithms on echocardiogram dataset. Digital Health, 9. https://doi.org/10.1177/20552076231207589

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024). Registro Administrativo de la Industria Automotriz de Vehículos Ligeros. INEGI. https://www.inegi.org.mx/datosprimarios/iavl/

Jaworski, J., Zheng, N., Preindl, M., & Xu, B. (2023). Vehicleto-Grid Fleet Service Provision considering Nonlinear Battery Behaviors. arXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.2301.12041

Kobyliński, P., Wierzbowski, M., & Piotrowski, K. (2019). High-resolution net load forecasting for microneighbourhoods with high penetration of renewable energy sources. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 117, 105635. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105635

Lee, Z. J., Sharma, S., Johansson, D., & Low, S. H. (2021). ACN-Sim: An Open-Source Simulator for Data-Driven Electric Vehicle Charging Research. IEEE Transactions on Smart Grid, 12(6), 5113. https://doi.org/10.1109/tsg.2021.3103156

Sokorai, P., Fleischhacker, A., Lettner, G., & Auer, H. (2018). Stochastic Modeling of the Charging Behavior of Electromobility. World Electric Vehicle Journal, 9(3), 44. https://doi.org/10.3390/wevj9030044

Steinstraeter, M., Buberger, J., & Trifonov, D. (2020). Battery and Heating Data in Real Driving Cycles [Dataset]. IEEE Dataport. https://doi.org/10.21227/6jr9-5235

Yan, D., & Ma, C. (2020). Stochastic planning of electric vehicle charging station integrated with photovoltaic and battery systems. IET Generation Transmission & Distribution, 14(19), 4217. https://doi.org/10.1049/ietgtd.2019.1737

Yang, D., Sarma, N. J. S., Hyland, M., & Jayakrishnan, R. (2021). Dynamic modeling and real-time management of a system of EV fast-charging stations. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 128, 103186. https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103186

Yao, L., Damiran, Z., & Lim, W. H. (2017). Optimal Charging and Discharging Scheduling for Electric Vehicles in a Parking Station with Photovoltaic System and Energy Storage System. Energies, 10(4), 550. https://doi.org/10.3390/en10040550

Yu, Y., Mao, J., Nguyen, R., Tohmeh, A., & Yeh, H. (2022). Feature Construction and Selection for PV Solar Power Modeling. 90. https://doi.org/10.1109/adconip55568.2022.9894235

Zhang, C., Cao, L., & Romagnoli, A. (2018). On the feature engineering of building energy data mining. Sustainable Cities and Society, 39, 508. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.016

Zhang, Y., Chen, X., & Zhang, Y. (2022). Transfer Deep Reinforcement Learning-based Large-scale V2G Continuous Charging Coordination with Renewable Energy Sources. arXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.2210.07013

Design of a Control Strategy for a Magnetic Reciprocating Engine

Alegría Gómez, Raúl * **Espinosa Pedroza, Arturo Daniel** *
García Morales, Jarniel * **Escobar Jiménez, Ricardo Fabricio** *
Guerrero Ramírez, Gerardo Vicente *
Adam Medina, Manuel *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México. (e-mail: m24ce018, d22ce059, jarniel.gm, ricardo.ej, gerardo.gr, manuel.am@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: This article highlights the importance of speed control in magnetic reciprocating engines (MRE), which are emerging as a promising alternative to conventional internal combustion engines, helping to reduce pollutant emissions. The study compares two control strategies aimed at achieving efficient speed regulation. The first consists of a PID controller that regulates the supply voltage while keeping the energization angles constant, based on classical control techniques. The second approach uses an inverse neural network as a feedforward controller, aiming to enhance the performance achieved by the PID through modern control principles. By analyzing the behavior of both strategies, this research seeks to identify the most suitable one for practical implementation. The results contribute to the advancement of MREs as an energy-efficient and environmentally friendly solution for various technological and industrial applications.

Keywords: PID Control, FeedForward Neural Network Control, Artifitial Neural Network, Magnetic Reciprocant Engine.

1. INTRODUCCIÓN

Desde su invención, los motores de combustión interna han dominado el mercado automotriz, convirtiéndose hoy en día en una de las mayores fuentes de contaminación del aire a nivel mundial (Karagulian et al., 2015). A lo largo de la historia, se han desarrollado tecnologías para reducir la emisión de gases tóxicos, como la recirculación de Gases de Escape (EGR) (Kozina et al., 2020) , esta técnica regula las emisiones durante su formación, ayudando a reducir las emisiones de NO_x, combustibles alternativos, uso de combustibles como el gas natural licuado (LNG), biodiésel, metanol, hidrógeno y amoníaco en motores marinos y otros vehículos reduce significativamente las emisiones de NO_x y SO_x (Zhao et al., 2021) (Deng et al., 2020) y mejoras en la combustión (Witkowski, 2020) ajustando la inyección de combustible y el uso de mezclas de combustibles. Si bien, estas tecnologías si han contribuido a la reducción de gases productos de la combustión siguen siendo una fuente de contaminación.

En las últimas décadas, la creciente conciencia ambiental ha impulsado alternativas como los vehículos eléctricos (Vishnuram et al., 2023), los motores de hidrógeno y los motores recíprocos magnéticos. No obstante, la transición hacia los vehículos eléctricos enfrenta desafíos complejos, incluyendo limitaciones tecnológicas y económicas (Todorovic et al., 2023), lo que hace que opciones como los motores recíprocos magnéticos surjan como una solución prometedora. Estos motores aprovechan la infraestructura existente de los motores tradicionales de combustión, pero reemplazan el proceso de combustión por principios de repulsión y atracción magnética. En este diseño, se coloca un imán permanente de neodimio en la cabeza del pistón junto con un electroimán que genera las fuerzas necesarias para el movimiento. Investigaciones recientes (Rios-Enriquez et al., 2024) han demostrado mediante pruebas experimentales el potencial de estos motores en términos de torque y eficiencia térmica. Otros estudios teóricos (Morgado et al., 2022) (Tiwari et al., 2019) han explorado diferentes configuraciones, mientras que en el ámbito del control se han implementado estrategias basadas en redes neuronales para variar el ángulo de energización y así regular la velocidad del motor.

Entre las principales ventajas de los motores magnéticos se encuentra su capacidad para operar sin emisiones directas, su compatibilidad con componentes mecánicos existentes. Sin embargo, aún enfrentan desafíos importantes en térmicos de desarrollar controladores. En este trabajo se presenta un controlador PID y un controlador Feed-Forward Neural Network. El control PID se denomina acción de control proporcional-integral-derivativa (**PID**). Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales (Ogata, 1997). La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (1)$$

El control *FeedForward Neural Network* utiliza una Red Neuronal Inversa como controlador prealimentado. El objeto de los modelos neuronales en el caso de las unidades de control es anticipar la próxima condición del sistema al cabo de un cierto intervalo de tiempo (modelo directo), o las fuerzas necesarias para alcanzar ciertas condiciones de operación (modelo inverso). Para definir tales modelos se analizan sistemas lineales y no lineales (Giró et al., 2006). Si el modelo de la planta es lineal y posee inversa, entonces el cálculo analítico de esta inversa es inmediato. Incluso para modelos no lineales existen métodos analíticos para determinar su inversa (Rodil and Fuente, 2007).

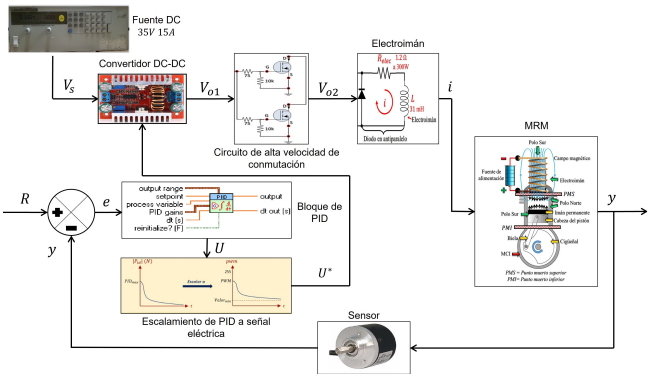


Fig. 2. Propuesta de solución

2. METODOLOGÍA

2.1 Problematica

La velocidad en el MRM depende de 2 variables, los ángulos de energización y la corriente en el electroimán.

Para el control de corriente hay que considerar la constante de tiempo de la parte eléctrica, y ver cómo afecta el controlar la corriente a el tiempo de magnetización y desmagnetización del imán. Además de como afectará a la fuerza magnética resultante que los ángulos estén fijos mientras la corriente varia.

En la Figura 1, se muestra la relación entre las 2 variables (ángulos y corriente) de las cuales depende la velocidad.

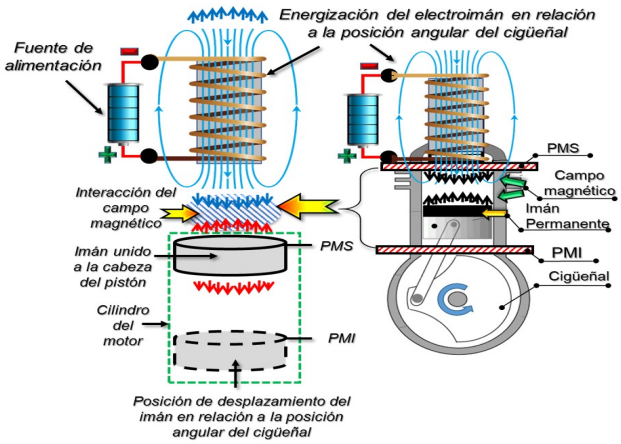


Fig. 1. Problemática en el MRM

2.2 Primera propuesta de solucion: PID de corriente

Para controlar la velocidad manipulando la corriente se desarrollo la el siguiente esquema como propuesta de solución de la Figura 2. Lo que se plantea es mantener los ángulos sean fijos y seguidamente manipular el voltaje que entra a el electroimán para indirectamente manipular la corriente, ya que la velocidad en el MRM depende del ángulo de energización y de la corriente en el electroimán.

Partiendo de la simplificación de tomar el circuito Resistor-Electroimán como un circuito RL de primer orden y de la consideración de que el valor de Resistencia total del circuito es la suma de la resistencia del resistor y la resistencia interna del solenoide, la corriente $i(t)$ en el electroimán para la fase de carga es:

$$i(t) = \frac{V_{\text{in}}}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right); R = R_{\text{resistor}} + R_{\text{solenoide}}, \quad (2)$$

Donde:

- $i(t)$: Corriente en función del tiempo
- V_{in} : Voltaje de entrada
- R : Resistencia total (2.5 Ω).
- R_{resistor} : Resistencia del resistor (1.2 Ω 300W)
- $R_{\text{solenoide}}$: Resistencia del solenoide (1.3 Ω)
- L : Inductancia (31mH)
- t : Tiempo

Al modificar el voltaje que entra en el electroimán estamos indirectamente modificando la corriente que circula por el. Y esta variación en el valor de corriente influye a su vez en el valor de la Fuerza del campo magnético generado. Esta relación podemos observarla en la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{B} = \frac{\mu_0 N_t I}{\ell_E}\boldsymbol{a}_z, \quad (3)$$

Donde:

- $\boldsymbol{B}$: Campo magnético
- μ_0 : Permeabilidad magnética en el vacío ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)
- N_t : Número de vueltas (714)
- I : Corriente eléctrica
- ℓ_E : Longitud del solenoide (0.09m)
- $\boldsymbol{a}_z$: Vector unitario en la dirección z

Para poder sintonizar controladores PID utilizando herramientas como el PIDtuner de matlab o las tablas Ziegler-Nichols o Cohen-Coon se utilizo la herramienta pidTuner para obtener una funcion de transferencia apartir de la respuesta de la velocidad del modelo del MRM ante un escalon de voltaje. La funcion de transferencia se observa en la Figura 3 y la comparacion de los diferentes PID sintonizados en la Figura 4.

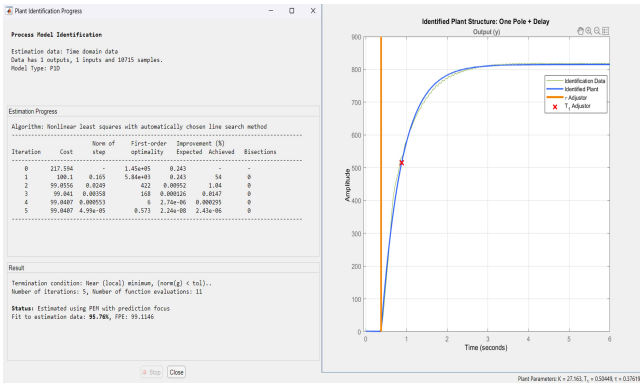


Fig. 3. Obtención de la FT a partir de la respuesta del Modelo del MRM.

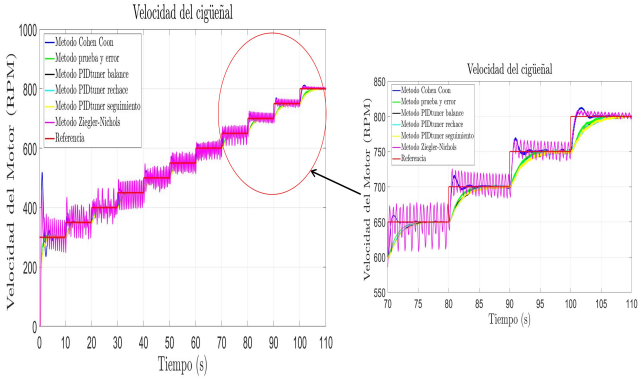


Fig. 4. Comparación de la respuesta de los PID en diferentes puntos de operación.

Se determino gráficamente y por medio de Indices de desempeño que el PID que presenta un mejor desempeño en el sistema es el Sintonizado a prueba y error.

2.3 Segunda propuesta de solucion: FFNN de corriente

Esta alternativa utiliza una RNA inversa como controlador prealimentado, esta estructura de control permite aligerar la carga de lazo cerrado, mejorar el seguimiento de referencia sin incrementar sensibilidad al ruido y no cambia las propiedades del sistema en lazo cerrado (Moreno et al., 2019), si bien no reduce el efecto de las perturbaciones esto no presenta un problema mayor para el sistema ya que el PID presente ya reduce bastante bien ese efecto.

Se determino que la construcción de la red neuronal debería ser a partir de las siguientes características.

- Capas ocultas: 1-3 capas
- Función de activación de capa oculta: ReLu o Tanh
- Función de activación de capa de salida: Lineal o Sigmoide+Escalado
- Datos de entrenamiento: Pares entrada-salida (Voltaje/Velocidad) históricos de 0% a 100% considerando el MRM sin carga.
- Función de costo: Error cuadrático medio (MSE)
- Optimizador en Python: Adam
- Optimizador en Matlab: Bayesian

Matlab cuenta con un *Toolbox* de *Deeplearning* para diseño de redes neuronales, sin embargo Python también es una opción atractiva debido a precisamente su enfoque en el *Deeplearning* con *Tensorflow*. Por esta razón se exploraron ambas opciones para la construcción de la RNA cuya estructura se observa en la Figura 5.

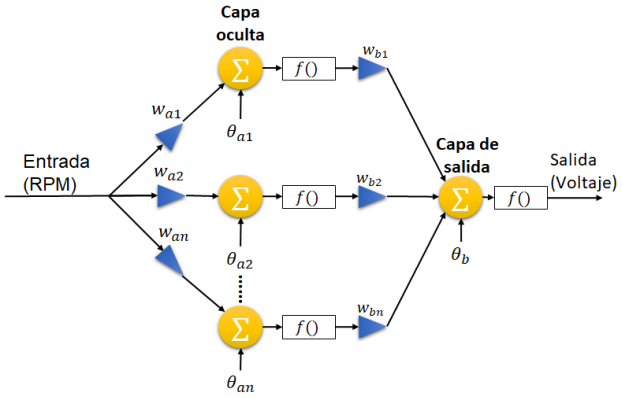


Fig. 5. Estructura de la RNA Inversa.

Se entrenaron distintos tipos de estructuras de RNA en Python, los resultados de estas pruebas se observan en las Tablas 1 y 2. La mejor estructura fue la 1-16-1.

Tabla 1. Resultados en datos de entrenamiento

Estructura	Función	Entrenamiento		
		MSE	MAE	RMSE
1-3-1	RELU	0.25	0.43	0.5
1-4-1	RELU	0.33	0.49	0.57
1-8-1	RELU	0.04	0.15	0.2
1-16-1	RELU	0.02	0.09	0.12
1-32-1	RELU	0.02	0.1	0.14
1-64-1	RELU	0.02	0.09	0.12
1-128-1	RELU	0.01	0.08	0.12
1-256-1	RELU	0.01	0.09	0.12
1-16-8-1	RELU	0.03	0.11	0.16
1-16-16-1	RELU	0.02	0.1	0.14

Tabla 2. Resultados en datos de prueba

Estructura	Función	Prueba		
		MSE	MAE	RMSE
1-3-1	RELU	3.01	1.31	1.73
1-4-1	RELU	1.14	0.85	1.07
1-8-1	RELU	0.19	0.36	0.44
1-16-1	RELU	0.08	0.24	0.29
1-32-1	RELU	0.52	0.56	0.72
1-64-1	RELU	0.15	0.32	0.39
1-128-1	RELU	0.16	0.32	0.4
1-256-1	RELU	0.16	0.33	0.4
1-16-8-1	RELU	0.18	0.33	0.42
1-16-16-1	RELU	0.12	0.29	0.35

Los resultados del entrenamiento se muestran en las Figuras 6 y 7. Al implementar la RNA en MATLAB, la respuesta en lazo abierto del modelo se presenta en la Figura 8.

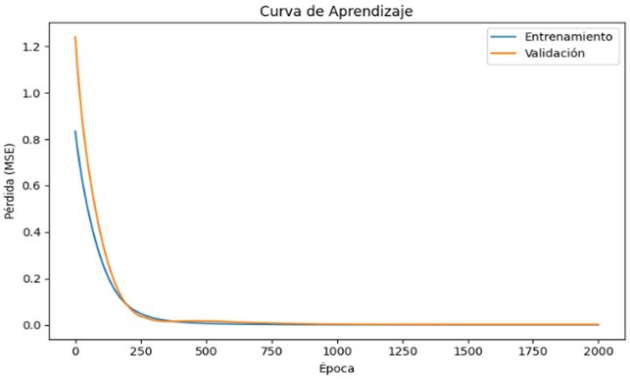


Fig. 6. Curva de Aprendizaje de la RNA en Python.

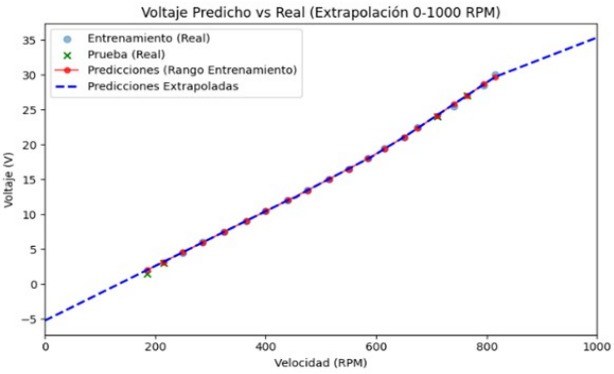


Fig. 7. FIT de la RNA en Python.

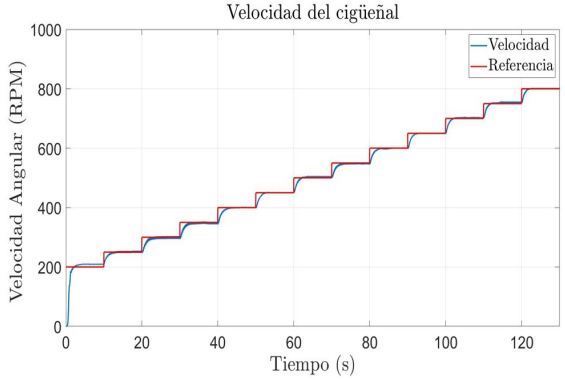


Fig. 8. Resultados del control Lazo Abierto en Simulink con la RNA entrenada en Python.

Utilizando el *Toolbox* de Matlab se tomaron como referencia las pruebas de la RNA en python para diseñar de igual forma una RNA 16-1 la cual puede observarse en la Figura 9 donde a diferencia de la entrenada en python la función de activación de la capa oculta es una Tanh. El proceso de entrenamiento de la RNA en MATLAB arrojó los resultados que se muestran en las Figuras 10 y 11. Posteriormente, al implementarla en el modelo dentro del mismo entorno, la respuesta en lazo abierto se presenta en la Figura 12.

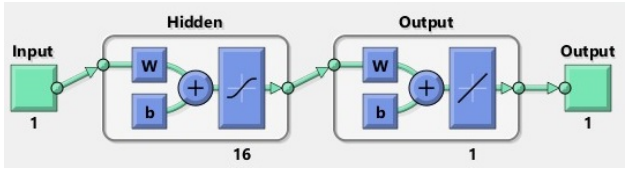


Fig. 9. Estructura de la RNA Inversa en Matlab *Toolbox*.

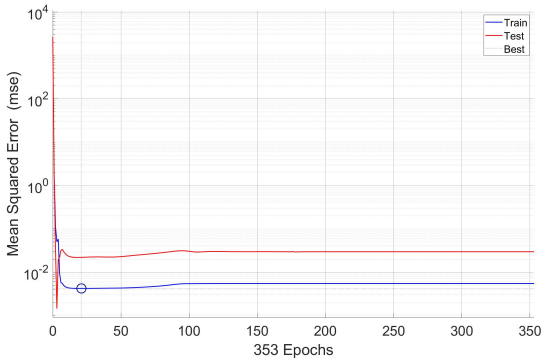


Fig. 10. Curva de Aprendizaje de la RNA en Matlab.

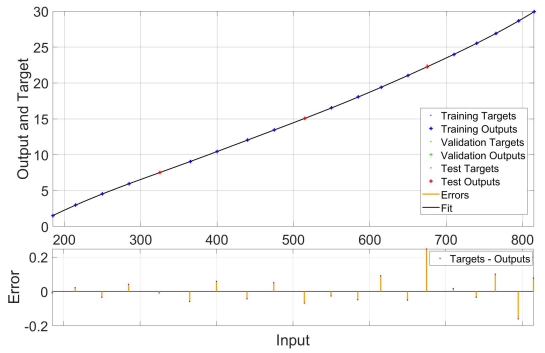


Fig. 11. FIT de la RNA en Matlab.

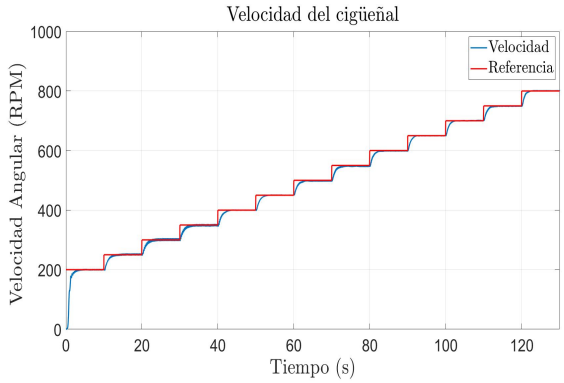


Fig. 12. Resultados del control Lazo Abierto en Simulink con la RNA entrenada en Matlab.

De forma gráfica se observa que la RNA del *Toolbox* de Matlab presenta mejor desempeño que la RNA de Python, por lo cual es la utilizada para el esquema final FFNN mostrado en la Figura 13, en dicho esquema se encuentran en paralelo la RNA con el PID sin embargo la acción

de control total se multiplica por una ganancia la cual determina el "Factor de mezcla", es decir que tanto peso tiene cada acción de control en la final, la ecuación 4 expresa la ley de control total.

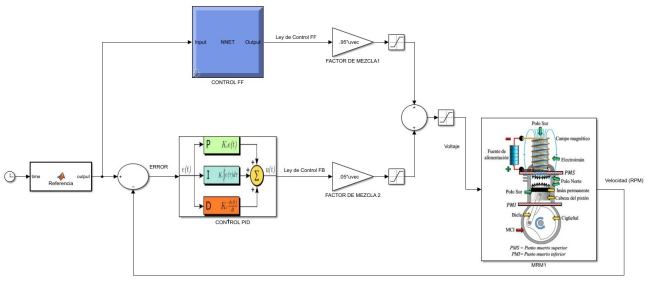


Fig. 13. Estructura de Control *FeedForward* y con un factor de mezcla en Simulink.

$$u_{\text{Total}} = (u_{\text{FF}} \cdot K_1) + (u_{\text{PID}} \cdot K_2) \tag{4}$$

Donde:

- K1: Factor de Mezcla FF (0.95 = 95%)
- K2: Factor de Mezcla PID (0.05 = 5%)

$$u_{\text{PID}} = e\left(P + I\frac{1}{s} + D\frac{N}{1 + N\frac{1}{s}}\right) \tag{5}$$

Donde:

- e: Error
- P: Ganancia Proporcional (0.06)
- I: Ganancia Integral (0.1)
- D: Ganancia Derivativa (0.0001)
- N: Coeficiente del Filtro (100)

$$u_{\text{FF}} = w_2 \cdot \tanh(w_1 x + b_1) + b_2 \tag{6}$$

Donde:

- x : Entrada (Referencia) (1x1)
- w1: Matriz de pesos de la capa oculta (16x1)
- b1: Vector de sesgos de la capa oculta (16x1)
- w2: Matriz de pesos de la capa de salida (1x16)
- b2: Vector de sesgos de la capa de salida (1x1)

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

En las Figuras 14 y 16 se observa que el comportamiento de la velocidad es prácticamente similar. Sin embargo, las Figuras 15 y 17 evidencian una diferencia significativa en la Ley de Control.

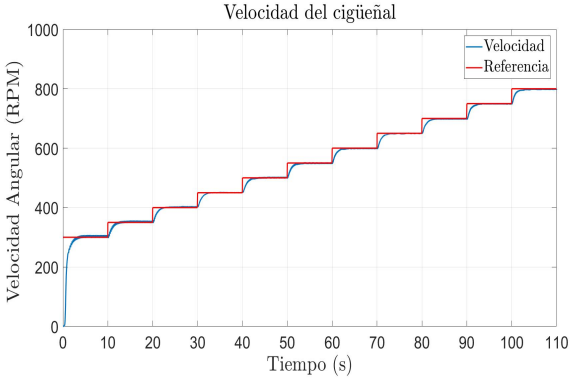


Fig. 14. Velocidad con control *FeedForward* en Simulink.

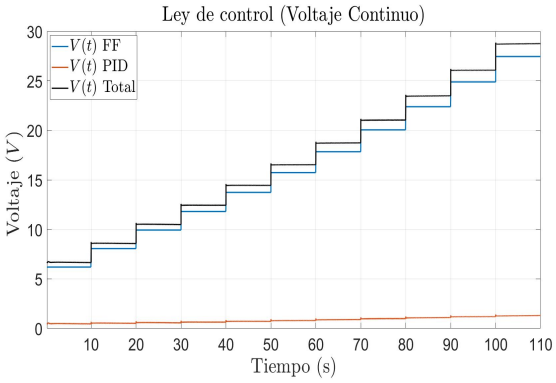


Fig. 15. Ley de control con *FeedForward* en Simulink.

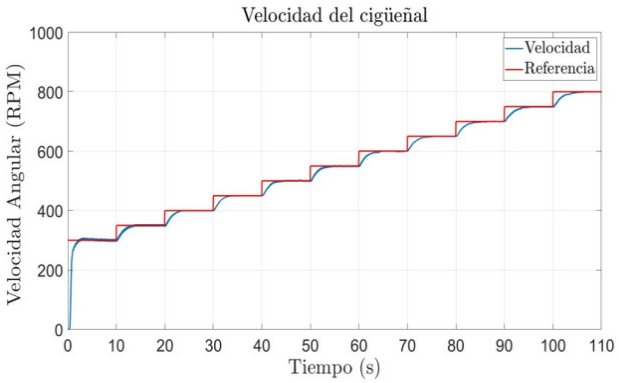


Fig. 16. Velocidad con control *FeedBack* en Simulink.

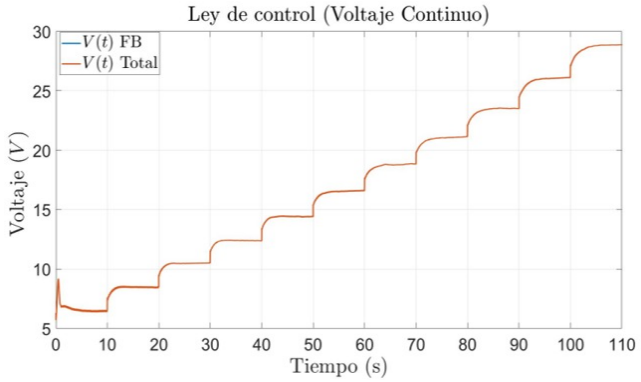


Fig. 17. Ley de control con *FeedBack* en Simulink.

En la Figura 17, donde únicamente se emplea el controlador *Feedback* (PID), este asume toda la carga del sistema. Se aprecia que, debido al error inicial elevado, la Ley de Control experimenta un sobretiro en el primer instante. No obstante, en la respuesta de velocidad no se presenta sobretiro, lo cual es un aspecto clave.

Por otro lado, en la Figura 15, el controlador *FeedForward* asume la mayor parte de la carga, mientras que el controlador *Feedback* (PID) se limita a realizar ajustes finos para corregir el error en estado estacionario. Como resultado, prácticamente desaparece el sobretiro de voltaje presente en la Figura 17, y se alcanza el voltaje requerido con mayor rapidez en comparación con el uso exclusivo del controlador *Feedback* (PID).

4. CONCLUSIONES

La red neuronal *feedforward* (FFNN) logró igualar e incluso superar ligeramente el rendimiento del controlador PID de corriente, reduciendo significativamente la carga computacional en el lazo cerrado sin comprometer la estabilidad del sistema. Además, permitió alcanzar el voltaje requerido de manera más rápida y precisa. Dado que la red fue entrenada fuera de línea, su implementación no requiere un uso excesivo de memoria, ya que los pesos sinápticos y sesgos permanecen fijos, concentrando la mayor demanda computacional en la fase de entrenamiento.

No obstante, esta estrategia no es perfecta y presenta una limitación importante. El entrenamiento *offline* se realizó con datos de voltaje y velocidad obtenidos bajo un ángulo fijo de energización y apagado además de considerar que no hay una carga. Por tanto si el ángulo varía o se añade una carga, la relación entre voltaje y velocidad también cambia, lo que podría hacer que la red neuronal se vuelva obsoleta. En consecuencia, el voltaje calculado para alcanzar una velocidad específica podría ser incorrecto, requiriendo una mayor intervención del PID para corregir el error de la red neuronal.

Lo anterior sin embargo puede corregirse al utilizar una RNA con entrenamiento *online* e incluso utilizando primero el entrenamiento *offline* para obtener un valor inicial de los pesos sinápticos lo más cercanos a la solución requerida bajo las condiciones en el momento del arranque y si las condiciones de angulo o carga cambian con el MRM en uso entonces la RNA modifique sus pesos de forma *online*.

Otra limitación es que este esquema es ideal para entornos controlados sin perturbaciones inesperadas, debido a que por el factor de mezcla el cual limita la acción del PID a un 5% eso hace que en caso de perturbaciones agregadas el PID no pueda corregir totalmente el efecto de la perturbación, esto si es posible con otro esquema donde el PID tenga un 100% de acción y el FF tenga menor % de acción, sin embargo esto afectaría a que probablemente no se llegue de forma instantánea a la referencia de voltaje como si lo hace este esquema, pero haría que el PID mantenga toda la robustez para compensar las perturbaciones.

REFERENCIAS

Deng, J., Wang, X., Wei, Z., Wang, L., Wang, C., and Chen, Z. (2020). A review of nox and sox emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels. *The Science of the total environment*, 766, 144319. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144319.

Giró, J., Olariaga, S., Paez, N., Garcia, A., and Vuirli, A. (2006). Definición y evaluación de modelos neuronales para sistemas de control. In *Jornadas Argentinas de Robótica (JAR)*. Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina.

Karagulian, F., Belis, C., Dora, C., Prüss-Ustün, A., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., and Amann, M. (2015). Contributions to cities' ambient particulate matter (pm): a systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, 120, 475–483. doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2015.08.087.

Kozina, A., Radica, G., and Nižetić, S. (2020). Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121105. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121105.

Moreno, L., Garrido, S., and Copaci, D. (2019). Control inteligente: Control con redes neuronales l10. [Material de clase].

Morgado, J.E., Enojas, M.J.B., Bongao, H.C., Bongao, H.L.C., Rufo, J.C., Arribas, R.G., Cruz, C.D.M., Gaza, M.D.S., and Icuspit, C.P. (2022). Design and fabrication of improved v-8 solenoid engine with splash lubrication system. In *2022 IEEE Symposium on Industrial Electronics Applications (ISIEA)*, 1–4. doi: 10.1109/ISIEA54517.2022.9873757.

Ogata, K. (1997). *Ingeniería de control moderna*. Prentice Hall, México, 3ª ed. edition.

Rios-Enriquez, C., Adam-Medina, M., García-Morales, J., Guerrero-Ramírez, G.V., and Cervantes-Bobadilla, M. (2024). Modeling and simulation of a magnetic reciprocating engine. *IEEE Access*, 12, 34863–34876. doi:10.1109/ACCESS.2024.3372014.

Rodil, S.S. and Fuente, M.J. (2007). Control imc no lineal tolerante a fallos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 4(2), 52–63.

Tiwari, A., Singh, A., Agarwal, D., and Verma, A.K. (2019). Design and fabrication of 4-stroke solenoid engine. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 6(12).

Todorovic, M., Aldakkhelallah, A., and Simic, M. (2023). Managing transitions to autonomous and electric vehicles: Scientometric and bibliometric review. *World Electric Vehicle Journal*. doi:10.3390/wevj14110314.

Vishnuram, P., R., N., P., S., K, V., Bajaj, M., Khurshaid, T., Nauman, A., and Kamel, S. (2023). A comprehensive review on ev power converter topologies charger types infrastructure and communication techniques. 11. doi: 10.3389/fenrg.2023.1103093.

Witkowski, K. (2020). Research of the effectiveness of selected methods of reducing toxic exhaust emissions of marine diesel engines. *Journal of Marine Science and Engineering*. doi:10.3390/jmse8060452.

Zhao, J., feng Wei, Q., Wang, S., and Ren, X. (2021). Progress of ship exhaust gas control technology. *The Science of the total environment*, 799, 149437. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149437.

Design and Implementation of a Steer-by-Wire System with CAN Bus Communication and Fault Detection

Juan Daniel Soriano-Colmenares * **Arturo Hernández-Méndez** * **José Antonio Moreno** * **Carlos García-Rodríguez** *

* *Universidad Tecnológica de la Mixteca, Av. Doctor Modesto Seara Vázquez No.1, Acatlima, Heroica Ciudad de Huajuapan de León Oax., C.P. 69004, México (e-mail: sorianojuan28@gmail.com, arturohm54, jamoreno, sofosmaster@mixteco.utm.mx).*

Abstract: In this work, a steer-by-wire (SbW) prototype is designed and built. This system consists of two modules: the first controls the angular position and feedback torque from the steering wheel to the driver, the second controls the angular position and torque assistance at the wheels. Both modules operate with traditional decentralized PID controllers that use a CAN bus to close the control loop. The electronic control modules are based on the Tiva C board (EK-TM4C123GXL). In addition to offering road feel feedback and return-to-center functionality, this prototype also provides an over-current detection system for any of the motors. A graphical interface based on Matlab's App Designer is used to visualize the variables of this experimental platform.

Keywords: Steer-by-wire (SbW) technology, steering control, Electric Power Steering System, automotive applications, Force Feedback, Fault Detection.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, los sistemas de dirección automotrices han estado dominados por tecnologías mecánicas e hidráulicas. Recientemente, la asistencia eléctrica ha ganado popularidad, aunque generalmente se conserva un acoplamiento mecánico entre el volante y las ruedas. La eliminación de este acoplamiento a través de los sistema *steer-by-wire* ofrece ventajas significativas en términos de rendimiento, peso, espacio, diseño y una mejor integración con sistemas avanzados de asistencia y conducción autónoma. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos como el diseño de esquemas de control descentralizados, el establecimiento de enlaces de comunicación eficientes y la emulación del comportamiento mecánico. Además, debido a la importancia crucial del sistema de dirección, se suele incorporar redundancia para garantizar la fiabilidad. La tecnología steer-by-wire se ha modificado con el tiempo y ha abordado diferentes enfoques, por ejemplo en Figueiredo (Quito, abril de 2008) se realiza un estudio centrado en el desarrollo de un sistema de dirección completamente electrónico, eliminando la conexión mecánica entre el volante y las ruedas. Se incluyen especificaciones sobre retroalimentación de fuerza, control de posición de los motores y monitoreo del sistema. En Tavoosi & Hosseini (2014) se propone un algoritmo de control para mejorar la maniobrabilidad del vehículo mediante la aplicación de un ángulo de corrección en las ruedas dirigidas, basado en teoría óptima y adaptativa. Por otro lado, Sahboun & Emhemed (2022) implementan un sistema de dirección steer-by-wire sin conexión mecánica, empleando controladores PID cuyo desempeño es optimizado ajustando las ganancias a través de la técnica PSO (Particle Swarm Optimization). Los resultados muestran un buen desempeño del sistema ante seguimiento y perturbaciones externas. Sin embargo, en este trabajo no se aborda el diseño del enlace de comunicaciones requerido para este tipo de sistemas. Los investigadores Albadri & Basargan (2022) proponen un esquema de control para dirección steer-by-wire, diseñado para seguir trayectorias de manera autónoma. Se realiza un estudio detallado de la dirección en función de las dimensiones del vehículo, obteniendo un modelo mecánico y eléctrico completo con parámetros nominales definidos. Se implementa un controlador LQR para la dirección y un control predictivo basado en modelo (MPC) para la referencia de trayectoria del vehículo. Las simulaciones confirman que el esquema de control sigue el trayecto con un error mínimo en diversos escenarios de prueba. Por otro lado, Husain et al. (2023) presentan un esquema de modos deslizantes integral aplicado a un sistema de dirección steer-by-wire, en el cual se reduce sustancialmente el umbral de deslizamiento para minimizar el efecto de rizado característico del control por modos deslizantes. Sin embargo, esta reducción conlleva altas frecuencias de conmutación. Se establecen distintos escenarios de prueba, entre ellos: seguimiento de una referencia sinusoidal, con variaciones en el índice de fricción del camino; trayectoria de seguimiento con incremento en la referencia de posición angular, seguido de una disminución abrupta; y aplicación de una referencia de posición angular junto con una perturbación externa, simulando una banqueta o una roca en el camino. Los resultados obtenidos indican un

buen desempeño del sistema; no obstante, no se menciona el diseño del enlace de comunicación entre el control del volante y el control de las ruedas. Recientemente Kun & Chenxu (2025) investigan la interacción entre el conductor y el sistema de asistencia avanzada (ADAS) en vehículos inteligentes. Se diseña un controlador basado en lógica difusa y modos deslizantes para mejorar la coordinación entre el conductor y la máquina. En este contexto, a continuación se describe la formulación del problema, seguido del diseño conceptual de la plataforma. Luego, se presenta el dimensionamiento y la construcción de los subsistemas mecánicos, para dar paso a la ley de control y al diseño y construcción del subsistema electrónico de control. Finalmente, se exponen los principales resultados experimentales y las conclusiones.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo principal es diseñar y construir un sistema de dirección automotriz de tipo steer-by-wire, compuesto por dos subsistemas: *el del lado del volante, SLV*, que debe contar con el volante de dirección governado por una unidad controladora electrónica con un motor de retroalimentación al conductor, un sensor de posición y un sensor de la corriente del motor, además de contar con un módulo de comunicación CAN (Controller Area Network); y *el del lado de la rueda, SLR*, el cual será un sistema compuesto por un módulo de control electrónico con capacidad de comunicación CAN que controle al motor de dirección con los respectivos sensores de posición de las ruedas y de corriente del motor de dirección. Cada subsistema contará con un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo), los cuales estarán enlazados mediante el bus de comunicación CAN. El sistema propuesto debe contar con un adecuado desempeño de asistencia de conducción y con una capacidad de respuesta aceptable en el seguimiento del ángulo de ataque de las ruedas. Además, de contar con la realimentación de sensación de manejo y brindar seguridad ante ciertos escenarios de falla que lo harán confiable para el conductor. La metodología para la síntesis del sistema embebido de control y comunicación de esta dirección steer-by-wire se basa en el proceso de desarrollo de hardware y software para sistemas electrónicos embebidos y de seguridad crítica, presentado por Pérez et al. [35]. El ciclo de desarrollo de la metodología consta de 7 fases, las cuales se muestran en la Figura 1.

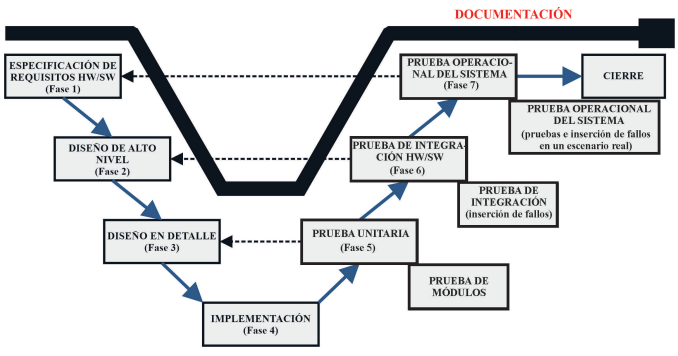


Fig. 1. Ciclo de desarrollo clásico en V para sistemas electrónicos embebidos

3. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLATAFORMA

Inicialmente se establecen especificaciones, características generales y de desempeño mediante una adaptación del estándar IEEE-830. Los aspectos a considerar del estándar con respecto al trabajo son: perspectiva del sistema Steer-by-Wire, funcionalidad del prototipo, requerimientos específicos, características de los usuarios, diseño conceptual y restricciones. Parte del diseño conceptual del cual se parte para desarrollar esta plataforma se plasma en la Figura 2.

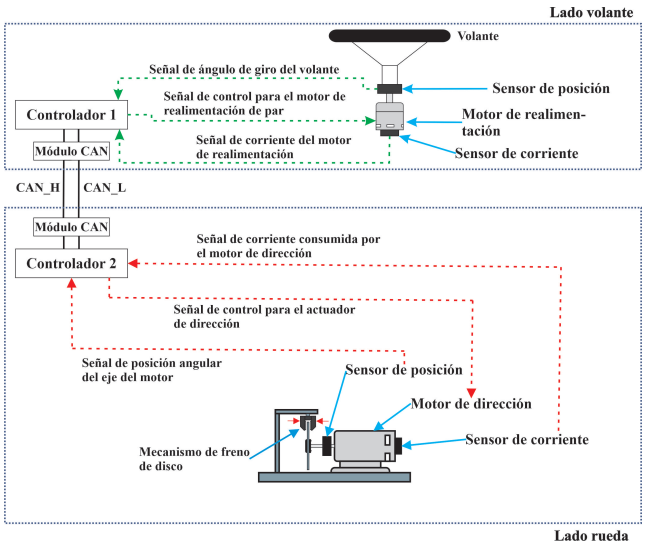


Fig. 2. Esquema del diseño a seguir en el prototipo

4. CONSTRUCCIÓN DE LOS SUBSISTEMAS MECÁNICOS

El diseño asistido por computadora (CAD, Computer-Aided Design) se realizó utilizando el software SolidWorks. La estructura diseñada del SLV incorpora dos soportes en forma de "L" y dos bisagras compatibles con perfiles de aluminio 2020. Algunos componentes fueron fabricados específicamente para este proyecto, como el engranaje que se acopla al piñón. Este elemento mecánico cuenta con 60 dientes completos, lo que permite que el piñón realice cuatro vueltas. Su fabricación se llevó a cabo mediante impresión 3D. El diseño final de estos elementos, así como su construcción, se presentan en las Figuras 3 y 4.

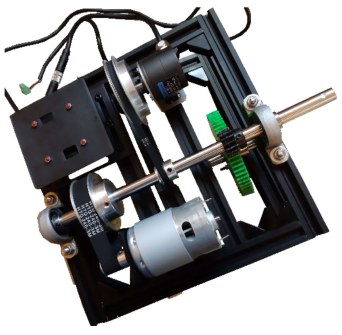


Fig. 3. Implementación del SLV.

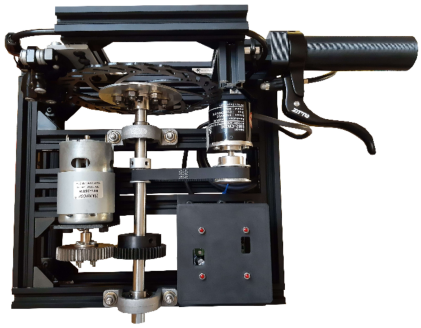


Fig. 4. Implementación del SLR.

5. DISEÑO DE LEYES DE CONTROL

La dirección steer-by-wire es un sistema interconectado de dos motores CD. El motor acoplado al volante se controla para tener una realimentación de par. La realimentación está en función de la corriente consumida por el otro actuador. Mientras tanto, el motor del SLR se controla para igualar la posición angular del volante. El modelo matemático del sistema del lado del volante (SLV) está definido por

$$J_V \frac{d^2\theta_{SLV}}{dt^2} = \tau_{conductor} + K_{m,V}\, i_{SLV} - B_V \frac{d\theta_{SLV}}{dt} \quad (1)$$

$$L_V \frac{di_{SLV}}{dt} = u_{SLV} - R_V\, i_{SLV} - K_{e,V} \frac{d\theta_{SLV}}{dt} \quad (2)$$

y el modelo para el sistema del lado de las ruedas (SLR) está dado por

$$J_R \frac{d^2\theta_{SLR}}{dt^2} = K_{m,R}\, i_{SLR} - B_R \frac{d\theta_{SLR}}{dt} + \tau_{camino} \quad (3)$$

$$L_R \frac{di_{SLR}}{dt} = u_{SLR} - R_R\, i_{SLR} - K_{e,R} \frac{d\theta_{SLR}}{dt} \quad (4)$$

donde las variables i_{SLV} y i_{SLR} son las corrientes de armadura de cada motor, R_x, L_x, J_x, B_x, $K_{m,x}$ y $K_{e,x}$ son la resistencia e inductancia de armadura, la inercia del rotor, el coeficiente de fricción viscosa, y las constantes mecánica y eléctrica de los motores de CD, respectivamente. Por otro lado, τ_{camino} es el par de carga ejercido por el camino sobre las ruedas, $\tau_{conductor}$ es el par ejercido por el conductor sobre el volante. Los voltajes de control de cada motor son u_{SLV} y u_{SLR}. Se propone entonces las siguientes leyes de control para la regulación de la retroalimentación al conductor y para la regulación de la asistencia de par en la orientación de las ruedas del auto,

$$u_{SLV} = k_{pV}(i^*_{SLV} - i_{SLV}) + k_{dV}\frac{d}{dt}(i^*_{SLV} - i_{SLV}) + k_{iV}\int_0^t (i^*_{SLV} - i_{SLV})dt \quad (5)$$

$$i^*_{SLV} = K_{retorno}(\theta_{SLV} - \theta_{central}) + k_{adj}\, i_{SLR} \quad (6)$$

$$u_{SLR} = k_{pR}(\theta_{SLV} - \theta_{SLR}) + k_{dR}\frac{d}{dt}(\theta_{SLV} - \theta_{SLR}) \quad (7)$$

$$+ k_{iV}\int_0^t (\theta_{SLV} - \theta_{SLR})dt \quad (8)$$

donde el término $K_{retorno}(\theta_{SLV} - \theta_{central})$ es la fuerza de restitución del volante a la posición central, modelada como un resorte torsional de constante $K_{retorno}$. En este caso la posición central, $\theta_{central}$, es cero. El par de retroalimentación de las ruedas hacia el volante está dado por el término $k_{adj} i_{SLR}$, donde la constante k_{adj} sirve para ajustar de forma proporcional este par como una referencia de corriente al controlador del módulo SLV. Las constantes de los controladores PID para cada motor son k_{pV}, k_{dV}, k_{iV} para el SLV y k_{pR}, k_{dR} y k_{iR}) para el SLR. Utilizando estas ecuaciones se simula en MatLab Simulink el sistema interconectado para un análisis preliminar de desempeño (Figura 5). La cual se realiza a 1e-4s de tiempo de muestreo utilizando el método de Euler. Las ganancias de los dos controladores PID se establecen utilizando la librería de sintonización PID de MatLab y sirven como base en el prototipo experimental. Se establece una trayectoria de referencia de posición angular y se aplica una perturbación de par en el intervalo de tiempo de [6, 12.5] segundos, al mismo tiempo se comprueba el desempeño del control de retorno a la posición central del volante.

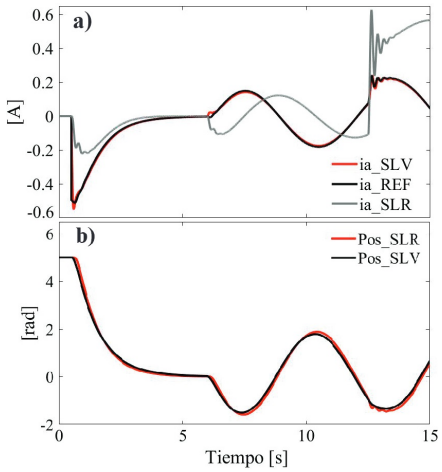


Fig. 5. Resultados de la simulación a) control de corriente eléctrica y b) control de posición angular.

6. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS MÓDULOS ELECTRÓNICOS DE CONTROL

Tanto el subsistema SLV como el SLR se han diseñado y construido cada uno con su propio módulo electrónico de control. Cada módulo incluye la electrónica de potencia e instrumentación para el manejo de los motores de CD, así como el soporte para la programación del algoritmo de supervisión y control, y del enlace entre los módulos a través del protocolo CAN. Estos módulos de control están basados en la tarjeta LaunchPad de Texas Instruments Tiva C TM4C123G, la cual posee características adecuadas para el control de motores como son su frecuencia de reloj de 80 MHz, su interfaz para leer de forma incremental codificadores de posición en cuadratura, sus diversas salidas con modulación por ancho de pulso (PWM, Pulse Width Modulation) y sus módulos convertidores análogo-digital, además de proporcionar puertos de comunicación CAN y de comunicación serial asíncrona (UART, Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Las Figuras 6 y 7 describen de forma esquemática cómo está programado el algoritmo de control y cómo están organizados tanto los recursos de la tarjeta Tiva como algunos otros elementos adicionales como el sensor de temperatura del motor. Las Figuras 8 y 9 muestran la construcción física de estos módulos y sus periféricos. La lógica de control para ambos

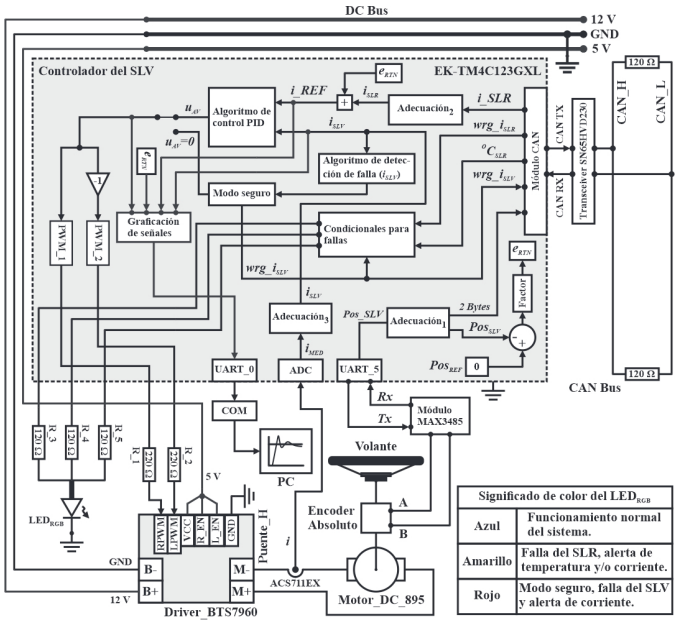


Fig. 6. Circuito electrónico y diagrama a bloques del controlador para el SLV.

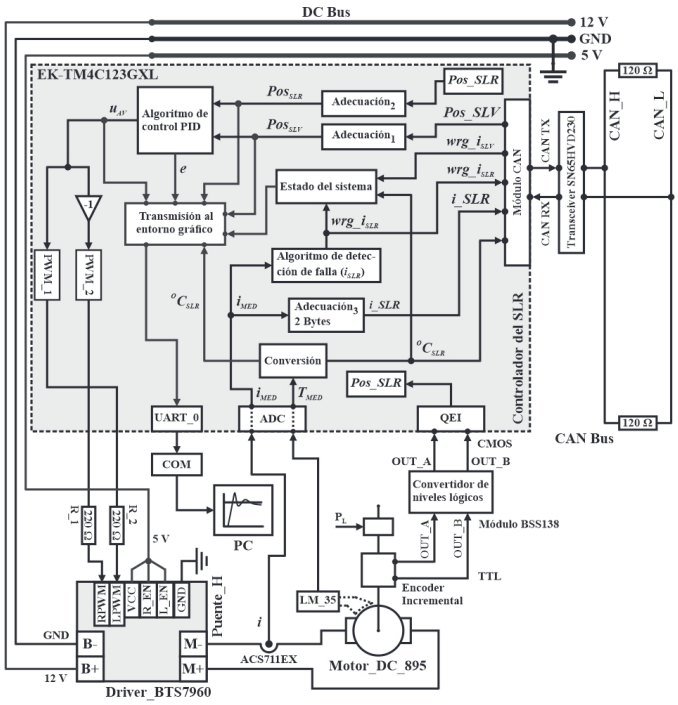


Fig. 7. Circuito electrónico y diagrama a bloques del controlador para el SLR.

subsistemas se muestra en los diagramas de flujo de las Figuras 10 y 11. Finalmente, el prototipo de dirección Steer-by-Wire construido con los subsistemas SLV y SLR descritos se muestra en la Figura 12.

7. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para evaluar el desempeño del sistema se proponen los siguientes escenarios de prueba: seguimiento con perturbación de par en SLR (Figuras 13-14) y detección de falla de sobre-corriente de motor del SLV Figura 15 a) y b).

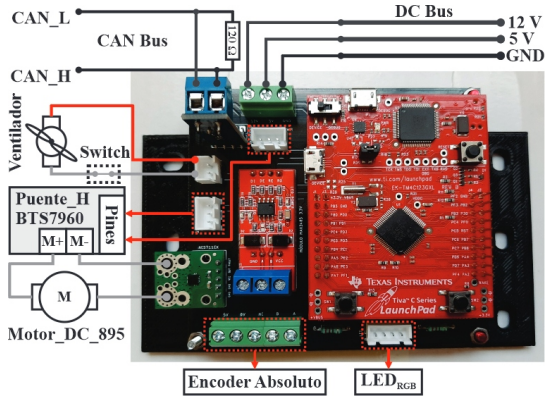


Fig. 8. Periféricos y conexiones de la unidad central del SLV.

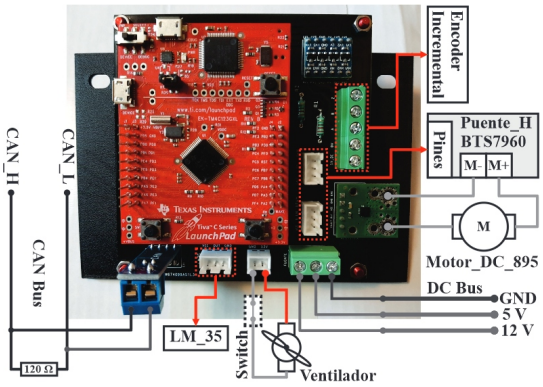


Fig. 9. Periféricos y conexiones de la unidad central del SLR.

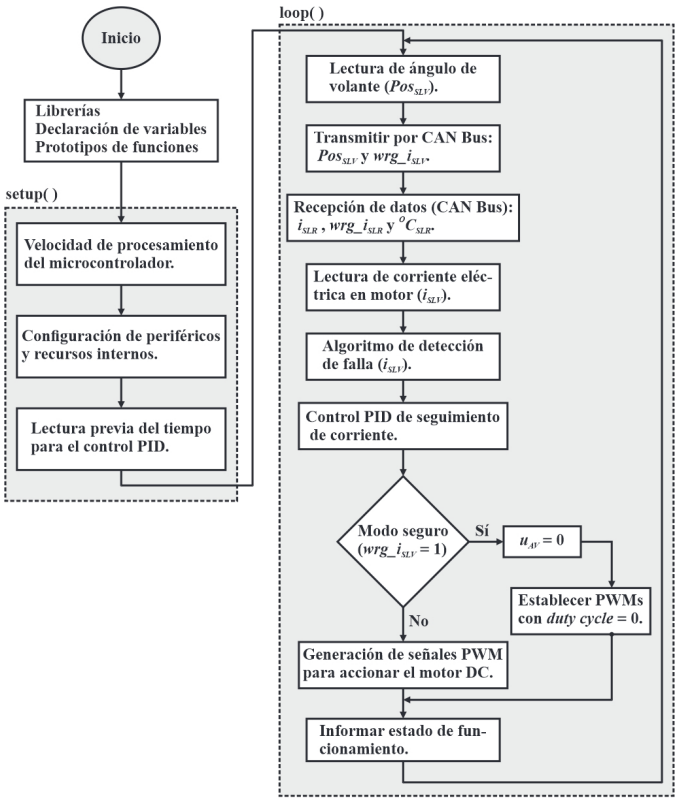


Fig. 10. Diagrama de flujo del código para el SLV.

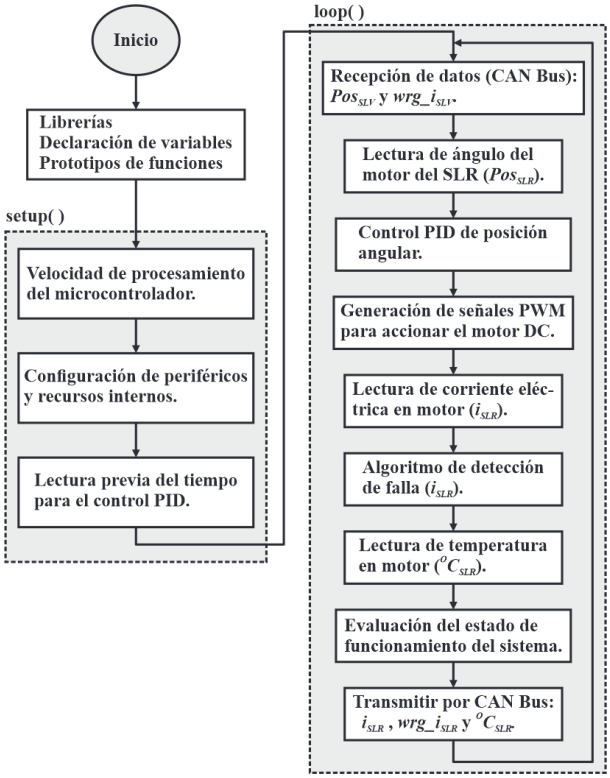


Fig. 11. Diagrama de flujo del código para el SLR.

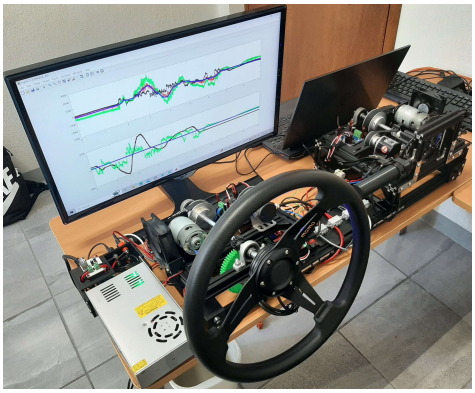


Fig. 12. Prototipo de dirección steer-by-wire.

7.1 Pruebas en operación normal

En esta prueba se realizan giros a ambos lados del volante (slalom) aplicando perturbaciones intermitentes en el SLR. En el SLV se prueba el control de retorno a posición central y el seguimiento de la referencia de corriente que se establece a partir de la corriente medida en el SLR (ver Figura 13). La Figura 14 se muestra el desempeño del control de regulación de posición angular en el SLR y el porcentaje de error que es de alrededor del 0.5 %.

7.2 Pruebas en condiciones de falla

En este escenario, se establece un umbral de consumo de corriente permitido para ambos subsistemas de $\pm 14A$, de acuerdo con las especificaciones nominales de los motores de CD Mod-895 utilizados. En t=24s, la corriente de referencia para el SLV supera el umbral de -14A (Figura 15 a)), lo que indica un consumo elevado en el motor del

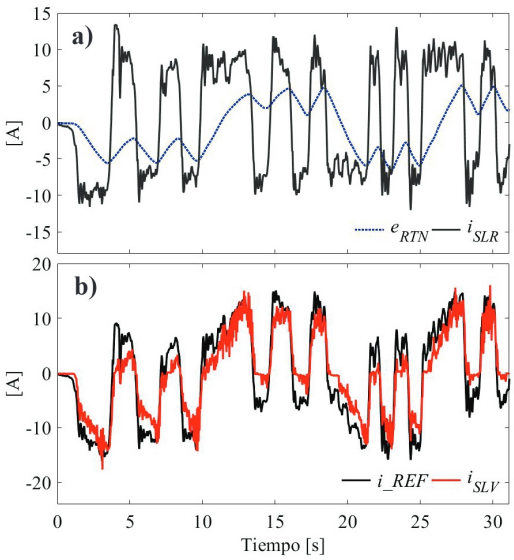


Fig. 13. Respuesta de corriente al aplicar carga a) en el SLR y b) en el SLV.

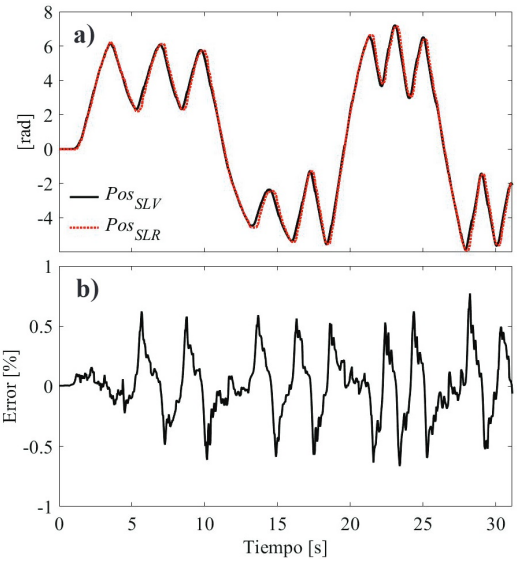


Fig. 14. Regulación de posición angular al aplicar carga: a) respuesta de posición angular en el SLR y b) porcentaje de error de regulación.

SLR. Dado que este comportamiento persiste por más de dos segundos, se detecta el error $E1$, y el volante deja de seguir la referencia de retroalimentación de par, activando el modo seguro. Posteriormente, en t=33s, se detecta un sobreconsumo en el SLR, registrado como $E2$ en la Figura 15 b). En esta figura se señala el evento $P1$, donde la corriente también excede el umbral de falla; sin embargo, dado que esta condición se mantiene por menos de un segundo, la falla no es registrada.

8. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta el proceso de diseño y desarrollo de un sistema de dirección tipo steer-by-wire, basado en control clásico y un enlace de comunicación mediante CAN bus. Además del seguimiento de la posición angular en el SLR, se implementa un control de corriente en el SLV para

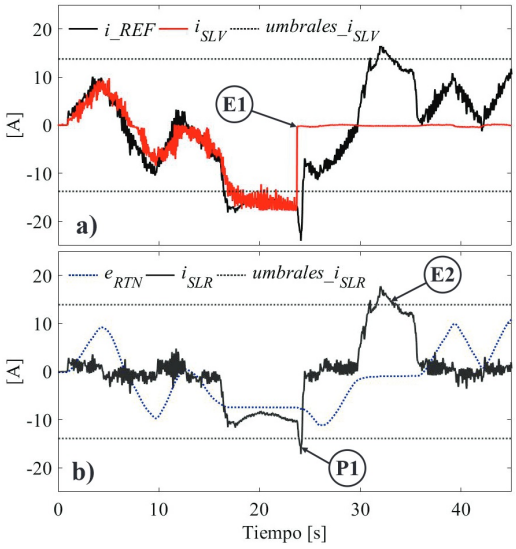


Fig. 15. Superación de umbrales de corriente establecidos: a) activación del modo seguro en el SLV y b) compensación de retorno del volante y corriente medida en el SLR.

simular la realimentación de la sensación de camino, así como un control de posición central y un mecanismo de detección de fallas relacionadas con el consumo de corriente. Los resultados experimentales demuestran que el esquema de control ofrece una excelente regulación y robustez en ambos subsistemas interconectados, garantizando un desempeño estable y confiable. Asimismo, la plataforma experimental proporciona un entorno adecuado para evaluar el sistema bajo diversos escenarios de prueba, permitiendo validar su funcionamiento en condiciones realistas. Los resultados confirman la viabilidad de escalar el sistema a aplicaciones reales, impulsando futuras investigaciones sobre seguridad basada en redundancia y contribuyendo al desarrollo de la electromovilidad.

REFERENCIAS

Albadri, K. & Basargan, H. (2022). *Design and Implementation of a Steer-by-Wire Control System for Autonomous Vehicles*, 568–591.

Figueiredo, P.G. (Quito, abril de 2008). *Sistema Steer By-Wire: Construcción y control de plataforma de investigación.* UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO.

Husain, S., Kadhim, M., Al-Obaidi, A.S., Hasan, A., Humaidi, A., Husaeni, D., & Ijost, I. (2023). Design of robust control for vehicle steer-by-wire system. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 8, 197–216. doi: 10.17509/ijost.v8i2.54794.

Kun, Yang, H.J.P.Y.L.C.B.T.A.L. & Chenxu, L. (2025). Coordinated human–machine co-driving control of a steer-by-wire system based on a non-cooperative game between driver and adas. *International Journal of Automotive Technology*, 10.1007/s12239-025-00238-4.

Sahboun, S.M. & Emhemed, A.A.A. (2022). Controller design for steer-by-wire system. *Journal of Mechatronics and Robotics*, 6, 1–6. doi:10.3844/jmrsp.2022.1.6. URL `https://thescipub.com/abstract/jmrsp.2022.1.6`.

Tavoosi, V., K.R. & Hosseini, S. (2014). Vehicle handling improvement with steer-by-wire system using hardware in the loop method. *Journal of Applied Research and Technology*, 12(4), 10.1016/S1665-6423(14)70093-8.

Apéndice A. DIBUJOS TÉCNICOS DEL PROTOTIPO

Las Figuras A.1 y A.2 muestran la distribución y dimensionamiento del SLV y del SLR.

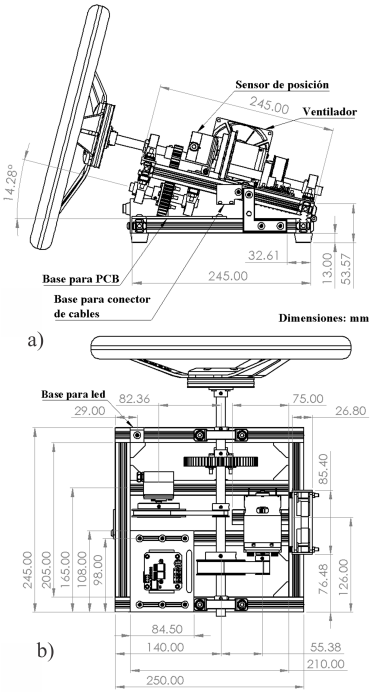


Fig. A.1. Distribución de elementos mecánicos y electrónicos en la estructura del SLV, vistas a) lateral izquierda, b) superior.

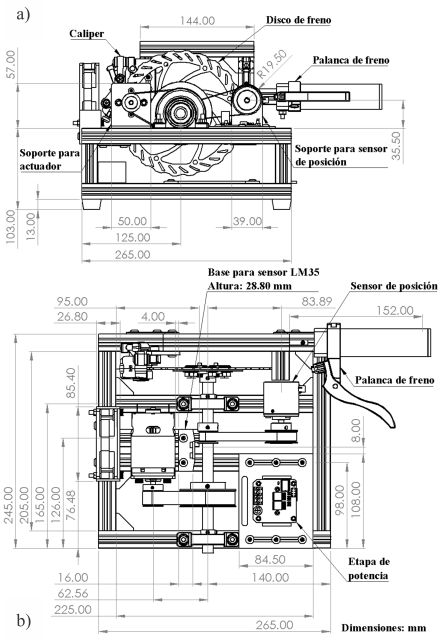


Fig. A.2. Distribución de elementos del SLR en los niveles inferior y superior del chasis, vistas a) frontal, b) superior.

PESTEL Analysis Approach through Interactive Dashboards for the Analysis of Electric Vehicle Adoption in Metropolitan Areas of Mexico

Alarcón Ruiz Erika[1]*, Reyes García Brenda Lizeth[1], Soto Hernández Ana María[1], Camero Berrones Rosa Gabriela[1], Reyes Méndez Victoriano[1], Rodríguez Zapata José Francisco Franklin[1], Liñan Valdez Melanie[1]

[1] Tecnológico Nacional de México / I.T. Ciudad Madero,

Ave 1° de mayo s/n Col. Los Mangos, Ciudad Madero Tamaulipas, 84440.
** e-mail autor de correspondencia: erika.ar@cdmadero.tecnm.mx.*

Abstract: Electric mobility represents a key strategy for reducing emissions from the transportation sector in urban areas. In Mexico, the growth of charging infrastructure and the adoption of electric vehicles face distinct challenges depending on the political, economic, social, and technological environment of each region. This study develops a territorial analysis tool using data dashboards, with the aim of facilitating the identification of regional patterns and structural barriers to electric mobility. The study highlights the importance of developing an interactive dashboard to analyze the adoption of electric vehicles (EVs) in metropolitan areas of Mexico using a PESTEL approach, which considers the political, economic, social, technological, environmental, and legal factors that influence the transition to electric mobility. The tool was implemented in Google Looker Studio and linked to a structured data system in Google Sheets, allowing for the automation of the calculation of an Electromobility Maturity Index (EMI). This index was constructed by assigning equal weight to each PESTEL dimension, with indicators normalized on a scale of 0 to 100. Indicators include: presence of regulations and incentives, average income, level of environmental perception, number of charging stations, air quality, and local legal frameworks. As a pilot case, three metropolitan areas were analyzed: Mexico City, Monterrey, and Guadalajara.

Keywords: Electric mobility, interactive dashboard, PESTEL analysis, metropolitan areas, public policies, charging stations, territorial visualization.

1. INTRODUCCIÓN

La movilidad eléctrica representa una estrategia clave para reducir emisiones del sector transporte en las zonas urbanas (IEA, 2022). En México, el crecimiento de la infraestructura de carga y la adopción de vehículos eléctricos enfrenta desafíos diferenciados según el entorno político, económico, social y tecnológico de cada región (Sierzchula et al., 2014). A pesar de los avances en la producción y comercialización de vehículos eléctricos, su adopción masiva se ve limitada por diversos factores territoriales. La ausencia de incentivos coordinados, la escasa infraestructura de carga, el desconocimiento social sobre sus beneficios y los marcos regulatorios fragmentados son obstáculos persistentes (Breetz et al., 2018).

En este contexto, se vuelve fundamental contar con herramientas de análisis territorial que integren múltiples dimensiones del entorno. Una de las metodologías más eficaces para tal fin es el enfoque PESTEL, que permite caracterizar sistemáticamente los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales que influyen en la adopción de nuevas tecnologías (Aguilar, 1967; Yüksel, 2012). Este artículo presenta una estrategia basada en tableros interactivos con enfoque PESTEL, orientada a facilitar el análisis regional de la preparación para la electromovilidad en las zonas metropolitanas de México.

La movilidad eléctrica representa una estrategia clave para reducir emisiones del sector transporte en las zonas urbanas. En México, el crecimiento de la infraestructura de carga y la adopción de vehículos eléctricos enfrenta desafíos diferenciados según el entorno político, económico, social y tecnológico de cada región. Este estudio desarrolla una herramienta de análisis territorial mediante tableros de datos, con el objetivo de facilitar la identificación de patrones regionales y barreras estructurales para la electromovilidad.

Se destaca la importancia del desarrollo de un tablero interactivo para analizar la adopción de vehículos eléctricos

(VE) en zonas metropolitanas de México mediante un enfoque PESTEL, que considera los factores Políticos, Económicos, Sociales, Tecnológicos, Ambientales y Legales que influyen en la transición hacia la movilidad eléctrica.

La herramienta fue implementada en Google Looker Studio y vinculada a un sistema de datos estructurado en Google Sheets, permitiendo la automatización del cálculo de un Índice de Madurez para la Electromovilidad (IMV). Dicho índice se construyó asignando un peso igualitario a cada dimensión PESTEL, con indicadores normalizados en una escala de 0 a 100. Entre los indicadores se incluyen: presencia de normativas e incentivos, ingreso promedio, nivel de percepción ambiental, cantidad de estaciones de carga, calidad del aire y marcos legales locales. Como caso piloto, se analizaron tres zonas metropolitanas: Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara.

El tablero permite explorar mapas interactivos, visualizar comparativas entre zonas y consultar fichas técnicas por ciudad. Esta herramienta ofrece una base sólida para la toma de decisiones en políticas públicas, planeación urbana y estrategias de inversión en electromovilidad. Además, su estructura es escalable a las 48 zonas metropolitanas del país y adaptable a nuevos indicadores o fuentes de datos abiertos.

1.1 Antecedentes

La electromovilidad se ha consolidado en la última década como una de las estrategias clave en la lucha contra el cambio climático y la descarbonización del sector transporte. A nivel mundial, el crecimiento sostenido en la adopción de vehículos eléctricos (VE) ha sido impulsado por avances tecnológicos, políticas públicas ambiciosas y una creciente conciencia ambiental. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2023), el número de VE en circulación superó los 26 millones en 2022, con expectativas de alcanzar los 125 millones en 2030 bajo los escenarios actuales de transición energética.

En América Latina, países como Colombia, Chile, Uruguay y México han comenzado a desarrollar marcos normativos y programas piloto para incorporar la movilidad eléctrica en sus políticas de transporte urbano y sustentabilidad (CEPAL, 2021). Sin embargo, la adopción efectiva de estas tecnologías sigue enfrentando barreras estructurales como la falta de infraestructura de carga, altos costos iniciales y desconocimiento ciudadano sobre los beneficios ambientales y económicos de los VE (UNEP, 2020).

En el caso de México, el gobierno federal ha comenzado a impulsar estrategias de movilidad eléctrica con una visión integral. Un ejemplo destacado es el proyecto OLINIA (Observatorio de la Electromovilidad y la Innovación para la Infraestructura de Carga), desarrollado en colaboración entre la Secretaría de Energía (SENER), el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Esta iniciativa busca articular a instituciones académicas, autoridades y empresas para generar evidencia, diseñar políticas públicas y fomentar el desarrollo tecnológico en torno a la electromovilidad (SENER, 2023).

En este contexto, se vuelve fundamental contar con herramientas de análisis territorial que integren múltiples dimensiones del entorno. Una de las metodologías más eficaces para tal fin es el enfoque PESTEL, que permite caracterizar sistemáticamente los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales que influyen en la adopción de nuevas tecnologías. Este artículo presenta una estrategia basada en tableros interactivos con enfoque PESTEL, orientada a facilitar el análisis regional de la preparación para la electromovilidad en las zonas metropolitanas de México.

El uso de dashboards o tableros de visualización, combinados con el análisis PESTEL, ofrece un enfoque integrador y dinámico para representar esta complejidad territorial. Esta combinación permite no solo diagnosticar el estado actual de cada zona, sino también simular escenarios de intervención y priorizar regiones para el despliegue de programas de movilidad eléctrica.

2. METODOLOGÍA

Para la recopilación de datos se siguió una estrategia basada en dimensiones como se presenta en la siguiente tabla:

Dimensión	Indicador representativo	Fuente (Año)	Tipo de tratamiento
Político	Presencia de programas públicos o incentivos para VE	Revisión de gacetas estatales y municipales (SEMOVI, 2023; SEMARNAT, 2022)	Codificación binaria y ordinal
Económico	Ingreso promedio por hogar / PIB per cápita	INEGI – Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH, 2022)	Normalización min-max
Social	Percepción social sobre sostenibilidad / acceso educativo	ENCIG (INEGI, 2021) y Encuesta Nacional de Cultura Cívica	Escala ordinal 0–100
Tecnológico	Número de estaciones de carga por ciudad	Electromaps (2024) – descarga directa con coordenadas	Conteo georreferenciado y normalizado por población
Ambiental	Niveles promedio de PM2.5 y NO_2	IQAir (2023); INECC (2023)	Inversión de valores contaminantes (más limpio = mayor puntuación)
Legal	Existencia de normas locales sobre movilidad eléctrica	DOF y reglamentos municipales consultados por entidad	Codificación discreta

Se diseñó un tablero interactivo en Google Looker Studio vinculado con una hoja de cálculo en Google Sheets que almacena indicadores estructurados según el modelo PESTEL. La metodología contempló los siguientes pasos:

- Selección de indicadores clave por dimensión: por ejemplo, presencia de incentivos fiscales (político), ingreso promedio (económico), percepción social sobre tecnologías limpias (social), cantidad de estaciones de carga (tecnológico), niveles de contaminación (ambiental) y existencia de normas de movilidad (legal).
- Normalización de datos usando la técnica min-max para convertir cada variable a una escala de 0 a 100.
- Cálculo del índice de madurez para electromovilidad (IMV) como el promedio ponderado equitativo de las seis dimensiones PESTEL:

$$IMV_i = \frac{1}{6}\sum_{j=1}^{6} S_{ij}$$

Donde S_{ij} es la puntuación normalizada para la dimensión j en la zona metropolitana i.

- Diseño del tablero: visualización mediante mapas dinámicos, gráficos de radar, tarjetas de resumen y filtros interactivos por zona y dimensión.
- Visualización geoespacial: integración de mapas con ubicación de estaciones de carga extraídas de Electromaps y posicionamiento territorial de las zonas metropolitanas.

El tablero fue implementado en Google Looker Studio por su capacidad de integración con fuentes de datos dinámicas como Google Sheets y su potencial para generar visualizaciones responsivas. El proceso técnico incluyó:

- Estructura de datos: diseño de una matriz por zona metropolitana y dimensión PESTEL.
- Codificación de variables cualitativas: para variables no numéricas, se aplicó codificación discreta (por ejemplo, bajo = 33, medio = 66, alto = 100).
- Automatización: uso de fórmulas en Google Sheets para actualizar automáticamente el IMV y las tarjetas del tablero.
- Interfaz visual: organización de las vistas del tablero por sección temática (general, PESTEL, mapas, fichas técnicas).
- Portabilidad: el tablero se adaptó para acceso en navegador web, dispositivos móviles y se incluyó una versión de solo lectura para difusión pública.

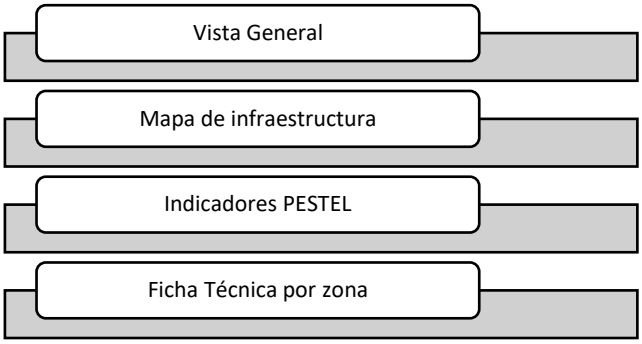


Figura 1. Estructura del Tablero

Dentro del diseño del tablero se consideraron los siguientes datos

- Integración de datos cuantitativos (estaciones de carga, ingreso promedio, calidad del aire) y cualitativos (presencia de normativas, incentivos). Cada zona metropolitana tiene un perfil PESTEL completo.
- Estudio de normalización de los datos mediante escalas 0-100 para utilizar codificación discreta (bajo, medio, alto).
- Estudio de gráficas de radar, barras apiladas, mapas georreferenciados y filtros interactivos por zona y dimensión.
- Mapas de infraestructura: capas de puntos de estaciones de carga con coordenadas extraídas de Electromaps.

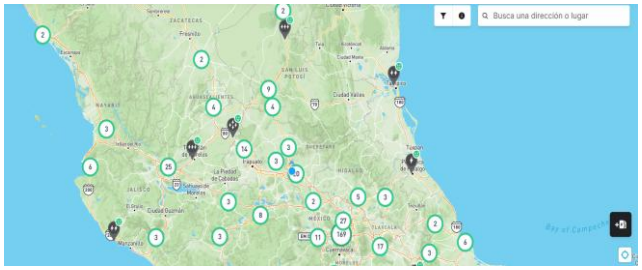


Figura 2. Electrolineras en México

Esta implementación permite escalabilidad, actualización remota de los datos y colaboración entre múltiples usuarios en tiempo real.

3. RESULTADOS

Se aplicó la metodología a tres zonas metropolitanas como casos piloto: Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara. Los principales hallazgos fueron:

- CDMX: Alta madurez general (>80), destacando en dimensiones política, tecnológica y ambiental. Cuenta con una red creciente de cargadores, normativa específica y políticas de subsidios.

- Monterrey: Fuerte componente económico, pero bajo desarrollo normativo e infraestructura insuficiente, lo que le confiere una madurez media (≈70).
- Guadalajara: Presenta una población joven y ecosistema tecnológico emergente, pero aún enfrenta desafíos en normativas y percepción social. Madurez moderada (≈68).
-

La visualización permitió identificar brechas entre dimensiones, analizar escenarios de intervención diferenciada y facilitar la priorización de zonas para inversión en electromovilidad. El tablero resultó útil como instrumento de planeación territorial y de comunicación para tomadores de decisiones.

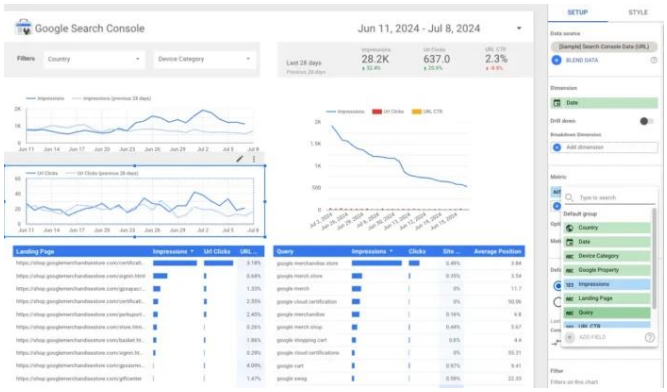


Figura 3. Tablero de Visualización

El uso de tableros interactivos permite democratizar el análisis de datos, integrar fuentes heterogéneas y facilitar la exploración por actores no técnicos. Este enfoque puede escalarse a otras zonas metropolitanas y actualizarse en tiempo real con datos abiertos. Este trabajo puede adaptarse según prioridades sectoriales. Además, la integración con herramientas como QGIS o APIs de datos en tiempo real podría fortalecer su uso técnico y operativo.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó el desarrollo y aplicación de un tablero interactivo basado en el modelo PESTEL para analizar los factores que motivan o limitan la adopción de vehículos eléctricos (VE) en zonas metropolitanas de México. Se propone un índice de madurez para electromovilidad construido a partir de indicadores normalizados por dimensión, con peso igualitario. La visualización se implementó en Google Looker Studio, integrando datos económicos, ambientales, sociales, normativos, tecnológicos y políticos. El resultado permite identificar territorios con mayor preparación para la transición energética vehicular y brinda una herramienta útil para la toma de decisiones y el diseño de políticas públicas diferenciadas.

El uso combinado del análisis PESTEL con tableros de visualización interactivos representa una innovación metodológica para evaluar la preparación territorial hacia la movilidad eléctrica. Esta estrategia permite integrar datos multidimensionales, facilitar su interpretación por usuarios técnicos y no técnicos, y diseñar intervenciones basadas en evidencia. De la presente investigación se concluye que el enfoque es escalable a las 48 zonas metropolitanas de México. Puede vincularse con repositorios nacionales de datos abiertos y sistemas de monitoreo ambiental. Es útil para gobiernos locales, organismos de planeación, universidades y empresas del sector energético. Se recomienda consolidar el tablero como una herramienta de uso permanente dentro de estrategias nacionales de movilidad sustentable y promover su uso en espacios de participación ciudadana y ciencia abierta.

Agradecimiento a TecNM por el apoyo recibido mediante el proyecto: 22994.25-P

REFERENCIAS

Agencia Internacional de Energía (IEA). (2023). *Global EV Outlook 2023*. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023

CEPAL. (2021). *Electromovilidad en América Latina y el Caribe: Estado actual y caminos hacia un transporte sustentable*. https://www.cepal.org

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). (2020). *Movilidad eléctrica: Perspectivas para América Latina y el Caribe*. https://www.unep.org

Porter, M. E. (2008). *The five competitive forces that shape strategy*. Harvard Business Review, 86(1), 78–93.

Secretaría de Energía (SENER). (2023). *Observatorio de la Electromovilidad OLINIA – Informe ejecutivo*. https://www.gob.mx/sener

Velásquez, M. A. (2022). *Herramientas estratégicas de análisis de entorno: PESTEL y su aplicación en energías limpias*. Revista de Prospectiva Energética, 17(2), 45–61.

Sierzchula, W., Bakker, S., Maat, K., & van Wee, B. (2014). The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption. Energy Policy, 68, 183–194.

Sovacool, B. K., Axsen, J., & Kempton, W. (2017). The future promise of vehicle-to-grid (V2G) integration: A sociotechnical review and research agenda. Annual Review of Environment and Resources, 42, 377–406.

Otras fuentes consultadas:

- *INEGI. Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH).*
- *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).*
- *Electromaps. Infraestructura de carga pública para vehículos eléctricos.*
- *IQAir. Índices de calidad del aire.*
- *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).*
- *Google Looker Studio. Visualización de datos.*

Modeling and Speed Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Applications

Esteva Pérez, Roosemvelt*, Lezama Ramírez, Alfredo*, Borja Jaimes, Vicente*, Guerrero Ramírez, Gerardo Vicente*

** Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 62490. (e-mail: m23ce097@cenidet.tecnm.mx, d24ce114@cenidet.tecnm.mx).*

** Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 62490. (e-mail: vicentebj@cenidet.edu.mx, gerardo.gr@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: In this work, mathematical modeling in abc and qd0 coordinates of the permanent magnet synchronous motor was carried out, as well as its respective PI speed control design, this in order to have a reference speed in the motor rotor, the motor was simulated under its nominal operating conditions, and later in the same simulation a variation was made in the load torque, this represents a change in the trajectory of the vehicle, the results show good operation by the motor, since the mechanical speed of the motor follows the desired speed and the motor continues to operate in an acceptable region.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor, PI controller, electric vehicle, inverter

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años los motores eléctricos han estado presentes en la vida diaria de las personas, como son: electrodomésticos, servicios médicos y transportes, entre otras. El uso de los motores eléctricos se debe gracias a que ayudan a convertir la energía eléctrica en energía mecánica aprovechable para alguna aplicación. Para este trabajo se aborda el control de un motor de imanes permanentes trifásico con aplicación a vehículos eléctricos (VE). Es importante mencionar que los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM) tienen una dinámica no lineal. Por lo que es importante contemplar la aplicación de un control. Es por esto la necesidad de conocer las ecuaciones que lo representan y posteriormente comprender la teoría de control a aplicar [1].

Los vehículos eléctricos ofrecen las ventajas de tener motores eléctricos, ya que estos motores poseen la capacidad de generar par con rapidez y precisión [2]. Sin embargo, aún presentan limitaciones como, un alto costo o poca flexibilidad [3].

Se han estudiado aspectos tecnológicos de los coches eléctricos con la finalidad de desarrollar soluciones que mejoren la calidad de movimiento o el rendimiento de estos vehículos. La estructura del vehículo eléctrico normalmente se compone de un motor eléctrico, el inversor, el controlador, la batería, el puerto de carga, entre otras [3], [4]. En la figura 1 se muestra un esquema de un vehículo eléctrico.

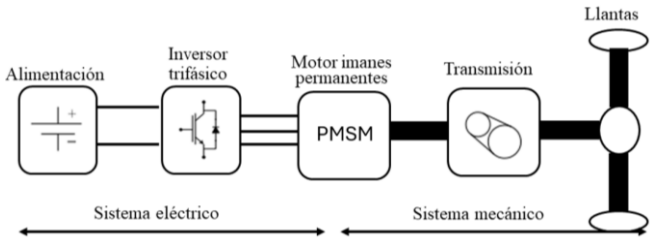


Figura 1. Diagrama de un vehículo eléctrico.

En general los motores eléctricos presentan ventajas para el uso de controladores, lo que ayuda al mejoramiento de la cinemática del vehículo, por lo que la selección del motor sigue siendo un tema de estudio.

Algunos motores utilizados son los de corriente directa (CD) ya que poseen la ventaja de ser fáciles de controlar, pero como desventaja tienen una vida corta y requieren de un mantenimiento más riguroso [5]. De igual forma están los motores de corriente alterna (CA), como principal ventaja tienen bajo costo, facilidad de fabricación y robustos como es el caso del motor de inducción tipo jaula de ardilla, existen desventajas en este motor como es la baja eficiencia. Por su parte, el motor de imanes permanentes puede considerarse el más adecuado para esta aplicación, debido a la alta eficiencia y la capacidad de par, así como un control correcto. Debido a las características de los motores eléctricos utilizados en los vehículos eléctricos se ha optado por el motor síncrono de imanes permanentes.

Por otra parte, se tiene el inversor, el cual convierte niveles de CD a CA para alimentar al motor eléctrico, el inversor consta de dispositivos de conmutación que actúan a partir de una

señal PWM generada, la tensión de salida de un inversor es una señal senoidal con bajo THD [5].

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se desarrolla el modelado dinámico en coordenadas abc y qd0 del motor síncrono de imanes permanentes, así como el diseño de un controlador PI para la velocidad mecánica. A continuación, se describe el procedimiento utilizado para dicho trabajo.

2.1 Modelo dinámico en coordenadas abc del motor

Aplicando las leyes de Kirchhoff se obtiene la ecuación que describe la parte eléctrica del motor en coordenadas abc:

$$\boldsymbol{U}_{abcs} = \boldsymbol{r}_s\boldsymbol{i}_{abcs} + \frac{d\boldsymbol{\psi}_{abcs}}{dt} = \boldsymbol{r}_s\boldsymbol{i}_{abcs} + \boldsymbol{L}_s\frac{d\boldsymbol{i}_{abcs}}{dt} + \frac{d\boldsymbol{\psi_m}}{dt} \quad (1)$$

De la ecuación (1) se despeja la derivada de la corriente en el estator del motor:

$$\frac{d\boldsymbol{i}_{abcs}}{dt} = -\boldsymbol{L}_s^{-1}\boldsymbol{r}_s\boldsymbol{i}_{abcs} - \boldsymbol{L}_s^{-1}\frac{d(\psi_m)}{dt} + \boldsymbol{L}_s^{-1}\boldsymbol{u}_{abcs} \quad (2)$$

La ecuación que representa los enlaces de flujo magnéticos del estator está dada por:

$$\boldsymbol{\psi}_{abcs} = \boldsymbol{L}_s\boldsymbol{i}_{abcs} + \boldsymbol{\psi}_m = \begin{bmatrix} L_{ls}+\bar{L}_m & -\frac{1}{2}\bar{L}_m & -\frac{1}{2}\bar{L}_m \\ -\frac{1}{2}\bar{L}_m & L_{ls}+\bar{L}_m & -\frac{1}{2}\bar{L}_m \\ -\frac{1}{2}\bar{L}_m & -\frac{1}{2}\bar{L}_m & L_{ls}+\bar{L}_m \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \psi_m\begin{bmatrix} \sin\theta \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

En donde $\boldsymbol{L}_s$ son las inductancias en el estator, $\boldsymbol{i}_{abcs}$ son las corrientes en el estator, y ψ_m es el imán del motor, la derivada de $\boldsymbol{\psi}_m$, queda expresada como:

$$\frac{d\boldsymbol{\psi}_m}{dt} = \psi_m\begin{bmatrix} \sin\theta \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

A partir de lo anterior la ecuación que expresa la parte eléctrica del motor queda como:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} L_{ls}+\bar{L}_m & -\frac{1}{2}\bar{L}_m & -\frac{1}{2}\bar{L}_m \\ -\frac{1}{2}\bar{L}_m & L_{ls}+\bar{L}_m & -\frac{1}{2}\bar{L}_m \\ -\frac{1}{2}\bar{L}_m & -\frac{1}{2}\bar{L}_m & L_{ls}+\bar{L}_m \end{bmatrix}^{-1}\right) \left(-\begin{bmatrix} \boldsymbol{r}_s & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{r}_s & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{r}_s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} - \psi_m\begin{bmatrix} \sin\theta \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix}\right) \quad (5)$$

En donde:
r_s: Es la resistencia en el estator
L_{ls}: Es la inductancia de dispersión en el estator
$\bar{L}_m$: Es la inductancia de magnetización en el estator
i_{as}, i_{bs}, i_{cs}: Son las corrientes trifásicas en el estator
ψ_m: Es el imán permanente
u_{as}, u_{bs}, u_{cs}: Son los voltajes en el estator

La ecuación que describe la relación entre la parte eléctrica y mecánica del motor:

$$\omega_e = \frac{P}{2}\omega_m \quad (6)$$

En donde:
ω_e: Es la velocidad eléctrica
ω_m: Es la velocidad mecánica
P: Es el número de polos
La ecuación que describe al par electromagnético:

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right)(\psi_m)\left[i_{as}\cos(\theta)\ \ i_{bs}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\ \ i_{cs}\cos\left(\theta + \theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \quad (7)$$

En donde:
i_{as}, i_{bs}, i_{cs}: Son las corrientes trifásicas en el estator
T_e: Es el par electromagnético

Aplicando las leyes de Newton se obtiene la ecuación que describe la parte mecánica del motor:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - B_m\omega_m - T_L) \quad (8)$$

En donde:
T_e: Es el par electromagnético
T_L: Es el par de carga
B_m: Es el coeficiente de fricción
ω_m: Es la velocidad mecánica

Para la ecuación que describe la parte mecánica del vehículo eléctrico se tomó en consideración el modelado desarrollado por [6], en donde la velocidad mecánica que contempla el VE y el motor se expresa como:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{(\eta_g)(G^2)}{(D_m)(\eta_g)(G^2)+(m)(r^2)}(T_e - (R_m)(\omega_m) - \frac{(\mu_{rr})(m)(g)(r)cos(\psi)}{(\eta_g)(G)} - \frac{(\rho)(A)(C_d)(r^3)}{2(\eta_g)(G^2)}(\omega_m{}^2) - \frac{(m)(g)(r)sin(\psi)}{(\eta_g)(G)}) \quad (9)$$

En donde:
ω_m: Velocidad mecánica
R_m: Coeficiente de fricción viscosa
η_g: Eficiencia de la transmisión
G: Coeficiente de reducción de velocidad angular de la transmisión
D_m: Inercia total del vehículo
ψ: Angulo de inclinación del camino
m: Masa del vehículo en kilogramos
r: Radio de la llanta
g: Coeficiente de aceleración gravitacional
T_e: Es el par electromagnético
μ_{rr}: Coeficiente de fricción
ρ: Densidad del aire

A: Área frontal del vehículo
C_d: Coeficiente aerodinámico

2.2 Modelo dinámico en coordenadas qd0 del motor

Posteriormente se realiza el modelado en coordenadas qd0, las ecuaciones que expresan la parte eléctrica del motor:

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \left(\frac{-r_s}{\left(L_s + \left(\frac{3}{2}\right)L_m\right)}\right) i_q - \left(\frac{\psi_m}{\left(L_s + \left(\frac{3}{2}\right)L_m\right)}\right)\omega_e - i_d\omega_e + \left(\frac{1}{\left(L_s + \left(\frac{3}{2}\right)L_m\right)}\right) u_q \quad (10)$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \left(\frac{-r_s}{\left(L_s + \left(\frac{3}{2}\right)L_m\right)}\right) i_d - i_q\omega_e + \left(\frac{1}{\left(L_s + \left(\frac{3}{2}\right)L_m\right)}\right) u_d \quad (11)$$

$$\frac{di_{0s}}{dt} = \left(\frac{-r_s}{(L_s)}\right) i_0 - i_q\omega_e + \left(\frac{1}{(L_s)}\right) u_0 \quad (12)$$

En donde:
r_s: Es la resistencia en el estator
L_{ls}: Es la inductancia de dispersión en el estator
$\bar{L}_m$: Es la inductancia de magnetización en el estator
i_{qs}, i_{ds}, i_{0s}: Son las corrientes trifásicas en el estator
ψ_m: Es el imán permanente
u_{qs}, u_{ds}, u_{0s}: Son los voltajes en el estator

El cálculo del par electromagnético

$$T_e = \left(\frac{3}{4}\right)(P)(\psi_m)(i_q) \quad (13)$$

La ecuación que describe a la parte mecánica del motor:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - B_m\omega_m - T_L) \quad (14)$$

2.3 Modelo del inversor trifásico

El motor se alimenta a partir de un inversor trifásico, en donde, el modelo está expresado de la siguiente forma a partir de las señales de conmutación.

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \frac{V_{cd}}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} s_1 \\ s_3 \\ s_5 \end{bmatrix} \quad (15)$$

En donde:
u_{as}, u_{bs}, u_{cs}: Son los voltajes trifásicos generados por el inversor
V_{cd}: Es el voltaje en CD
s_1, s_3, s_5: Son las señales de conmutación

Posteriormente se realiza el diseño del controlador, tomando en consideración la señal de la velocidad mecánica medida del motor y la velocidad mecánica de referencia, para la velocidad de referencia se tomó a partir de la especificada por las características del motor.

Se diseñó un controlador PI, a partir de obtener el error entre la velocidad medida y la velocidad de referencia expresado en (10):

$$e = \omega_{ref} - \omega_m \quad (16)$$

En donde:
e: Es el error
ω_m: Es la velocidad mecánica medida
ω_{ref}: Es la velocidad mecánica de referencia

Posteriormente, el error se multiplicó por una ganancia proporcional y la integral del error por una ganancia integral, el valor de las ganancias se obtuvo de manera heurística obteniendo así el valor de $K_p = 0.09$ y $K_i = 0.03$, obteniendo así la señal de control expresado en (11):

$$u = K_p e + K_i \int_0^t e(\tau)\, d\tau \quad (17)$$

Esta señal de control se comparó con tres señales portadoras desfasadas 120° cada una para obtener las señales de conmutación que ingresan al inversor y con el cual ayudan a regular el voltaje para alimentar el motor.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

La simulación se llevó a cabo en el entorno MATLAB/Simulink. Se puso a prueba la simulación ante dos condiciones de par aplicadas al motor. Los parámetros del motor están expresados en la siguiente tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del motor síncrono de imanes permanentes.

Parámetro	Valor	Unidad
Voltaje de alimentación	220	V_{rms}
Número de polos	4	
Resistencia en estator	0.121	**Ω**
Inductancia del estator	$1x10^{-3}$	H
Inductancia mutua	0.0009	H
Inercia del motor	0.00022	Kgm^2
Coeficiente de fricción	0.00001	Nms/rad
Magnitud de los enlaces de flujo dados por el imán en el rotor	0.262	Vs/rad

A partir de los parámetros de la tabla anterior se realizó la simulación del motor síncrono de imanes permanentes, en la figura 2 se muestran las corrientes trifásicas en el estator, las cuales tienen un tiempo de establecimiento del 0.1s, a partir de ese tiempo tienen una amplitud de 50 A aproximadamente ya que contienen un par de carga de 0 Nm, por otra parte, cuando se introduce un par de carga de 45 Nm en el tiempo 0.25s las corrientes tienen una amplitud de 64 A.

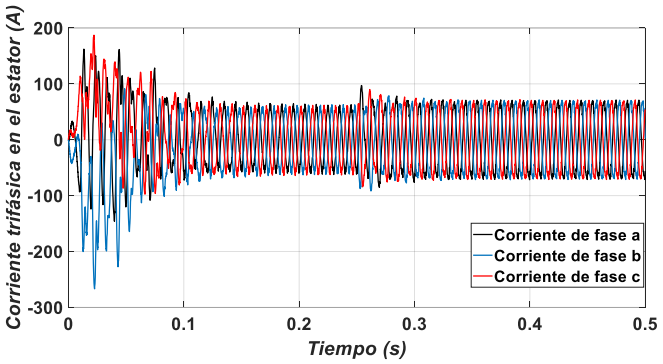


Figura 2. Corrientes trifásicas en el estator.

En la figura 3 se muestra el comportamiento de la velocidad mecánica, en donde la velocidad medida si llega a la velocidad de referencia, y se estabiliza en un tiempo de 0.15s, así como un sobre impulso que oscila entre los 1000 rad/s, esto debido al estado transitorio de la máquina, cuando el par de carga incrementa a 45 Nm en el tiempo 0.25s, la velocidad medida sufre un desajuste y vuelve a seguir a la referencia en el tiempo de 0.3s, con un sobre impulso que oscila entre los 500 rad/s, esto debido a que el controlador sufre un desajuste por la perturbación.

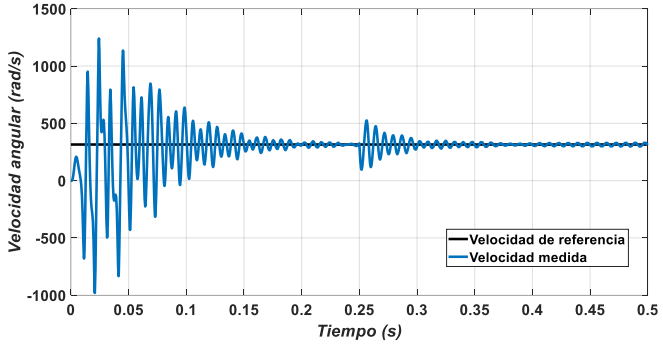


Figura 3. Respuesta del sistema de control.

En la figura 4 se muestra la señal de error generado por la velocidad angular de referencia y la medida, como se muestra la señal de error está muy cercano a cero, ya que las oscilaciones que presentan son debido al estado transitorio de la máquina y a la perturbación en el par de carga.

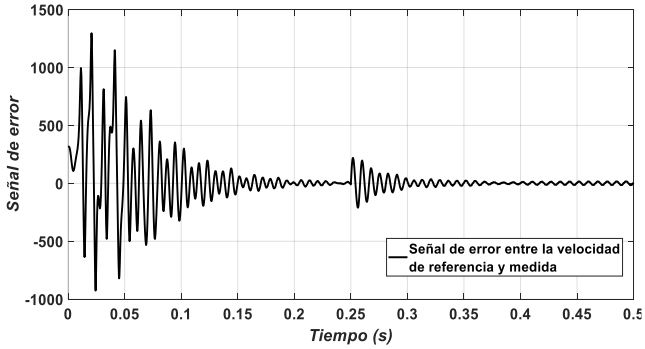


Figura 4. Señal de error entre la velocidad de referencia y medida.

Posteriormente se dispuso a obtener la integral del error cuadrático (ISE), como se muestra en la figura 5, como se puede observar se estabiliza relativamente rápido en 0.15s lo que indica que el sistema corrige el error en poco tiempo y que se está reduciendo a cero ya que la curva tiene un poco crecimiento después de 0.2s, por otra parte, al tener una magnitud alta nos indica que tiene un sobre impulso muy grande en la máquina.

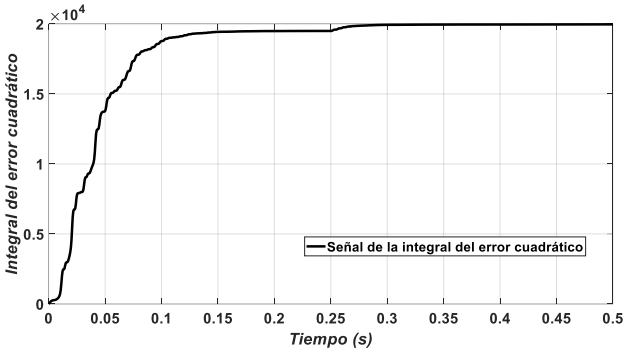


Figura 5. Señal de la integral del error cuadrático (ISE).

En la figura 6 se muestra la integral del valor absoluto del error (IAE), como se puede observar al estabilizarse en un valor bajo, el sistema eventualmente alcanza el estado deseado en un poco tiempo y de manera adecuada, por lo que el controlador eta manteniendo el error dentro de un rango pequeño, por otra parte, dado que se tienen oscilaciones grandes al inicio de la simulación esto provoca que se obtenga una amplitud de la señal relativamente alta.

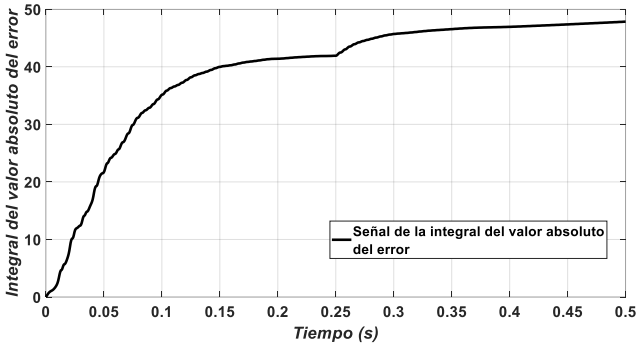


Figura 6. Señal de la integral del valor absoluto del error (IAE).

En la figura 7 se muestra el comportamiento del par electromagnético en el tiempo 0.15s el valor del par es aproximadamente 0 Nm, este valor cambia cuando el valor de par de carga es modificado, el valor del par electromagnético es aproximadamente 45 Nm.

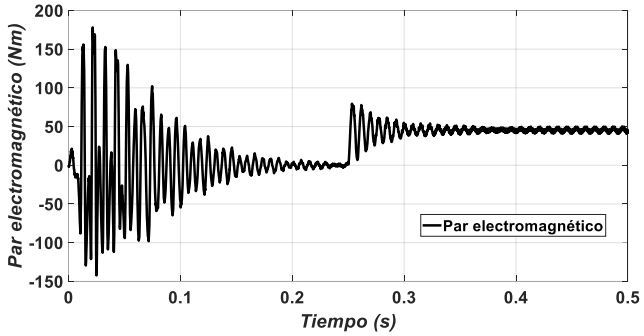


Figura 7. Par electromagnético.

En la figura 8 se muestra el voltaje de la fase a del inversor trifásico, el voltaje de alimentación al motor es de 180 V_p.

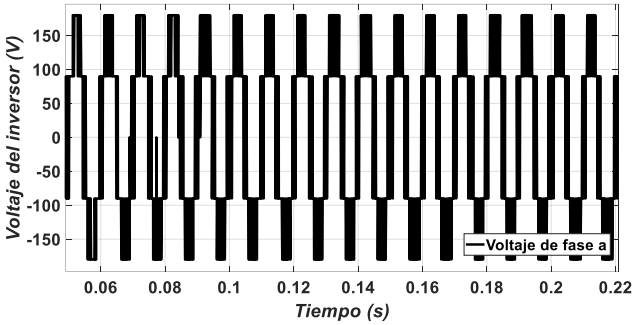


Figura 8. Voltaje de la fase a del inversor trifásico.

Los resultados obtenidos muestran un buen comportamiento por parte del modelado matemático del motor síncrono de imanes permanentes y su respectivo diseño del controlador de velocidad.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió el modelado matemático del motor síncrono de imanes permanentes en coordenadas abc y qd0, así como su respectiva simulación en el entorno Matlab/Simulink, de igual forma se diseñó un controlador PI de velocidad para el motor, el controlador mostro un buen funcionamiento en su operación nominal del motor, y de igual forma cuando se le aplico un par de carga distinto, ya que el sistema siguió trabajando en la misma velocidad de referencia, solo que con un incremento de corriente en las terminales del estator, de igual forma un incremento en el par electromagnético, esto debido a un incremento del par de carga.

Como siguientes aprendizajes sería importante conocer el comportamiento del motor ante distintos escenarios de par de carga o de velocidad angular mecánica, ya sea abruptos como el mostrado en este trabajo o deriva para simular que el vehículo está subiendo una pendiente, esto con la finalidad de poder conocer el comportamiento del motor o saber si se requiere alguna otra estrategia de control.

REFERENCIAS

[1] Z Chen. A review of the control strategies for permanente magnet synchronous motor used in electric vehicles, Applied Mechanics and Materials, 2013.

[2] S. Soylu. Urban Transport and Hybrid Vehicles. Rijeka, Croatica: IntechOpen. 2010.

[3] X. Zhang, “Energy – Efficient Toque Allocation Designo f Traction and Regenerative Braking for Distributed Drive Electric Vehicles” IEEEE Transactions on Vehicular Technology. 2018.

[4] Thi Giang. P. Drive Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Fed by a Multi-level Inverter for Electric Vehicle Application, Engineering, Technology & Applied Science Research. 2022.

[5] D. B. Minh, “Efficient Improvement of Permanent Magnet BLDC Motors for Electric Vehicles,” Engineering, Technology & Applied Science Research. 2021.

[6] Langarica Córdoba D. Control de un Motor Brushless para Aplicación a Vehículos Eléctricos. CENIDET. 2010.

Comprehensive Analysis of Drinking Water Leak Management in Urban Networks

Edgar Pérez Arriaga[*], Erika Alarcón Ruiz[**], Jesús Federico Mauricio Ruiz[*], Luis Daniel Ordóñez Pacheco[**]. Martha Elena Mejía Maldonado[*]. Luis Antonio Vázquez Ochoa[*]

[*]*Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria, Victoria, Tamaulipas, México MX (Tel: 8342701158; e-mail: edgar.pa@cdvictoria.tecnm.mx, M22380006@cdvictoria.tecnm.mx martha.mm@cdvictoria.tecnm.mx, luis.vo@cdvictoria.tecnm.mx*

[**]*Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Cd. Madero, Tamaulipas, México MX (Tel 833 154 1340; e-mail: erika.ar@cdmadero.tecnm.mx, luis.op@cdmadero.tecnm.mx*

Abstract: This study analyzes the efficiency of potable water leak management in the supply network of Ciudad Victoria, Tamaulipas, Mexico, with the aim of identifying areas for improvement and proposing solutions for more sustainable water resource management. The research adopts a mixed-methods approach, combining quantitative and qualitative methods, including statistical analysis of leak repair times, process mapping, and geospatial analysis. The statistical analysis reveals high variability in repair times, with an average of 29.34 days and a standard deviation of 55.15 days, indicating inefficiencies in the process. Process mapping allowed for visualizing the flow of leak report handling, identifying bottlenecks and areas for improvement. Geospatial analysis showed a non-homogeneous distribution of leaks in the city, concentrated in the central and southern areas, which has implications for resource prioritization and repair route planning. The results suggest the need to implement strategies to reduce variability in repair times, improve the accuracy of leak report information, optimize resource allocation, and consider the spatial distribution of leaks in planning maintenance activities. These improvements will contribute to more efficient water management, reducing waste and promoting the sustainability of the service in Ciudad Victoria.

Keywords: Potable water leaks, Water management, Geospatial analysis, Process mapping, Supply network.

1. INTRODUCION

La creciente escasez de agua a nivel mundial, exacerbada por el cambio climático, el crecimiento poblacional y la contaminación, representa uno de los desafíos más apremiantes para la gestión sostenible de este recurso vital. Estudios recientes indican que más de 4 mil millones de personas en todo el mundo enfrentan escasez severa de agua potable (Mekonnen & Hoekstra, 2016). Esta problemática se intensifica en regiones áridas y semiáridas, donde la disponibilidad de agua es naturalmente limitada y la presión sobre los recursos hídricos es mayor (WWAP, 2012). En regiones como la central de Tamaulipas, México, donde la disponibilidad de agua potable es crucial para el bienestar de la población y el desarrollo económico, la eficiencia en la gestión de los sistemas de suministro de agua potable se vuelve aún más crítica.

Las fugas en las redes de distribución de agua potable representan una pérdida significativa de este recurso, impactando tanto la eficiencia operativa de las empresas proveedoras como la economía local y el medio ambiente. A pesar de pasar a menudo desapercibidas, las fugas exacerban la crisis hídrica y ponen en riesgo la sostenibilidad de las comunidades. Se han demostrado que las pérdidas de agua por fugas en otras regiones, donde pueden alcanzar niveles alarmantes, llegando incluso a rondar el 50% del agua suministrada en algunos sistemas (Kingdom, Liemberger, & Marin, 2006). Estas pérdidas no solo representan un desperdicio de un recurso escaso, sino que también generan costos económicos significativos para las empresas proveedoras y los usuarios finales, pudiendo incluso afectar la tarifa del agua y la satisfacción de los usuarios (Lambert, 2002; Thornton, et al., 2008).

En este contexto, la organización encargada de la gestión del suministro de agua potable en la región central de Tamaulipas enfrenta el reto de garantizar un suministro de agua confiable y eficiente, minimizando las pérdidas por fugas.

La presente investigación tiene como objetivo analizar la eficiencia en la gestión de fugas de agua potable en la red de abastecimiento, con el fin de identificar áreas de mejora y proponer soluciones para una gestión más sostenible del recurso hídrico.

Para lograr este objetivo, se recopilaron datos de los reportes de fugas de agua potable a lo largo de un año. Estos datos permitirán evaluar el tiempo que tarda la organización en atender y reparar las fugas, un indicador clave de la eficiencia del proceso de gestión. El análisis de los tiempos de reparación es fundamental para comprender el desempeño de los sistemas de gestión de fugas, ya que permite identificar cuellos de botella y áreas de mejora en la respuesta a las fugas (Al-Washali et al., 2016). Mediante el análisis estadístico de estos tiempos de reparación, se busca establecer límites de control y evaluar la variabilidad del proceso, lo que proporcionará información valiosa para la toma de decisiones y la implementación de mejoras.

Además, se realizó un mapeo de procesos y un análisis geoespacial para lograr un análisis integral de las condiciones actuales del área técnica, siendo ésta a la que le compete la función de garantizar el servicio a la ciudadanía.

2. ANTECEDENTES

La crisis hídrica que enfrenta Ciudad Victoria, Tamaulipas, se manifiesta en un creciente desabasto de agua potable que afecta a la población y compromete el desarrollo sostenible de la región. A pesar de que el crecimiento demográfico y la intensificación de las actividades económicas ejercen presión sobre la demanda (Perevochtchikova, 2013), la problemática se ve agravada por la obsolescencia de la infraestructura hidráulica y la falta de una gestión integral del recurso hídrico (UNESCO, 2014).

En este contexto, COMAPA Victoria, organismo responsable del suministro de agua potable en la ciudad, enfrenta el desafío de garantizar el acceso al agua en un escenario de creciente escasez. La falta de una caracterización precisa de la atención al cliente, la ausencia de un sistema de identificación de zonas prioritarias para la gestión de mantenimientos preventivos, y la deficiencia en la planificación de acciones para la conservación del agua, limitan la eficiencia operativa y la calidad del servicio (González & Alarcón, 2017).

3. METODOS

El propósito de esta metodología es analizar la eficiencia en la gestión de fugas de agua potable en la red de abastecimiento de Ciudad Victoria, Tamaulipas. A través de la recopilación y análisis de datos, se busca identificar áreas de oportunidad para optimizar los procesos de atención a reportes, minimizar los tiempos de respuesta y contribuir a una gestión más sostenible del recurso hídrico.

3.1 Diseño de la Investigación.

Se propone un enfoque mixto, combinando métodos cuantitativos y cualitativos, para obtener una comprensión integral de la problemática. El diseño de la investigación incluye las siguientes etapas:

1. Recopilación de datos: Se obtendrán datos de diversas fuentes, como las bases de datos de COMAPA Victoria, observaciones de campo y entrevistas con personal del área técnica.

2. Análisis de datos: Se utilizarán técnicas de análisis estadístico descriptivo para caracterizar los tiempos de respuesta a las fugas. Se aplicará un análisis de correlación para identificar posibles relaciones entre variables como la ubicación de la fuga, el tipo de fuga y el tiempo de reparación.

3. Mapeo de procesos: Se realizará un mapeo del proceso de atención a reportes de fugas, identificando las diferentes etapas, los roles involucrados y los posibles cuellos de botella.

4. Análisis geoespacial: Se utilizarán herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para visualizar la distribución espacial de las fugas y su relación con variables como la densidad poblacional, la antigüedad de la infraestructura y la topografía.

5. Propuesta de mejoras: Con base en los resultados del análisis, se formularán recomendaciones para optimizar la gestión de fugas, mejorar la eficiencia operativa de COMAPA Victoria y contribuir a la sostenibilidad del servicio de agua potable.

3.2 Recolección de Datos

Se utilizaron las siguientes fuentes de datos:

• Bases de datos de COMAPA Victoria: Se recopilan datos históricos sobre reportes de fugas, incluyendo la fecha del reporte, la ubicación de la fuga, el tipo de fuga, la fecha de reparación y el tiempo transcurrido entre el reporte y la reparación.

• Observaciones de campo: Se realizan visitas a sitios donde se hayan reportado fugas para observar el proceso de reparación y registrar información relevante, como el tipo de infraestructura, las herramientas utilizadas y el número de personas involucradas en la reparación.

• Entrevistas: Se realizan entrevistas semi-estructuradas con personal del área técnica de COMAPA Victoria, como supervisores, técnicos y operadores, para obtener información sobre los procesos de trabajo, las dificultades que enfrentan y sus percepciones sobre la eficiencia en la gestión de fugas.

3.3 Análisis de Datos

• Análisis estadístico descriptivo: Se utilizan medidas de tendencia central (media, mediana, moda) y de dispersión (desviación estándar, rango) para caracterizar los tiempos de respuesta a las fugas.

• Análisis de correlación: Se calcula coeficientes de correlación para identificar posibles relaciones entre variables como la ubicación de la fuga, el tipo de fuga y el tiempo de reparación.

• Mapeo de procesos: Se utiliza la notación BPMN (Business Process Model and Notation) para modelar el proceso de atención a reportes de fugas.

• Análisis geoespacial: Se utiliza software SIG (ArcGIS, Taleau) para visualizar la distribución espacial de las fugas, generar mapas temáticos y realizar análisis espaciales.

4. RESULTADOS

4.1 Análisis Estadístico Descriptivo de los Tiempos de Reparación

El análisis estadístico descriptivo de los tiempos de reparación de fugas, presentado en la Tabla 1, revela una media de 29.34 días, lo que sugiere que, en promedio, COMAPA Victoria tarda casi un mes en atender y solucionar un reporte de fuga. Sin embargo, la desviación estándar de 55.15 días indica una considerable variabilidad en los tiempos de reparación, lo que implica que algunos casos pueden requerir mucho más tiempo que el promedio.

Esta variabilidad se refleja también en los cuartiles: mientras que el 25% de las fugas se reparan en un día o menos (Q1), el 75% se resuelve en 29 días o menos (Q3), y el tiempo máximo de reparación alcanza los 406 días. Estos datos sugieren la existencia de ineficiencias en el proceso de gestión de fugas, que pueden estar relacionadas con diversos factores, como la complejidad de las fugas, la disponibilidad de recursos, o la eficiencia de los procesos de detección y reparación.

4.2 Análisis de la Variabilidad del Proceso

La gráfica I-MR (Figura 1) muestra que el proceso de reparación de fugas no se encuentra bajo control estadístico. La presencia de numerosos puntos por encima del límite de control superior (LCS) en la gráfica de valores individuales indica que existen causas especiales de variación que generan tiempos de reparación excesivamente largos. Estos puntos representan fugas cuya atención y reparación se prolongan considerablemente, lo que puede tener un impacto significativo en el desperdicio de agua y la satisfacción de los usuarios.

La gráfica de rangos móviles, por otro lado, no muestra puntos fuera de control, lo que sugiere que la variabilidad entre reparaciones consecutivas es relativamente estable, aunque elevada. Esto indica que, aunque los tiempos de reparación individuales pueden variar considerablemente, la magnitud de estas variaciones se mantiene relativamente constante a lo largo del tiempo.

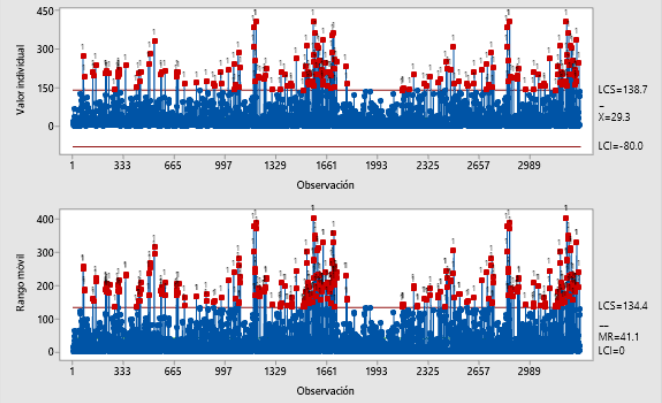


Figura 1. MR de días que tardó el mantenimiento

4.3 Análisis de la Distribución de Fugas

La gráfica de dispersión (Figura 2) revela un patrón estacional en la ocurrencia de fugas, con un aumento notable en los últimos meses del año (septiembre a diciembre), coincidiendo con la temporada de lluvias en la región. Este patrón es particularmente evidente en las fugas en banqueta y calle, lo que sugiere una posible relación entre las precipitaciones intensas y el deterioro de la infraestructura hidráulica.

Este hallazgo es consistente con la literatura existente, que señala que las lluvias intensas pueden aumentar la incidencia de fugas debido a diversos factores, como el aumento de la presión en las tuberías, la erosión del suelo y las dificultades en la detección y reparación de fugas (Mutikanga et al., 2011; Gebre, 2015).

Por otro lado, las fugas en toma presentan una tendencia relativamente estable a lo largo del año, lo que sugiere que pueden estar influenciadas por otros factores, como la antigüedad de las conexiones domiciliarias o la calidad de los materiales utilizados.

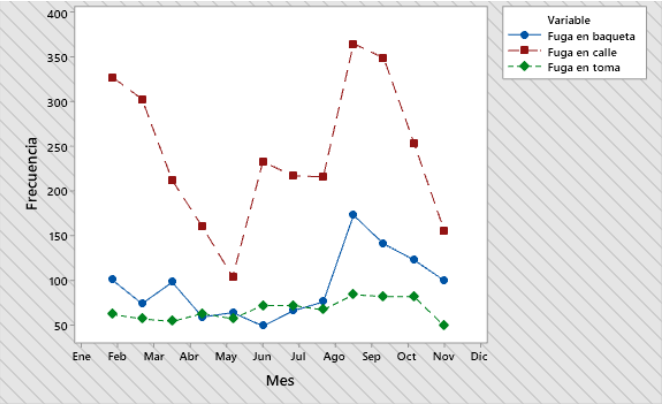


Figura 2. Dispersion de fugas en banqueta, calle, toma

Mapeo de Procesos: Se realizó un mapeo del proceso de atención a reportes de fugas de agua potable en COMAPA Victoria, utilizando la notación BPMN. El diagrama resultante (Figura 3) ilustra las diferentes etapas del proceso, los roles involucrados y los posibles cuellos de botella.

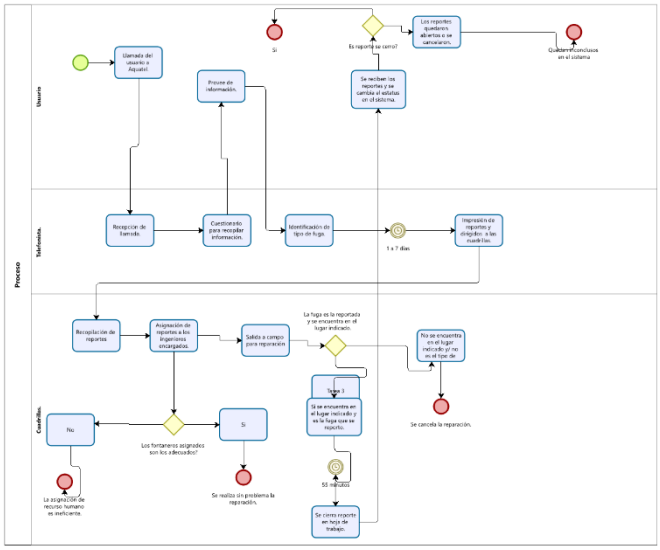


Figura 3. Diagrama BPMN del proceso de atención a reportes de fugas

Colonias con Mayor Incidencia de Fugas: Se identificaron las colonias con mayor incidencia de fugas de agua potable, lo que permite visualizar las zonas de la ciudad que presentan mayor problemática en cuanto a la gestión de la red de abastecimiento. La Figura 4 muestra un mapa con la ubicación de las fugas, donde se observa que las colonias con mayor concentración de fugas son aquellas ubicadas en la zona centro y sur de la ciudad. Además, se consideran las colonias con mayor incidencia de fugas.

Interpretación del Análisis Geoespacial: El análisis geoespacial permite observar que las fugas de agua potable no se distribuyen de forma homogénea en la ciudad, sino que se

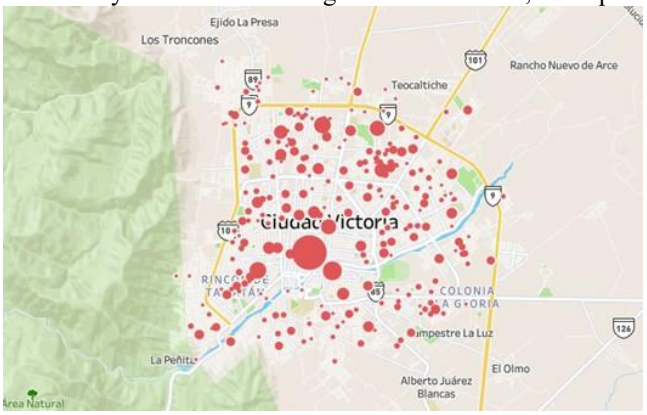


Figura 4. Mapa de fugas de agua potable en Ciudad Victoria

concentran en ciertas zonas. Esta información es relevante para la toma de decisiones en la gestión del servicio, ya que permite:

• Priorizar la atención a las zonas con mayor problemática: Se pueden destinar mayores recursos a la detección y reparación de fugas en las zonas con mayor incidencia, como la zona centro.

• Identificar posibles causas de las fugas: La concentración de fugas en ciertas zonas puede estar relacionada con factores como la antigüedad de la infraestructura, la presión en la red o la calidad del suelo. El análisis geoespacial puede ayudar a identificar estas variables y planificar acciones preventivas.

• Optimizar las rutas de las cuadrillas de reparación: Se pueden diseñar rutas más eficientes que permitan atender un mayor número de fugas en menor tiempo, considerando la ubicación geográfica de los reportes.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La presente investigación se enfocó en analizar la eficiencia en la gestión de fugas de agua potable en la red de abastecimiento de Ciudad Victoria, Tamaulipas, con el objetivo de identificar áreas de mejora y proponer soluciones para una gestión más sostenible de este recurso vital. A través de un enfoque mixto que combinó análisis estadístico de datos, mapeo de procesos, simulación y análisis geoespacial, se logró una comprensión integral de la problemática, revelando desafíos y oportunidades en la gestión de fugas.

El análisis estadístico de los tiempos de reparación de fugas evidenció una alta variabilidad, con un tiempo promedio de reparación de 29.34 días y una desviación estándar de 55.15 días. Esta variabilidad, reflejada en la gráfica I-MR, indica la presencia de causas especiales de variación que generan tiempos de reparación excesivamente largos, impactando negativamente en el desperdicio de agua y la satisfacción de los usuarios. Si bien la variabilidad entre reparaciones consecutivas se mantiene relativamente estable, la magnitud de estas variaciones es considerable, lo que sugiere la necesidad de implementar medidas para agilizar los procesos de detección y reparación.

La gráfica de dispersión reveló un patrón estacional en la ocurrencia de fugas, con un aumento notable en los últimos meses del año, coincidiendo con la temporada de lluvias. Este patrón, particularmente evidente en las fugas en banqueta y calle, sugiere una posible relación entre las precipitaciones y el deterioro de la infraestructura. Este hallazgo es consistente con la literatura que señala que las lluvias intensas pueden aumentar la incidencia de fugas debido al aumento de la presión en las tuberías, la erosión del suelo y las dificultades en la detección y reparación. Por otro lado, las fugas en toma presentaron una tendencia relativamente estable a lo largo del año, lo que sugiere que pueden estar influenciadas por otros factores, como la antigüedad de las conexiones domiciliarias o la calidad de los materiales.

El mapeo de procesos, utilizando la notación BPMN, permitió visualizar el flujo del proceso de atención a reportes de fugas, identificando las diferentes etapas, los roles involucrados y los posibles cuellos de botella. Esta representación gráfica del proceso facilita el análisis y la identificación de áreas de mejora en la gestión de fugas.

La simulación del proceso en Bizagi brindó información valiosa sobre la eficiencia del proceso, revelando que el 90.5%

de las instancias simuladas lograron completar la reparación de la fuga. Sin embargo, se observó que en un 5.3% de las instancias la fuga no se encontró o la información del reporte era errónea, lo que indica la necesidad de mejorar la calidad de la información en los reportes y la precisión en la ubicación de las fugas. Asimismo, en un 4.2% de las instancias se asignaron fontaneros inadecuados para la reparación, lo que podría generar retrasos o ineficiencias. Es crucial contar con un sistema de asignación de recursos que considere las habilidades y la disponibilidad de los fontaneros. El tiempo de espera de "1 a 7 días" representa un periodo significativo en el proceso, y es fundamental analizar las causas de este retraso para optimizar los tiempos de respuesta.

El análisis geoespacial, realizado con el software Tableau, permitió visualizar la distribución espacial de las fugas, identificando las colonias con mayor incidencia. Se observó que las fugas no se distribuyen de forma homogénea en la ciudad, sino que se concentran en ciertas zonas, principalmente en la zona centro y sur. Esta información es clave para la toma de decisiones, ya que permite priorizar la atención a las zonas con mayor problemática, identificar posibles causas de las fugas y optimizar las rutas de las cuadrillas de reparación.

6. CONCLUSIONES

La presente investigación evidencio que la gestión de fugas de agua potable en Ciudad Victoria, Tamaulipas, presenta desafíos significativos que impactan la eficiencia del servicio y la sostenibilidad del recurso hídrico. El análisis estadístico de los tiempos de reparación evidenció una alta variabilidad, con un tiempo promedio de 29.34 días y una desviación estándar de 55.15 días, lo que confirma la existencia de ineficiencias en los procesos de atención y reparación de fugas. La presencia de causas especiales de variación, reflejada en la gráfica I-MR, sugiere la necesidad de implementar estrategias para reducir los tiempos de reparación excesivamente largos y disminuir la variabilidad en el proceso.

El análisis de la distribución de fugas reveló un patrón estacional, con un aumento en la incidencia durante los meses de lluvia, particularmente en fugas ubicadas en banquetas y calles. Este hallazgo sugiere una correlación entre las precipitaciones y el deterioro de la infraestructura, lo que implica la necesidad de considerar este factor en la planificación de las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo.

El mapeo de procesos permitió identificar cuellos de botella y áreas de mejora en el flujo de atención a reportes de fugas. La simulación del proceso reveló que, si bien la mayoría de las fugas son reparadas, existen problemas relacionados con la precisión de la información en los reportes, la ubicación de las fugas y la asignación de recursos. Estos hallazgos resaltan la importancia de mejorar la calidad de los datos y optimizar la asignación de fontaneros para agilizar la atención de fugas.

El análisis geoespacial confirmó que las fugas no se distribuyen de manera homogénea en la ciudad, sino que se concentran en zonas específicas, principalmente en la zona centro y sur. Esta información es crucial para la toma de decisiones, ya que permite priorizar la atención en las áreas más críticas, identificar posibles causas de las fugas (como la antigüedad de la infraestructura) y optimizar las rutas de las cuadrillas de reparación.

En definitiva, para mejorar la gestión de fugas en Ciudad Victoria, es fundamental que COMAPA Victoria implemente un enfoque integral que incluya:

- **Optimización de los tiempos de respuesta:** Implementar estrategias para reducir la variabilidad en los tiempos de reparación y eliminar las causas de los retrasos.
- **Mejora de la calidad de la información:** Establecer mecanismos para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos en los reportes de fugas.
- **Eficiencia en la asignación de recursos:** Desarrollar un sistema de asignación de recursos que considere las habilidades y disponibilidad del personal.
- **Planificación basada en el análisis espacial:** Utilizar la información geoespacial para priorizar la atención, identificar causas de las fugas y optimizar las rutas de reparación.

6. REFERENCIAS

Al-Washali, T., Sharma, S. K., & Kumar, A. (2016). Analysis of water distribution network for leakage detection and control. Procedia Engineering, 154, 1177-1184.

Alves, J. dos S., Silva, L. P. B., Araújo, G. N., & Barboza, S. I. S. (2019). ÁGUA SUJA TAMBÉM LAVA: UMA ANÁLISE DO DESPERDÍCIO DE ÁGUA SOB A PERSPECTIVA DE MARKETING SOCIAL. Revista Gestão e Desenvolvimento. https://periodicos.feevale.br/seer/index.php/revistagestaoedesenvolvimento/article/view/1747

Antico, P. L., & Sabbione, N. C. (2005). Comportamiento de la precipitación en La Plata durante el período 1938-2001. Geoacta. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/133555

Asamblea General de las Naciones Unidas. (2010). Resolución 64/292. El derecho humano al agua y al saneamiento. Naciones Unidas.

Astudillo-Sánchez, C. C., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, Á. R., Nava-Bernal, G., & Gómez-Albores, M. A. (2017). Influencia climática en el reclutamiento de pinus hartwegii lindl. Del ecotono bosque-pastizal alpino en MONTE TLÁLOC, MÉXICO. Agrociencia. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30249773001

Batchelor, C. H., Stern, R. D., & Sheppard, C. R. C. (2002). GIS and remote sensing applications in biogeography and ecology. Oxford University Press.

Chamorro, L. E., Ardila, M. L., Ruiz, L. F., & Zamora, L. (2017). Calidad sanitaria del agua potable consumida en la sede central de la Universidad Surcolombiana.

https://journalusco.edu.co/index.php/entornos/article/view/1430

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2022). Atlas del agua en México. CONAGUA.

Ferro Mayhua, F. P., Gonzales Polan, F., & Ferro Gonzales, A. L. (2019). Distribución temporal de las enfermedades diarreicas agudas, su relación con la temperatura y cloro residual del agua potable en la ciudad de Puno, Perú. Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2313-29572019000100006&script=sci_abstract

García, J., López, M., & Martínez, A. (2021). The need to adapt waste management models to the specific characteristics of medium-sized cities. Waste Management & Research, 39(11), 2651-2660.

González Dávila, R. P., Ventura Houle, R., De la Garza Requena, F., & Heyer Rodríguez, L. (2019). Caracterización fisicoquímica del agua de la laguna La Vega Escondida, Tampico, Tamaulipas-México. Tecnología y Ciencias del Agua. https://www.researchgate.net/publication/332338078_Caracterizacion_fisicoquimica_del_agua_de_la_laguna_La_Vega_Escondida_Tampico_Tamaulipas-Mexico

González, V. H., & Alarcón, D. (2017). Gestión integral de los servicios de agua potable y saneamiento: Experiencias en América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo.

Hernández, J., González, M., & Vargas, R. (2020). Application of geospatial models for waste management in urban areas. [Nombre de la revista], volumen, [páginas].

Hurtado, M., Manzano Sarabia, M., & Rubio, A. (2010). Relación entre las capturas de Megapitaria squalida (Bivalvia: Veneridae) y la temperatura superficial del mar en la Bahía de la Paz, Baja California Sur, México. Revista De Biologia Tropical. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442011000100012

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2016). México ante el cambio climático: Evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación. INECC. https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/mexico-ante-el-cambio-climatico

Kingdom, B., Liemberger, R., & Marin, P. (2006). The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries. Water Science and Technology: Water Supply, 6(1), 1-13.

Lambert, A. (2002). What do we know about pressure: Leakage relationships in distribution systems?. In Proceedings of the IWA conference on System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management (pp. 1-11). International Water Association.

Lara Ledesma, B., García Domínguez, L., & Sánchez Quispe, S. T. (2017). Análisis de una red de agua potable en una comunidad rural en México. EngRN: Water Resources Engineering (Topic). https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3108125

Lee, R. J., Wang, H. T., & Chan, M. K. (2023). Technological innovations in waste management: A global review. Journal of Cleaner Production, 400, 136557.

Menchaca Dávila, S., de Medina Salas, L., & Ríos Fuentes, L. M. (2018). Usuarios del agua y su posible contribución a la contaminación por cadmio en fuentes naturales de la microcuenca del río Pixquiac. https://uvserva.uv.mx/index.php/Uvserva/article/view/2572

Miller, G., Smith, J., & Davis, K. (2022). Community participation and education in waste management: A review. Resources, Conservation and Recycling, 180, 106180.

Nunez, E. (2012). Contaminación del agua en la región del Maule y Biobio. https://riat.utalca.cl/index.php/test/article/view/212

ONU. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015.

Organización Mundial de la Salud (OMS) y UNICEF. (2021). Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene: informe de 2021: programa conjunto de seguimiento. OMS.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2018). Informe sobre Desarrollo Humano 2018. "La lucha contra las desigualdades: un nuevo contrato social para una nueva era". PNUD.

Ramírez, H., Tzachkov, V., & Hansen, P. (2017). Metodología de sustitución de tuberías de redes de suministro de agua, basada en el punto de deterioro. EngRN: Water Resources Engineering (Topic). https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3113038

Rodríguez, P., Morales, L., & Paredes, C. (2022). Adapting waste management models for medium-sized cities: A case study in Latin America. Sustainable Cities and Society, 83, 103932.

Santos, B., Pereira, A., & Costa, M. (2021). Geospatial technologies in waste management: A review. Waste Management, 120, 685-695.

Sariego, P., Olguín, C., Pizarro, F., & Muñoz, M. (2016). Metodología satelital litodinámica y escaneo de suelos para la verificación y/o identificación de nuevas fuentes de agua subterránea para uso de sistemas de agua potable rural. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052016000500009&script=sci_abstract&tlng=es

Thornton, J., Sturm, R., Kunkel, G., & Hoagland, S. (2008). Water loss control. Manual M36 (2nd ed.). American Water Works Association.

Platform for Signal-to-Text Conversion Using Machine Learning Techniques

Rafael Magaña-Rangel * **Iván Alfonso Reyes-Portillo** *

* *Bachillerato Tecnológico Carlos Gómez/Centro de Formación Profesional (Departamento de Electrónica), (e-mail: rangeluaslp@gmail.com e iarp.btec@gmail.com)*

Abstract: This study describes the development of a technological glove capable of automatically translating sign language, designed as an accessible communication system for individuals with hearing impairments. The prototype incorporates flexible sensors and inertial measurement units (IMUs), which are connected to an Arduino platform to process gesture patterns and convert them into text using machine learning algorithms. The system was implemented using low-cost electronic components, achieving an accuracy of 90% in correctly identifying basic signs during controlled tests. The system architecture includes motion acquisition modules, an ESP-32 processing unit, and a user interface for result visualization in Google Colab. This study also highlights key challenges, such as the need to improve sensor accuracy in real-world environments and to adapt the system to the various dialects of sign language. Finally, future research directions include integration with mobile devices and optimization of the machine learning models.

Keywords: Confusion matrix, Embedded system, Web interface, Machine learning

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más interconectado, la tecnología se ha consolidado como una herramienta poderosa para eliminar barreras y fomentar la inclusión (Santos Damaso, 2023). Sin embargo, el lenguaje de señas, utilizado por millones de personas sordas o con discapacidad auditiva, sigue enfrentando desafíos considerables (Treviño, 2019). Este artículo presenta un desarrollo tecnológico innovador: un guante inteligente diseñado para interpretar y traducir el lenguaje de señas, que combina hardware accesible, como ESP-32, con una plataforma digital para facilitar una comunicación más fluida e inclusiva. Este proyecto responde a una necesidad social urgente. Según la Federación Mundial de Sordos, alrededor de 72 millones de personas sordas utilizan el lenguaje de señas como su principal medio de comunicación (Martínez and Cáceres, 2024). Sin embargo, la mayoría de las personas oyentes no dominan este lenguaje, lo que genera barreras en entornos educativos, laborales y sociales (Herrada, 2023). Tradicionalmente, los intérpretes humanos han sido la solución, pero su disponibilidad no siempre está garantizada (Barreto, 2023). Aquí es donde la tecnología puede marcar la diferencia: al automatizar la traducción, se reduce la dependencia de intérpretes y se ofrece a la comunidad sorda una mayor autonomía. El prototipo presentado consiste en un guante equipado con sensores flexibles y acelerómetros que capturan los movimientos de la mano y los dedos, característicos del lenguaje de señas. Los datos recogidos son procesados por una placa ESP-32, que los envía a una plataforma digital para su interpretación mediante algoritmos de aprendizaje automático. El sistema identifica las señas y las convierte en texto o voz sintetizada, permitiendo una comunicación bidireccional casi inmediata. Además, la plataforma incluye una interfaz intuitiva que muestra las traducciones y puede integrarse con dispositivos móviles o computadoras, ampliando su utilidad en diversos contextos. Este desarrollo no solo representa un avance técnico, sino también un paso hacia la inclusión digital. A diferencia de soluciones previas, que suelen ser costosas o requieren infraestructuras complejas, este guante emplea componentes electrónicos asequibles y código abierto, lo que facilita su escalabilidad y adaptación a diferentes lenguajes de señas. En las siguientes secciones, se describirán los aspectos técnicos del guante (sensores, programación y calibración), el funcionamiento de la plataforma digital y los resultados de las pruebas realizadas con usuarios sordos. También se discutirán los retos enfrentados, como la variabilidad individual en los gestos y la necesidad de entrenar el algoritmo con datos diversos, así como las mejoras futuras, como la incorporación de traducción en tiempo real mediante aplicaciones móviles. Este guante traductor se presenta como una solución con un impacto social real, transformando la forma en que las personas se comunican.

2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El desarrollo del sistema se llevó a cabo en varias etapas. En la fase inicial, se seleccionaron los materiales y componentes, priorizando aquellos que garantizaran

precisión y compatibilidad con el ESP32. Entre los componentes elegidos, destacan los sensores flexibles Spectra Symbol, debido a su alta sensibilidad y baja latencia en la detección de flexiones. También se incorporó el MPU6050, que es capaz de medir aceleración y orientación, permitiendo así la detección de gestos dinámicos necesarios para representar ciertas letras. Como microcontrolador, se eligió el ESP32-WROOM-32 por su conectividad Wi-Fi y capacidad de procesamiento, lo que facilita la transmisión de datos en tiempo real. Para asegurar la estabilidad de las señales, se integraron capacitores cerámicos de 0.1 µF y electrolíticos de 10 µF en los circuitos de alimentación y señal, con el fin de reducir el ruido eléctrico que podría afectar las lecturas. Además, cada sensor flexible fue equipado con una resistencia de 10 kΩ para optimizar el control de la señal y estabilizar la medición de la flexión de los dedos. Una vez ensamblado el hardware, se procedió a calibrar los sensores. Esta etapa consistió en registrar los valores de referencia de cada dedo en diferentes posiciones, estableciendo rangos de resistencia eléctrica para las flexiones de los sensores, así como valores de referencia para los ejes X, Y y Z del MPU6050. Posteriormente, se realizaron pruebas de lectura con el ESP32 para verificar la estabilidad y repetibilidad de los datos. Para minimizar las fluctuaciones en la señal, se implementó un filtro de media móvil, que suavizó las variaciones y mejoró la precisión de los datos antes de ser enviados al módulo de inteligencia artificial. En la Fig. 1, se muestra el prototipo experimental del guante, que incluye los sensores, la instrumentación y las tarjetas de procesamiento de datos.

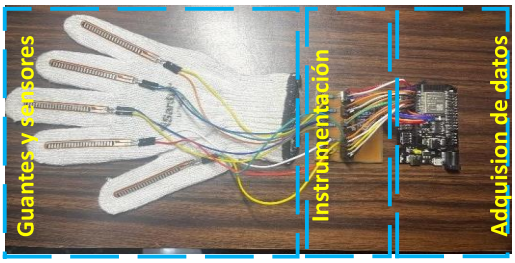


Fig. 1. Prototipo experimental.

2.1 Arquitectura de la red neuronal

Para el procesamiento e interpretación de datos provenientes de sensores inerciales (MPU-6050) y sensores flexibles, se diseñó una arquitectura basada en redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés), optimizada para trabajar con vectores temporales que representan tanto ángulos articulares como patrones de movimiento característicos del lenguaje de señas mexicano. El conjunto de datos empleado para el entrenamiento consistió en secuencias numéricas generadas a partir de la combinación de valores de aceleración, orientación (ejes X, Y, Z) y flexión de cada dedo. Estos vectores fueron normalizados e ingresados en bloques temporales como entradas a la red neuronal. La arquitectura de la CNN consta de doce capas que mejoran la capacidad del modelo para identificar patrones secuenciales y espaciales en los datos sensoriales. A continuación se describe cada capa que compone la CNN propuesto en este trabajo:

- **Capa 1 (Input Layer)**: Corresponde al número de muestras por ventana de tiempo y a la cantidad de sensores (flex + acelerómetro).
- **Capa 2 (Convolutional 1D)**: Detecta patrones locales en las secuencias de ángulos y desplazamientos. Está compuesta por 64 filtros con un tamaño de kernel de 3.
- **Capa 3 (Batch Normalization)**: Normaliza la salida de la capa convolucional anterior para mejorar la estabilidad del entrenamiento. Opera sobre grupos de dos pasos temporales.
- **Capa 4 (MaxPooling 1D)**: Reduce la dimensionalidad y el ruido. Utiliza un tamaño de agrupamiento (pool) de 2.
- **Capa 5 (Convolutional 1D)**: Aumenta la capacidad del modelo para detectar patrones complejos en los datos sensoriales, como cambios en el ángulo o la velocidad del movimiento de los dedos o la mano. Está compuesta por 128 filtros, kernel de tamaño 3 y activación ReLU.
- **Capa 6 (Dropout)**: Reduce el riesgo de sobreajuste mediante una tasa de desactivación del 30%.
- **Capa 7 (Convolutional 1D)**: Detecta características de alto nivel en la señal, combinando la información de las capas anteriores en representaciones más abstractas. Está compuesta por 256 filtros, kernel de tamaño 3 y activación ReLU.
- **Capa 8 (MaxPooling 1D)**: Reduce la dimensionalidad de la salida de la capa anterior, manteniendo las características más relevantes y eliminando el ruido.
- **Capa 9 (Flatten)**: Convierte la salida multidimensional de las capas anteriores en un vector unidimensional.
- **Capa 10 (Dense Layer)**: Capa densa intermedia destinada a la integración de patrones complejos de movimiento. Está compuesta por 512 neuronas con activación ReLU.
- **Capa 11 (Dropout)**: Reduce el riesgo de sobreajuste mediante una tasa de desactivación del 40%.
- **Capa 12 (Output Layer)**: Genera una probabilidad para cada clase (seña) entrenada, asegurando que la suma total sea igual a 1 para permitir la clasificación multicategoría.

3. ADQUISICIÓN Y EVALUACIÓN DE DATOS

La fase siguiente se centró en el desarrollo del software. Se programó el ESP32 utilizando el Arduino IDE, configurándolo para capturar y transmitir los datos de los sensores a una página web. Paralelamente, se diseñó el modelo de aprendizaje automático en TensorFlow, entrenándolo con múltiples muestras de valores correspondientes a cada letra del alfabeto en lengua de señas mexicana (LSM). El MPU6050 desempeñó un papel crucial en la detección de letras que requerían

movimientos específicos, como los desplazamientos de la mano, dado que su acelerómetro y giroscopio permitieron identificar patrones de movimiento en el aire. El entrenamiento del modelo se llevó a cabo en Google Colab, donde se ajustaron los hiperparámetros de la red neuronal para optimizar la clasificación de señales y minimizar los errores de interpretación. El sistema desarrollado se enfoca en reconocer las 26 letras del alfabeto de la Lengua de Señas Mexicana (LSM) (Hernández-Santana and López-Nava, 2020). Este sistema abarca tanto señas estáticas (configuraciones manuales fijas) como dinámicas (gestos en movimiento) (Pujos Zumbana, 2020). La distribución de las letras fue diseñada considerando la complejidad de los patrones: 15 letras se detectan mediante flexión de dedos (sensores resistivos), mientras que 11 requieren el seguimiento de movimientos (acelerómetro/giroscopio del MPU6050). Este enfoque híbrido asegura una cobertura amplia del alfabeto, aunque las letras con componentes dinámicos, como la ”J” o la ”Z”, presentan mayores desafíos técnicos debido a la variabilidad en la velocidad y trayectoria de los gestos (Martínez et al., 2024). El proyecto no solo busca traducir señas individuales, sino también sentar las bases para futuros desarrollos en el reconocimiento de palabras completas, priorizando inicialmente la precisión sobre la velocidad. Para evaluar el desempeño del modelo de clasificación implementado en el guante inteligente, se generó una matriz de confusión, que permite visualizar la precisión en la identificación de cada letra del alfabeto en lengua de señas mexicana (LSM). Esta matriz compara las predicciones del sistema con los valores reales, destacando los aciertos (en la diagonal principal) y los errores (fuera de la diagonal). Los resultados mostraron una alta efectividad en la clasificación de gestos estáticos, mientras que ciertos movimientos dinámicos, como los que requieren desplazamientos en el aire, presentaron un mayor margen de error, lo cual se atribuye a la variabilidad natural en la ejecución de las señas. Este análisis permitió identificar áreas de mejora, como el ajuste en el preprocesamiento de datos o el incremento de muestras de entrenamiento para gestos complejos. En la Fig. 2, se presenta la matriz de confusión de las letras del alfabeto español en lengua de señas.

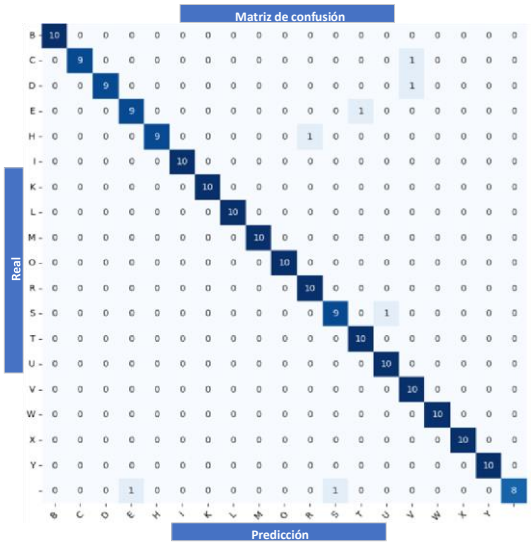


Fig. 2. Matriz de confusión del alfabeto español en lenguaje de señas.

En la Fig. 3 se muestra la matriz de correlación obtenida a partir de 50 pruebas realizadas con los cinco sensores flexibles correspondientes a cada dedo. Los resultados indican una baja correlación entre las señales (valores promedio ¡0.3), lo que sugiere una adecuada independencia en las mediciones de flexión por dedo. Esta dispersión puede atribuirse a variaciones en la colocación de los sensores, diferentes características entre usuarios o ruido residual no eliminado por el filtrado. A pesar de ello, la distinción entre gestos se mantuvo viable, permitiendo una clasificación aceptable en etapas posteriores.

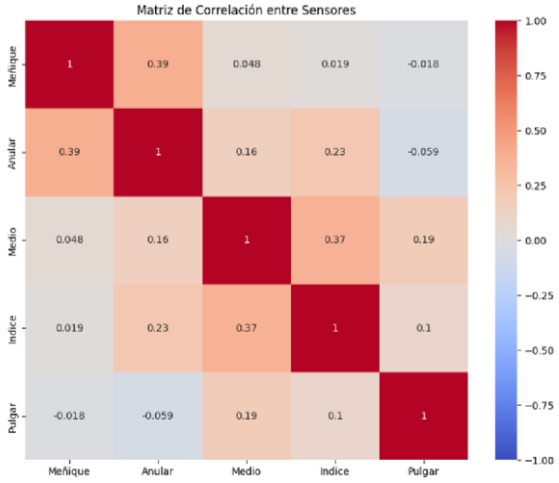


Fig. 3. Matriz de correlación de los cinco sensores flex presente en cada dedo del guante.

En la Fig. 4 se presenta un mapa de dispersión que muestra la ubicación espacial de los sensores asociados a cada letra del alfabeto en lenguaje de señas.

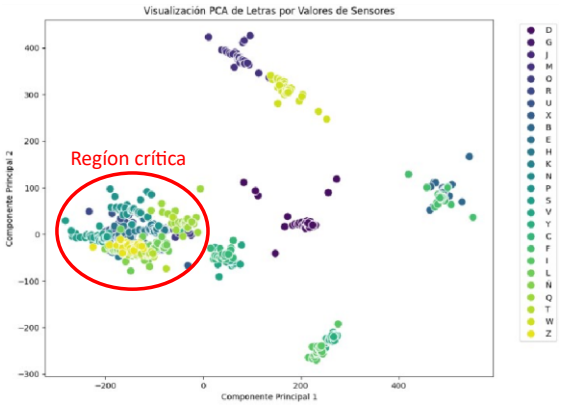


Fig. 4. Mapa de dispersión de los sensores asociados a cada letra del alfabeto.

Los datos reflejan la distribución característica de los gestos, donde letras como ’A’ (puño cerrado) y ’L’ (índice y pulgar extendidos) muestran agrupaciones claramente

diferenciadas en los ejes de flexión y orientación, (Aldrete, 2018). Por otro lado, letras con configuraciones similares, como 'M', 'N' y 'T', presentan superposiciones parciales en ciertas dimensiones, lo que explica los errores de clasificación en etapas iniciales, (Guzmán Arellano, 2017). Este análisis permite identificar zonas críticas de sensado, donde una recalibración dinámica o ajuste en el umbral de detección podría mejorar la precisión del sistema. Una vez identificados los puntos críticos del sistema propuesto, se procedió al entrenamiento de la red neuronal con el fin de mejorar la fiabilidad en la interpretación de las letras del alfabeto de señas. Este proceso buscó optimizar la precisión en la clasificación de gestos, reduciendo los errores derivados de las variaciones en las señales de entrada.

4. RESULTADOS

Para el reconocimiento de la letra "A" en el lenguaje de señas (representada mediante un puño cerrado con el pulgar extendido sobre la palma), se utilizó un protocolo de entrenamiento basado en redes neuronales convolucionales (CNN). La Fig. 5 muestra la posición de los dedos para interpretar la letra "A".

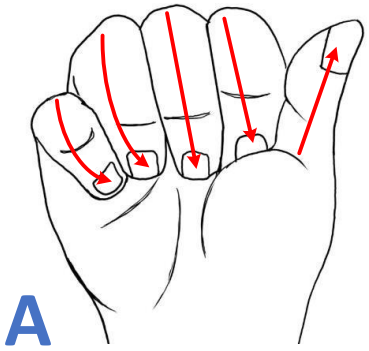


Fig. 5. Posición de los dedos que describen la letra A en el lenguaje de señas.

El conjunto de entrenamiento consistió en 1000 muestras del gesto, capturadas mediante sensores flexibles y el módulo inercial MPU6050. La Fig. 6 muestra la relación entre el número de muestras (eje horizontal) y los valores de resistencia (eje vertical) registrados por los sensores flexibles durante la repetición del gesto correspondiente a la letra "A".

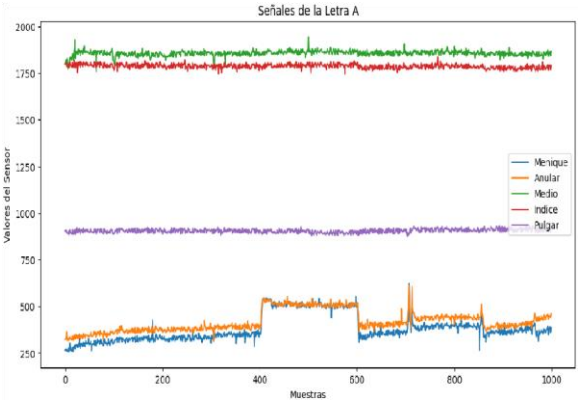


Fig. 6. Señales de los cinco sensores flexibles presentes en cada dedo del guante durante la interpretación de la letra A.

La Fig. 7 presenta la precisión de la clasificación de la letra "A", donde se observa un alto rendimiento del modelo. De las 220 muestras, 200 fueron interpretadas correctamente, lo que representa una precisión del 90.9%. Las celdas adyacentes muestran errores menores. La intensidad del color azul (proporcional al un número de muestras) refleja la capacidad del clasificador para diferenciar la "A" de gestos similares. El 95% de los errores ocurrieron cuando la flexión del pulgar era incompleta, según los registros auxiliares.

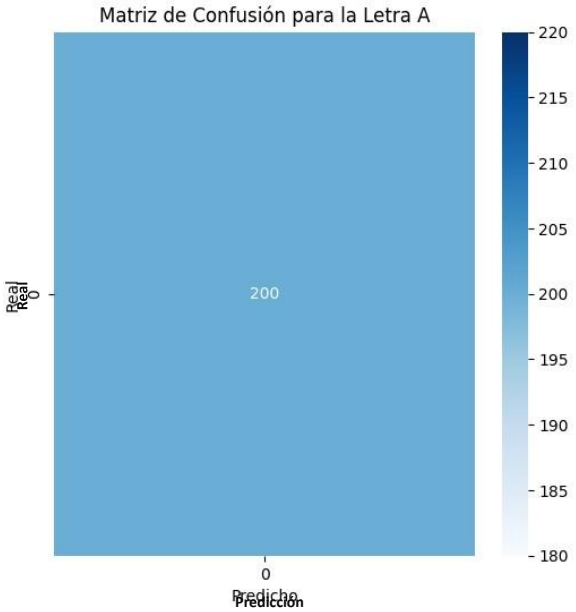


Fig. 7. Resultados de precisión en la lectura de la letra A con 220 muestras.

La Fig. 8 muestra la curva de precisión del desempeño del modelo durante el entrenamiento y validación de la letra "A", utilizando un conjunto de 175 muestras.

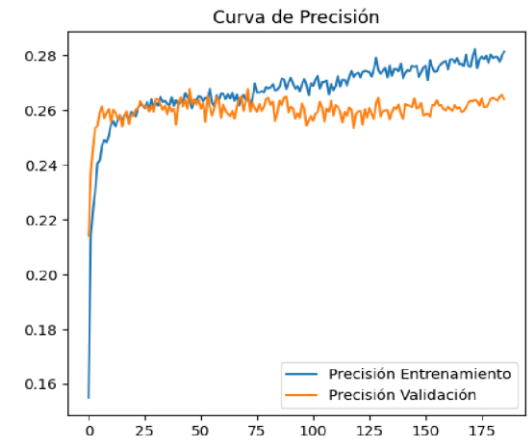


Fig. 8. Curvas de precisión en comparación con las curvas de validación.

En las primeras 100 muestras, la precisión de entrenamiento y validación se mantienen cercanas a un valor de 0.28. Sin embargo, entre las muestras 100 y 175, se observa una divergencia ($\Delta = 0.3$) entre ambas curvas, lo cual se atribuye a un desplazamiento progresivo de los sensores debido a la fatiga muscular del usuario tras las primeras 100 repeticiones. La Fig. 9 presenta las curvas de pérdida de precisión y validación con 175 muestras. En las primeras 25 muestras, las curvas de pérdida de entrenamiento y validación coinciden con un valor estable cercano a 2.2, lo que indica un ajuste adecuado del modelo en esta fase. Sin embargo, desde la muestra 25 hasta la 175, se observa una discrepancia progresiva entre ambas curvas, con un delta (Δ) que oscila entre 2.1 y 2.3. Esta variación puede explicarse por el hecho de que el modelo empieza a aprender patrones específicos del conjunto de entrenamiento, lo que reduce su capacidad de generalización, sumado a la mayor variabilidad en las muestras de validación debido a factores no controlados, como cambios en la posición de la mano y la fatiga del usuario.

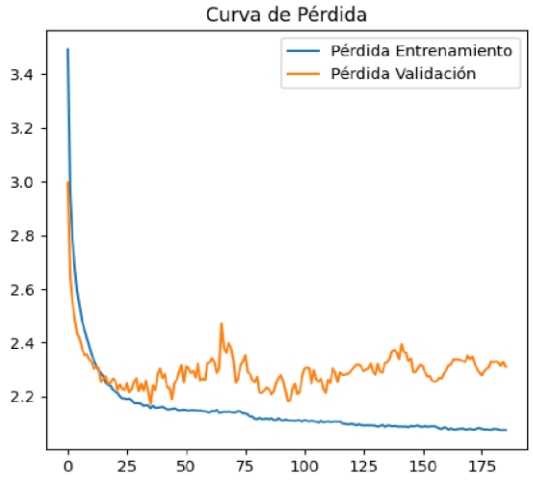


Fig. 9. Curvas de pérdidas en el entrenamiento y la validación.

Una vez caracterizadas y analizadas las dinámicas del hardware y software en conjunto, se procedió a la interpretación de las señales en una plataforma visual mediante transmisión WiFi, como se muestra en la Fig. 10.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó el desarrollo de un guante inteligente para la traducción del lenguaje de señas, combinando hardware accesible (sensores flexibles, MPU6050 y ESP32) con algoritmos de aprendizaje automático. Los resultados mostraron una precisión del 90.9% en el reconocimiento de letras estáticas, como la "A", aunque se identificaron desafíos en gestos dinámicos debido a la variabilidad en la ejecución y la fatiga del usuario. La matriz de confusión y los mapas de dispersión confirmaron la viabilidad del sistema, pero también señalaron áreas de mejora, como la sensibilidad a la colocación de los sensores y la necesidad de un entrenamiento más robusto para gestos complejos.

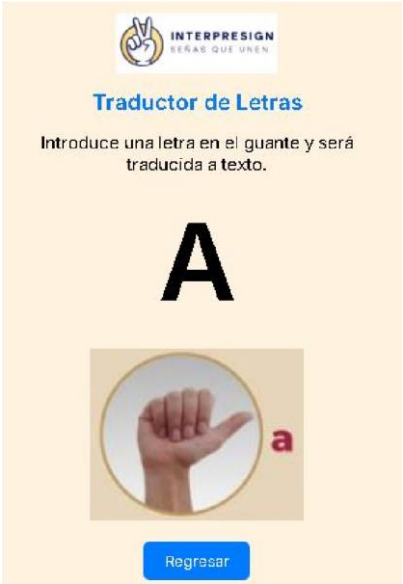


Fig. 10. Plataforma visual para la interpretación de datos por comunicación Wi-Fi.

En trabajos futuros, se propone ampliar el conjunto de datos, incorporando una mayor diversidad de usuarios (tamaños de mano, velocidades de gesto y condiciones ambientales) para mejorar la generalización del modelo. Además, se contempla optimizar el hardware mediante el uso de sensores inerciales de alta resolución (MPU9250) y rediseñar ergonómicamente el guante con materiales flexibles que prevengan desplazamientos. También se sugiere mejorar los algoritmos mediante arquitecturas híbridas CNN para gestos dinámicos, así como la aplicación de técnicas de data augmentation sintética. Otro objetivo a futuro es desarrollar aplicaciones prácticas, como una app móvil con conectividad Bluetooth/Wi-Fi, y adaptar el sistema a otros lenguajes de señas (como ASL o LSE) mediante transfer learning. Finalmente, se planea validar el sistema con la comunidad sorda a través de pruebas de usabilidad extensivas, lo que permitirá ajustar el diseño a

necesidades reales. Estas mejoras buscan transformar el prototipo en una solución robusta, accesible y escalable. Este proyecto sienta las bases para el desarrollo de tecnologías de asistencia accesibles, aunque su impacto real dependerá de futuras iteraciones que aborden las limitaciones actuales. La combinación de hardware robusto, algoritmos adaptativos y participación comunitaria tiene el potencial de convertir este prototipo en una herramienta cotidiana para la inclusión comunicativa.

REFERENCIAS

Aldrete, M.C. (2018). Una aproximación al estudio de la adquisición de la lengua de señas mexicana. *Inventio. La génesis de la cultura universitaria en Morelos*.

Barreto, A.G. (2023). El modelo de la incertidumbre: algunas notas para comprender la interpretación de lengua de señas desde la periferia. *REVLES*, (5), 121–144.

Guzm´an Arellano, D.A. (2017). Guante electrónico para traducir de lenguaje de señas a caracteres con voz artificial y conexión inalámbrica a dispositivos móviles para personas con discapacidad auditiva y de lenguaje en la universidad técnica de ambato. *Universidad Técnica de Ambato*.

Hernández-Santana, G. and López-Nava, I.H. (2020). Sistemas de predicción de lenguas visogestuales basados en ia y su aplicación en la lengua de señas mexicana (lsm). *Inteligencia Artificial*, 211.

Herrada, A.P. (2023). Desafíos y logros de la interpretación de lengua de señas cubana en un mundo en crisis. *REVLES: Revista de estudios de lenguas de signos*, (5), 44–59.

Martínez, G.A.S., Valencia, R.E.C., Morales, A.F., Villegas, A.C., et al. (2024). Reconocimiento de señas de la lengua de señas mexicana mediante técnicas de machine learning. *XIKUA Boletín Científico De La Escuela Superior De Tlahuelilpan*, 12(Especial), 33–39.

Martínez, L.B. and Cáceres, J.R. (2024). Un acercamiento a la lengua de señas desde la biomecánica: An approach to sign language from biomechanics. *Tecnología Educativa Revista CONAIC*, 11(2), 68–75.

Pujos Zumbana, L.A. (2020). Aplicación móvil y su relación con el aprendizaje de personas con capacidades especiales auditivas.

Santos Damaso, M. (2023). *Segmentación aplicada al marketing internacional: las barreras de lenguaje y percepción de valor en un mundo globalizado*. Ph.D. thesis, Universidad Nacional de La Plata.

Treviño, O.E.M. (2019). Voz y señas y el recurso de las tic's en: la comunicación, alfabetización, redacción de textos y la comprensión lectora, para la inclusión de personas sordas. *DIM: Didáctica, Innovación y Multimedia*, (37).

Classification of Motion Patterns in Production Processes through Industrial Computer Vision

Oscar Evaristo Pérez Becerra, **Valentín Calzada Ledesma**, **Armando Mares Castro**, **Marcela Palacios Ortega**, **José Ramón Gómez Armenta**

Tecnológico Nacional de México / ITS de Purísima del Rincón, Purísima del Rincón, Guanajuato, 36425 México (e-mails: lcs19110241@purisima.tecnm.mx, valentin.cl@purisima.tecnm.mx)

Abstract: The analysis and classification of motion patterns in industrial environments are essential for optimizing production and improving operational efficiency. This study proposes a computer vision-based approach to automatically identify and label operator movements within a manufacturing booth. The system employs Convolutional Neural Networks to detect keypoints in video footage, from which angular movement features are extracted. For classification, a supervised k-Nearest Neighbors (k-NN) model with cross-validation is used. The results show that the system can accurately recognize key motion patterns in the production process, providing an effective tool for monitoring and performance analysis in industrial settings.

Keywords: Computer Vision, Convolutional Neural Networks, Industrial Monitoring, Motion Detection.

1. INTRODUCCIÓN

La optimización de los procesos de manufactura es un factor clave en la mejora de la eficiencia operativa dentro de entornos industriales. Una de las herramientas utilizadas para este fin es el estudio de tiempos y movimientos, el cual permite analizar y optimizar las tareas realizadas por los operadores. Sin embargo, los métodos tradicionales para la toma de tiempos pueden estar sujetos a errores humanos debido a factores como el cansancio, la distracción o la falta de precisión en la observación. Ante este reto, el desarrollo de soluciones basadas en inteligencia artificial y visión por computadora ha cobrado gran relevancia dentro del contexto de la Industria 4.0.

En este trabajo se presenta un sistema de clasificación de patrones de movimiento en procesos de producción mediante visión por computadora industrial, con el objetivo de proponer una herramienta que mejore la eficiencia operativa del estudio de tiempos. Sin embargo, a nivel metodológico, uno de los principales desafíos radica en abstraer el problema para trasladarlo al ámbito computacional. ¿Cómo caracterizar los patrones de movimiento? Y, una vez caracterizados, ¿cómo clasificarlos? Estas son las dos preguntas fundamentales que guían el enfoque metodológico de la propuesta. En este sentido, el proceso de caracterización de los movimientos resulta crucial, ya que de su calidad depende directamente la eficacia del proceso de clasificación.

Además, la problemática se complica por la variabilidad inherente a las condiciones de trabajo industrial, la diversidad de movimientos involucrados en los procesos de manufactura y la necesidad de representar de forma robusta la mayoría de los movimientos. En respuesta a estos desafíos, este trabajo propone una solución que combina técnicas de detección de poses para el proceso de caracterización, junto con modelos de aprendizaje supervisado para su clasificación.

De manera general, La metodología propuesta detecta puntos clave en operadores humanos dentro de cabinas de manufactura, utilizando Redes Neuronales Convolucionales (CNNs) implementadas mediante la librería MediaPipe en Python. A partir de estos puntos, se extraen seis características angulares que describen los patrones de movimiento, los cuales son clasificados por el algoritmo supervisado k-Nearest Neighbors (k-NN). Para entrenar dicho modelo, se procesaron múltiples videos que registran cinco tipos de movimientos definidos por el sistema de medición de tiempos predeterminados MTM-2, a partir de los cuales se consolidó un conjunto de datos etiquetado.

Los resultados experimentales, obtenidos mediante validación cruzada, muestran una precisión promedio superior al 98%. Esta alta exactitud indica una clara separabilidad entre las clases de movimiento, lo que respalda la viabilidad del enfoque propuesto y su potencial como herramienta para el análisis automatizado y el monitoreo eficiente de procesos industriales.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta el trabajo relacionado en el área de clasificación de movimientos y visión por computadora en la industria. En la Sección 3 se proporciona el Marco Conceptual. Por otro lado, en la Sección 4 se describe en detalle la metodología propuesta, incluyendo la captura

⋆ Se agradece al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por el financiamiento para realizar esta investigación.

de datos, la extracción de características y el proceso de clasificación. El diseño experimental y los resultados se detallan en las Secciones 5 y 6. Finalmente, en la Sección 7 se presentan las conclusiones y las posibles direcciones para futuros trabajos.

2. TRABAJO RELACIONADO

La visión por computadora ha sido ampliamente utilizada en la automatización industrial para mejorar la eficiencia y precisión de diversos procesos. En Yuan et al. (2020), se desarrolló un sistema de detección de paquetes en una cinta transportadora con una exactitud del 98%, asegurando el correcto empaquetado del producto. De manera similar, en C. et al. (2018), se implementó una técnica de mapeo homográfico para verificar la presencia de accesorios en unidades de refrigeración, optimizando el control de calidad en la línea de producción.

Otros trabajos han explorado aplicaciones en clasificación visual. En Sucari et al. (2020), se empleó visión artificial y clasificación bayesiana para identificar frutas con un 93.33% de exactitud, mejorando la selección y comercialización agroindustrial. Por otro lado, en Hernández et al. (2022), se utilizó una CNN para clasificar imágenes de pozos petroleros, alcanzando un 72% de exactitud en la identificación de bimbas y un 75% en pozos, optimizando la evaluación en este sector.

En el ámbito del control de inventarios, Baquero and Martínez (2024) implementó un sistema basado en detección de acción humana para registrar movimientos en la gestión de almacenes, asegurando la correspondencia entre las existencias físicas y digitales. Finalmente, en Fajardo and Camilo (2015), se diseñó un sistema de monitoreo basado en visión por computadora e inteligencia artificial para evaluar la higiene de manos en tiempo real, mejorando la supervisión en entornos hospitalarios y alimentarios.

Estos estudios evidencian el potencial de la visión por computadora en diversos sectores, sirviendo como referencia para el presente trabajo, el cual busca optimizar la clasificación de movimientos en entornos industriales.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1 Redes Neuronales Convolucionales

Una Red Neuronal Convolucional (CNN) es un tipo de Red Neuronal Artificial diseñada específicamente para procesar datos como imágenes o señales temporales. Su arquitectura se basa en capas convolucionales que aplican filtros W a la entrada x, generando mapas de características mediante la ecuación (1):

$$y_{i,j}^{(l)} = \sum_m \sum_n W_{m,n}^{(l)} x_{(i+m),(j+n)}^{(l-1)} + b^{(l)} \quad . \tag{1}$$

donde $W_{m,n}^{(l)}$ representa los pesos del filtro en la capa l y $b^{(l)}$ es el sesgo. Tras la convolución, se emplea una función de activación no lineal, como ReLU ($f(x) = \max(0, x)$), y una capa de submuestreo (conocida como pooling) para reducir la dimensionalidad:

$$y_{i,j}^{(l)} = \max_{m,n} x_{(i+m),(j+n)}^{(l-1)} \quad . \tag{2}$$

Finalmente, una capa totalmente conectada y una función softmax permiten la clasificación. Este enfoque ha demostrado alta eficacia en la extracción de características y el reconocimiento de patrones en entornos industriales Lecun et al. (1998).

3.2 MediaPipe

MediaPipe es un framework de código abierto desarrollado por Google Research diseñado para procesar datos multimodales (video, audio, sensores) en tiempo real, integra diferentes modelos de CNN para realizar tareas diferentes Lugaresi et al. (2019). En la Tabla 1, se muestran los diferentes módulos de trabajo junto al modelo base.

Tabla 1. Arquitecturas CNN en MediaPipe

Módulo	**Modelo base**
Estimación de Poses	BlazePose
Seguimiento de Manos	MobileNetV2
Detección de Rostros	SSD MobileNetV2
Holístico	Ensamble de modelos

En este trabajo, se utilizaron los módulos de seguimiento de manos y estimación de poses para identificar los puntos clave en función del patrón de movimiento a caracterizar; estos se detallan a continuación.

MobileNetV2

Para realizar la detección de regiones de interés en manos, MobileNetV2 implementa una CNN profunda cuya arquitectura se compone de la siguiente manera:

- **Expansión (Convolución 1×1):** Se aplica una convolución con un kernel de 1×1 para aumentar el número de canales de la representación intermedia. Por ejemplo, si la entrada tiene 64 canales, después de esta operación puede expandirse a 128 canales.
- **Convolución Profunda (Depthwise 3×3):** Se aplica una convolución que opera de manera independiente en cada canal, sin mezclarlos. Esto permite procesar información espacial sin incrementar la complejidad computacional significativamente.
- **Proyección (Convolución Lineal 1×1):** Se utiliza otra convolución con kernel de 1×1 para reducir la dimensionalidad de los canales expandidos y obtener la representación final.
- **Conexión Residual (si el stride es 1):** Si la operación mantiene el mismo tamaño de la entrada y la salida, se suma la entrada original a la salida de la convolución para mejorar el flujo de gradientes y permitir un entrenamiento más eficiente.

Como función de activación, se utiliza ReLu6 ($\text{ReLU6}(x) = \min(\max(0, x), 6)$) con el objetivo de obtener una cuantificación eficiente. Además, se integra un modelo de regresión que toma como **entrada** una región de interés de la mano, representada por un tensor de dimensiones $w \times h \times c$, donde w y h corresponden al ancho y alto de la imagen, y c al número de canales, en este caso tres: Rojo, Verde y Azul (RGB por sus siglas en inglés).

Como **salida**, el modelo genera un conjunto de 21 puntos clave que representan la posición de las articulaciones y extremos de los dedos. Cada punto clave p_k se define por sus coordenadas (x_k, y_k), con k en el rango de 1 a 21.

La función de regresión utilizada para predecir estos puntos se expresa como:

$$P = W_r \cdot \text{Flatten}(F_{\text{hand}}) + b_r \quad . \tag{3}$$

donde W_r es una matriz de pesos con dimensiones $42 \times m$ (siendo $m = w \times h \times c$), b_r es un vector de sesgo de dimensión 42, y la función **Flatten** transforma el tensor de entrada en un vector unidimensional antes de la multiplicación con W_r. Como resultado, el modelo produce un vector de 42 valores que representan las coordenadas (x, y) de los 21 puntos clave de la mano.

Finalmente, como función de pérdida se utiliza el Error Cuadrático Medio (MSE por sus siglas en inglés), cuya formulación es la siguiente:

$$\mathcal{L}_{\text{hand}} = \frac{1}{21} \sum_{k=1}^{21} \|\mathbf{p}_k - \hat{\mathbf{p}}_k\|_2^2 \quad . \tag{4}$$

Donde $\hat{\mathbf{p}}_k$ se conoce como anotación manual (ground truth).

BlazePose

BlazePose es un modelo que emplea una arquitectura CNN con conexiones de salto para mejorar la representación de características. Utiliza mapas de calor para la detección precisa de los puntos clave del cuerpo humano. A continuación, se detalla este modelo.

Para cada punto clave j, se genera un mapa de calor $\mathbf{H}_j$ con distribución Gaussiana:

$$\mathbf{H}_j(u, v) = \exp\left(-\frac{(u - u_j)^2 + (v - v_j)^2}{2\sigma^2}\right) \quad . \tag{5}$$

donde (u_j, v_j) es la posición real del punto clave y σ controla la dispersión del mapa de calor. Finalmente, como función de pérdida utiliza el MSE.

3.3 k-Nearest Neighbors (k-NN)

El algoritmo k-NN es un método de aprendizaje supervisado utilizado para clasificación y regresión. Su principio se basa en la similitud entre ejemplos, almacenando los datos de entrenamiento sin construir un modelo explícito. La predicción de una nueva instancia se realiza a partir de sus k vecinos más cercanos en el espacio de características.

Dado un conjunto de entrenamiento D definido como:

$$D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^{n}, \quad x_i \in \mathbb{R}^d, \quad y_i \in \mathbb{R} \quad . \tag{6}$$

donde x_i representa un vector de características en un espacio de dimensión d y y_i es la etiqueta de clase.

Para un nuevo punto de consulta x_q, el algoritmo sigue tres pasos principales:

- Se determina la distancia $d(x_q, x_i)$ entre el punto de consulta y cada instancia del conjunto de entrenamiento. En el caso de la distancia euclidiana:

$$d(x_q, x_i) = \left(\sum_{j=1}^{d} (x_{qj} - x_{ij})^2\right)^{1/2} \quad . \tag{7}$$

- Se ordenan los puntos de D según la distancia $d(x_q, x_i)$ y se seleccionan los k puntos más próximos, denotados como $N_k(x_q) = \{x_{(1)}, x_{(2)}, \ldots, x_{(k)}\}$.
- La clase predicha para x_q se obtiene mediante una votación mayoritaria entre los k vecinos más cercanos:

$$\hat{y}_q = \arg \max_{y \in \{c_1, c_2, \ldots, c_n\}} \sum_{x_i \in N_k(x_q)} \mathbb{1}(y_i = y) \quad . \tag{8}$$

donde $\mathbb{1}(\cdot)$ es la función indicadora, que vale 1 si $y_i = y$ y 0 en caso contrario.

4. METODOLOGÍA

A continuación, se describe el proceso paso a paso de la metodología propuesta.

4.1 Captura de video

Se capturaron videos bajo condiciones controladas de iluminación para garantizar la consistencia en la calidad de las imágenes. Para lograrlo, se instaló una cámara en una cabina de manufactura apuntando hacia una mesa de trabajo en donde se puede observar al operador desde la cintura hacia arriba. Los parámetros técnicos de la cámara son los siguientes:

- **Cámara**: Logitech C922 Pro HD Stream Webcam.
- **Resolución**: 1920 × 1080 píxeles (Full HD).
- **Tasa de frames**: 60 FPS (cuadros por segundo) en 720p, 30 FPS en 1080p.
- **Formato de video**: MPEG-4 con compresión H.264.
- **Sensor**: CMOS de 1/2.9".
- **Iluminación**: Sistema de LEDs de 5000K con difusor para evitar reflejos.
- **Distancia cámara-objeto**: 1.2 metros.
- **Enfoque**: Automático con corrección manual.

En las Figuras 1 y 2 se muestran dos frames representativos de los videos obtenidos durante el proceso de captura.

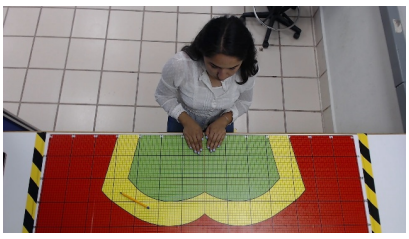


Fig. 1. Posición inicial y un objeto a 30 cm.

4.2 Caracterización de Patrones de Movimiento

Durante este proceso se utilizaron los módulos de seguimiento de manos y de estimación de poses de MediaPipe con el fin de detectar puntos clave en los videos para caracterizar los

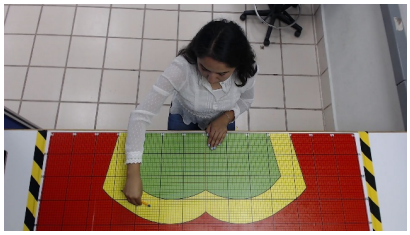


Fig. 2. Movimiento al alcanzar un objeto a 30 cm.

Tabla 2. Puntos identificados por MediaPipe.

Unión	Punto $\mathbf{p}$
Hombro izquierdo	11
Hombro derecho	12
Codo izquierdo	13
Codo derecho	14
Muñeca derecha	15
Muñeca derecha	16
Dedo pulgar izquierdo	17
Punta de meñique izquierdo	19
Punta de meñique derecho	20

patrones de movimiento; estos puntos se listan en la Tabla 2 y se visualizan como círculos rojos unidos por aristas blancas en la Figura 3.

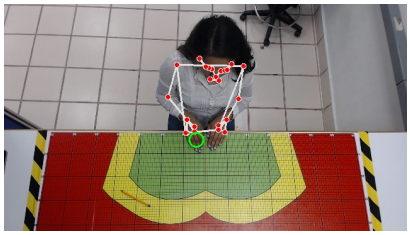


Fig. 3. Puntos clave: hombros, codos, muñecas, y puntas de meñiques.

El patrón de movimiento se caracteriza a través de siete ángulos, en donde un ángulo $\theta(\cdot)$ se calcula a partir de tres puntos clave $(\mathbf{p}_a, \mathbf{p}_b, \mathbf{p}_c)$ utilizando la ecuación (9). De esta manera se conforma el vector $\mathbf{v} = [\theta_{\text{le}}, \theta_{\text{re}}, \theta_{\text{ls}}, \theta_{\text{rs}}, \theta_{\text{lw}}, \theta_{\text{rw}}]$, donde:

- $\theta_{\text{le}}, \theta_{\text{re}}$: Ángulos de codos (hombro-codo-muñeca).
- $\theta_{\text{ls}}, \theta_{\text{rs}}$: Ángulos de hombros (cadera-hombro-codo).
- $\theta_{\text{lw}}, \theta_{\text{rw}}$: Ángulos de muñecas (codo-muñeca-meñique).

$$\theta(\mathbf{p}_a, \mathbf{p}_b, \mathbf{p}_c) = \arccos\left(\frac{(\mathbf{p}_a - \mathbf{p}_b)\cdot(\mathbf{p}_c - \mathbf{p}_b)}{\|\mathbf{p}_a - \mathbf{p}_b\|\|\mathbf{p}_c - \mathbf{p}_b\|}\right) \times \frac{180}{\pi} \quad (9)$$

Es importante resaltar que, para caracterizar el gesto de sujetar un objeto, se ubica el centro de la mano (ubicada a la izquierda del frame) y se calcula su apertura a través del radio de un círculo que pasa por los dedos pulgar y meñique, el cual se observa coloreado de verde en la Figura 3. Si el radio es menor que un umbral de 0.5, entonces se considera que la mano está cerrada; en caso contrario, se considera abierta. Esto se realiza a través de la ecuación (10).

$$\begin{cases} \text{Centro} = \dfrac{1}{2}(\mathbf{p}_{19} + \mathbf{p}_{17}) \\ \text{Radio} = \dfrac{1}{2}\|\mathbf{p}_{19} - \mathbf{p}_{17}\| \end{cases} \quad (10)$$

Una vez caracterizados los patrones de movimiento, se prosigue a etiquetar manualmente los frames en donde se realizan los movimientos. De esta manera, se conforma el conjunto de datos con los vectores de características, necesario para aplicar los algoritmos de aprendizaje máquina.

Es importante mencionar que, previo al proceso de clasificación, los vectores deben normalizarse para evitar sesgos en el algoritmo de clasificación y garantizar consistencia en los datos. Este proceso se realizó mediante el método RobustScaler disponible en la librería Scikit-learn, que reescala los valores de los vectores entre 0 y 1 restando la mediana y dividiéndola entre el rango intercuartílico como se muestra en la ecuación 11:

$$x_i' = \frac{x_i - \tilde{X}}{\text{IQR}(X)} \quad (11)$$

donde $\tilde{X}$ es la mediana de la característica, y $\text{IQR}(X)$ es el rango intercuartílico $(Q3 - Q1)$.

Este método fue seleccionado por su resistencia a valores atípicos, comunes en datos de captura de movimiento. Finalmente, la clasificación se realizó mediante el algoritmo k-NN utilizando un esquema experimental basado en validación cruzada.

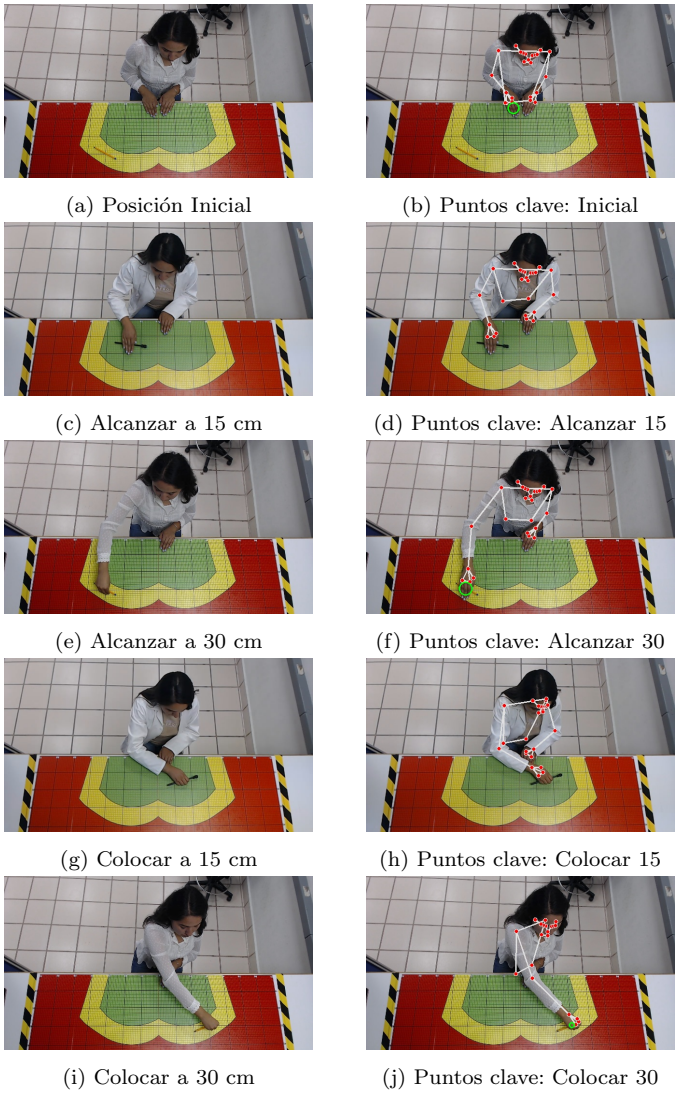
5. EXPERIMENTOS

En esta sección se presenta el diseño experimental para evaluar la efectividad del enfoque propuesto para realizar la clasificación de patrones de movimiento en cabinas de manufactura mediante visión por computadora industrial. En la Figura 4, se muestran los patrones de movimiento a clasificar, los cuales son: 1) Posición inicial, 2) Alcanzar a 15 cm, 3) Alcanzar a 30 cm, 4) Colocar a 15 cm, 5) Colocar a 30 cm.

Conjunto de datos: Se procesaron 60 videos por cada patrón de movimiento, extrayendo de cada video diferentes vectores de características asociados a cierto patrón de movimiento. El conjunto de datos resultante consta de 4,500 instancias distribuidas en 5 clases, y 6 características.

División de datos: El conjunto de datos se dividió mediante un esquema de validación cruzada de 10 pliegues. Con esta técnica se reduce el impacto de la variabilidad de los datos al elegir conjuntos de entrenamiento y prueba, minimizando el riesgo de sobreajuste del algoritmo de clasificación hacia una determinada división de datos.

Clasificación: Para realizar la clasificación, se utilizó el algoritmo k-NN con diferentes valores del hiperparámetro $k \in \{1, 3, 5, 7\}$. La selección de estos valores permitió explorar el equilibrio entre sobreajuste $(k = 1)$ y generalización $(k = 7)$. Como métricas de rendimiento se reportan la exactitud por cada *Fold*, la exactitud promedio y su respectiva matriz de confusión.



(a) Posición Inicial (b) Puntos clave: Inicial
(c) Alcanzar a 15 cm (d) Puntos clave: Alcanzar 15
(e) Alcanzar a 30 cm (f) Puntos clave: Alcanzar 30
(g) Colocar a 15 cm (h) Puntos clave: Colocar 15
(i) Colocar a 30 cm (j) Puntos clave: Colocar 30

Fig. 4. Secuencia de posiciones en diferentes etapas del proceso.

Todas las pruebas se ejecutaron en un entorno con Windows 11, 16GB de RAM y un procesador Intel Core i5 11th Gen, utilizando Python, `OpenCV` para procesamiento de video, `MediaPipe` para detección la detección de puntos clave, y `Scikit-learn` para la implementación del clasificador y el cálculo de métricas.

6. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos bajo el marco experimental planteado en la sección anterior. En la Tabla 3, se reporta la exactitud promedio obtenida, logrando en todos los casos valores cercanos al 100%. Este desempeño sugiere que, para este diseño experimental, la selección de características angulares provenientes de los puntos clave es adecuada para la identificación de patrones de movimientos.

En la Figura 5, se presentan las matrices de confusión correspondientes a la clasificación de los patrones de movimiento. En éstas se observa que los errores de clasificación son mínimos, lo que sugiere que la separación entre clases podría tener un comportamiento lineal.

Tabla 3. Resultados de validación cruzada.

Valor de k	**Exactitud (10-*Folds*)**	Promedio
$k = 1$	[1.000, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000,] [1.000, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000]	100%
$k = 3$	[1.000, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000,] [1.000, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000]	100%
$k = 5$	[1.000, 0.997, 1.000, 1.000, 1.000,] [1.000, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000]	99.97%
$k = 7$	[1.000, 0.997, 1.000, 0.997, 1.000,] [0.997, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000]	99.92%

En la Figura 6, se muestran frames representativos de los videos de prueba, en los que, cada que el operador realiza un movimiento, aparece una etiqueta coloreada en blanco con el movimiento predicho con la metodología.

Estos resultados reflejan la efectividad de la propuesta para la identificación de patrones de movimiento en entornos industriales. Sin embargo, es importante resaltar que, si se añaden más movimientos tanto simples como compuestos al conjunto de datos, es altamente probable que las clases no sean separables, por lo que un algoritmo como k-NN posiblemente sea insuficiente. De esta manera, se tendría que experimentar con otros enfoques más robustos, como Máquinas de Vector Soporte o Redes Neuronales Artificiales.

7. CONCLUSIONES

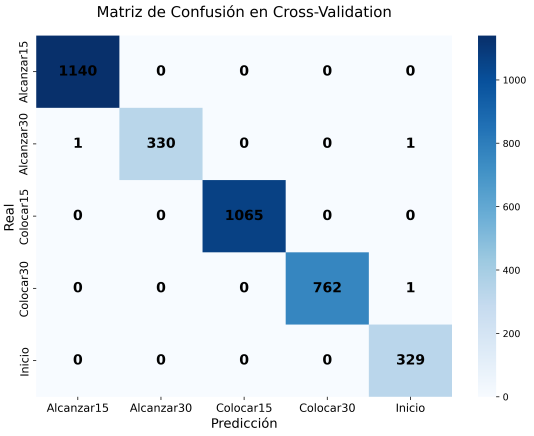
En este trabajo, se presentó un sistema basado en visión por computadora para la clasificación automática de patrones de movimiento en entornos industriales. La metodología propuesta combina la detección de puntos clave mediante CNNs implementadas a través de la librería MediaPipe, con un enfoque de clasificación basado en k-NN, logrando una exactitud promedio cercana al 100%.

La selección de características angulares de hombros, codos y muñecas es efectiva para representar patrones de movimiento en procesos de manufactura. Asimismo, la combinación de CNNs para la detección de poses con el clasificador k-NN permitió un desempeño robusto para la clasificación de movimientos. De esta manera, bajo el esquema experimental propuesto, la metodología tiene el potencial para ser aplicada en el proceso de estudio de tiempos y movimientos, ofreciendo una posible alternativa a los métodos tradicionales.

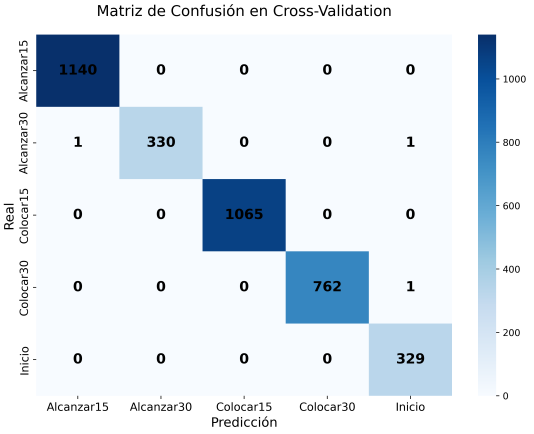
Como trabajo futuro, se propone analizar patrones de movimiento compuestos, incorporando una mayor complejidad y variedad en las acciones a analizar. Esto permitiría evaluar la robustez del sistema frente a escenarios más exigentes y contribuiría a mejorar su aplicabilidad práctica en distintos contextos industriales. Asimismo, se propone explorar la integración de modelos de aprendizaje profundo para mejorar la identificación de movimientos en secuencias temporales más largas. Finalmente, se sugiere la implementación del sistema en un entorno industrial real para evaluar su desempeño en condiciones operativas diversas.

AGRADECIMIENTOS

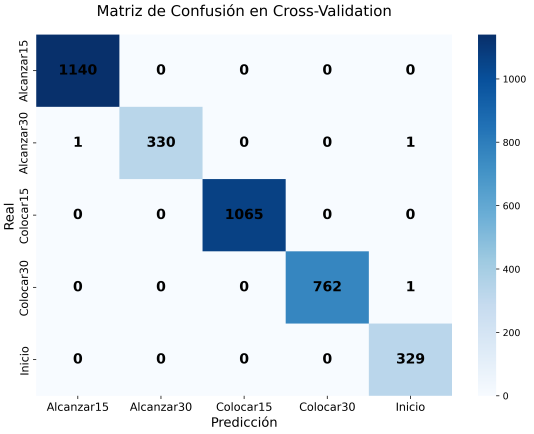
Se agradece al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por el financiamiento otorgado para la



(a) Matriz de confusión con $k = 1, 3$ (Exactitud: 100%)



(b) Matriz de confusión con $k = 5$ (Exactitud: 99.97%)



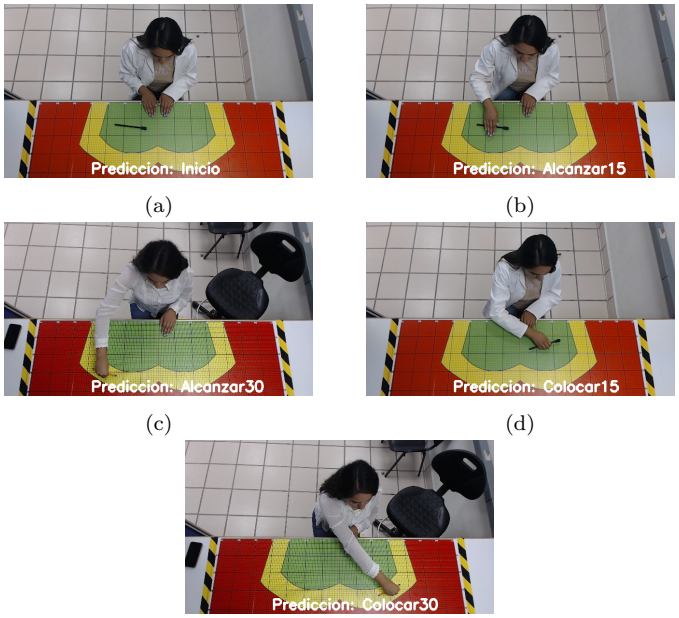
(c) Matriz de confusión con $k = 7$ (Exactitud: 99.92%)

Fig. 5. Matrices de confusión obtenidas con validación cruzada para diferentes valores de k.

realización de esta investigación y al Tecnológico Nacional de México / ITS de Purísima del Rincón.

REFERENCIAS

Baquero, F.B. and Martínez, D.E. (2024). Detección de acción humana para el control de inventario utilizando visión por computadora. *Ingeniería y Competitividad*. URL https://api.semanticscholar.org/CorpusID:269084484.



(a) (b) (c) (d) (e)

Fig. 6. Secuencia de posiciones predichas por el sistema.

C., C.A.L., Ferrin, C.D., and Castillo, L.F.R. (2018). Visión por computador aplicada al control de calidad en procesos de manufactura: seguimiento en tiempo real de refrigeradores. *Revista EIA*. URL https://api.semanticscholar.org/CorpusID:171889360.

Fajardo, D. and Camilo, C. (2015). Sistema de visión por computadora e inteligencia artificial para monitorear la calidad en procesos de higiene de manos. URL https://api.semanticscholar.org/CorpusID:73688059.

Hernández, A.Z., Rosales, G.A.G., Santiago, H.J.J., and Lee, M.M. (2022). Métricas de rendimiento para evaluar el aprendizaje automático en la clasificación de imágenes petroleras utilizando redes neuronales convolucionales. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. URL https://api.semanticscholar.org/CorpusID:260583406.

Lecun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., and Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278–2324. doi: 10.1109/5.726791.

Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., Zhang, F., Chang, C.L., Yong, M., Lee, J., et al. (2019). Mediapipe: A framework for perceiving and processing reality. In *Third workshop on computer vision for AR/VR at IEEE computer vision and pattern recognition (CVPR)*, volume 2019.

Sucari, L.R., Durán, Y.A., Yapo, E.Q., León, A.S., Quina, L.D.Q., and Torres, F.A.H. (2020). Visión artificial en reconocimiento de patrones para clasificación de frutas en agronegocios. *PURIQ*. URL https://api.semanticscholar.org/CorpusID:216377693.

Yuan, R., Jaime, I., Chiabrando, B.J., and Redolfi, J.A. (2020). Detección de paquetes en movimiento sobre una cinta transportadora usando visión por computadora. *2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON)*, 1–6. URL https://api.semanticscholar.org/CorpusID:237000363.

Proposal for a Methodology to Measure the Impact on Science and Society of Self-Admitted Technical Debt in Deep Learning Frameworks

Cuatecontzi Cuahutle Elizabeth *, Medina Barrera María Guadalupe *, Cortes Maldonado Raúl*, Bueno Avendaño Carlos*

** Tecnológico Nacional de México / Instituto Tenológico de Apizaco, Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec, Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala, Méx. C.P. 90491.*

e-mail: elizabeth.cc@apizaco.tecnm.mx, guadalupe.mb@apizaco.tecnm.mx, raul.cm@apizaco.tecnm.mx, carlos.ba@apizaco.tecnm.mx

Abstract: Technical Debt in software development refers to the consequences of prioritizing quick solutions over optimal ones. Since its conception by Ward Cunningham in 1992, research has focused on improving software quality. Machine Learning is no exception. In the field of Deep Learning systems, frameworks such as PyTorch, Keras, TensorFlow, Caffe, Theano, and others are widely used because they simplify implementation. However, as reported in the literature, their development risks include incurring technical debt, which can impact performance, reliability, security, or higher costs. A literature review identified two main approaches for analyzing technical debt: static code analysis and examining comments made by developers, the latter being referred to as Self-Admitted Technical Debt**.** This study aims to analyze Self-Admitted Technical Debt in Deep Learning frameworks to assess its impact on the development of Deep Learning systems and its implications for the solutions that science and society demand, in alignment with UNESCO's recommendations to put Artificial Intelligence at the service of people and society. To achieve this, a three-phase methodology is proposed: descriptive analysis, measurement, and impact assessment**.** The findings of this research will help identify the effects of using Deep Learning frameworks and provide recommendations for their better integration into solutions that address societal needs.

Keywords: admitted technical debt; deep learning; deep learning frameworks.

1. Introducción

Los sistemas de software enfrentan el riesgo de superar los costos previstos y desviarse de los estándares de calidad (Fowler, 2019); para describir esta problemática, en 1992 Ward Cunningham introdujo la metáfora de la Deuda Técnica (DT), con el propósito de analizar los costos a largo plazo derivados de decisiones tomadas apresuradamente en el proceso de Ingeniería de Software. Si bien originalmente se refería únicamente a la implementación, su alcance se ha extendido a aspectos como la arquitectura, el diseño, la documentación, los requisitos y las pruebas (Brown *et al.*, 2010). Desde su concepción, la DT ha ganado relevancia en la comunidad de desarrollo de software para comprender y comunicar cuestiones relacionadas con la calidad, el valor y el costo de este (Kruchten *et al.*, 2012). Un estudio realizado por Li, Avgeriou and Liang, (2015) da cuenta de una revisión sistemática para identificar tipos de DT y su gestión, esta última abordada por Li, Avgeriou and Liang (2015), quienes propusieron actividades esenciales para la gestión de la DT, como la identificación, medición, prevención, monitoreo, documentación y pago.

Por otra parte, las necesidades tecnológicas en el desarrollo de las ciencias y en áreas como la salud son cada vez más diversas. Para atenderlas, actualmente se desarrollan sistemas que integran tecnologías de Inteligencia Artificial (IA), como el Aprendizaje Profundo (Deep Learning, DL por sus siglas en inglés). El DL es una rama del Aprendizaje Automático ampliamente utilizada como un componente clave en tareas como la clasificación de imágenes, el reconocimiento de voz y los sistemas de conversación (Chollet, 2021).

Para el desarrollo de sistemas de DL, es común el uso de herramientas o marcos de trabajo de código abierto que facilitan su implementación. Sin embargo, durante su creación, la presión del tiempo, la competencia en el mercado y la reducción de costos, suelen llevar a los desarrolladores a sacrificar su calidad, lo que a menudo resulta en la acumulación de DT (Liu *et al.*, 2020). Este riesgo también fue expuesto previamente por Sculley et al., (2015) al afirmar que al igual que los sistemas de software tradicional, el desarrollo de aplicaciones DL pueden incurrir en DT y estar oculta.

En este trabajo se propone una investigación bajo una metodología de tres fases la realización de un estudio exploratorio-descriptivo de la DT en herramientas de DL, que permita su identificación y medición; con ello analizar el impacto que esta tiene en el desarrollo de aplicaciones DL para su uso en áreas de las ciencias y la sociedad.

En la sección dos de este documento se mencionan ejemplos de estudios relacionados con el desarrollo de sistemas y herramientas DL, para los cuales la literatura reporta presencia de DT, además se mencionan investigaciones relacionadas con la identificación y medición de la DT en DL. En la sección tres se presenta el contexto de esta investigación, identificando el problema y sus objetivos. En la sección cuatro se plantea la metodología para el desarrollo de esta propuesta de

investigación. Finalmente, en la sección cuatro se plantean resultados y contribuciones esperados.

2. ANTECEDENTES

El DL ha contribuido con soluciones innovadoras en áreas como el procesamiento de lenguaje natural, el reconocimiento del habla y la visión por computadora. En DL se han desarrollado métodos basados en datos que emplean múltiples capas de unidades interconectadas (neuronas) para aprender patrones y representaciones a partir de estos datos. Dong, Wang y Abbas (2021) revisaron modelos de DL y sus aplicaciones, mientras que Noor and Ige (2024) analizaron el progreso y los desafíos actuales del DL.

Además, la literatura reporta numerosas aplicaciones de sistemas basados en DL en áreas como la salud. Se revisaron algunos trabajos relacionados y en ellos se identifican diversas aplicaciones del DL en el ámbito científico y social y las problemáticas técnicas que pueden comprometer su efectividad. Por ejemplo, Shamshirband et al., (2021) presentan una revisión sobre el uso del DL, destacando aplicaciones clave como el diagnóstico por imágenes, el procesamiento de señales y el análisis de texto médico; en su trabajo se resalta su utilidad para estudiar y proponer soluciones a diversas problemáticas, incluyendo el diagnóstico y monitoreo de enfermedades. Asimismo, el estudio señala desafíos importantes, como el proceso de obtención de datos, la calidad de los resultados, la interpretabilidad de los modelos y su escalabilidad. Además, aborda cuestiones relacionadas con la integración de modelos en entornos clínicos reales, la interoperabilidad tecnológica y los problemas éticos asociados. Otro caso es presentado por Castillo Casanova and López Monroy (2021) quienes exploran el desempeño e interpretabilidad de modelos DL como SVM, CNN y RNN en la detección de depresión a partir de textos en redes sociales, utilizando herramientas como Scikitlearn, TensorFlow y Pickle; los autores destacan problemas como el desbalanceo de clases y el alto costo computacional al aumentar la cantidad de datos. Agudelo Gavira and Sarria Paja (2021) evalúan modelos CNN pre entrenados como VGG16, VGG19 y RESNET50 en la detección de cáncer de seno usando imágenes de histopatología; aunque los modelos logran altas tasas de precisión, se observa una disminución del rendimiento a medida que se incrementa la información, señalando posibles problemas de escalabilidad. En otro estudio, Ashraf et al. (2021) aplican distintos algoritmos (como BayesNet, KNN, Naive Bayes, MLP, árboles y bosques aleatorios) para predecir enfermedades cardiovasculares, empleando Tensor Flow, PyTorch y Keras; a pesar de utilizar los mismos datos, se encuentran diferencias significativas en los resultados de clasificación (hasta un 10%), lo cual evidencia problemas de consistencia y confiabilidad entre marcos de trabajo. Aracena et al., (2022) hacen una revisión general de aplicaciones del aprendizaje automático en salud, usando arquitecturas como codificadores automáticos, redes generativas y aprendizaje multitarea con TensorFlow.

En otras áreas como la agricultura Lee', Lin and Katsikas (2024) abordan el uso de modelos como YOLOv3 y CNNs para la clasificación y detección de malezas en sistemas agrícolas, empleando marcos como Keras y PyTorch; reportan variabilidad tanto en el desempeño como en la velocidad de entrenamiento, además de la dependencia de recursos disponibles; Las problemáticas detectadas incluyen dificultades de interpretabilidad, desequilibrio de datos, sesgos, generalización, eficiencia computacional, escalabilidad y calidad de los datos.

Finalmente, Lee', Lin and Katsikas (2024) examinan el desempeño de distintas variantes de RNN en tareas de detección de anomalías en series temporales en tiempo real, utilizando DeepLearning4j, TensorFlow, Keras y PyTorch. Observan limitaciones como arquitecturas poco flexibles, complejidad en el uso, problemas de gestión de recursos y variabilidad del rendimiento, lo que resalta la DT presente en estas herramientas.

Ahora bien, como se ha observado en los estudios revisados para apoyar el desarrollo de sistemas de DL, se utilizan herramientas o marcos de trabajo (frameworks) que integran bibliotecas de funciones y algoritmos de DL de código abierto, que se aplican a una amplia variedad de contextos científicos y tecnológicos. Elshawi et al., (2021) al igual que Rane et al., (2024) realizan una revisión y evaluación de herramientas populares para Machine Learning y DL. Por su parte, Yang, Liang and Ma (2024) evalúan el rendimiento de modelos de aprendizaje automático en herramientas de DL como PyTorch, Keras, TensorFlow, Caffe y Theano. En este trabajo Yang et. al, destacan que durante el desarrollo de los sistemas y herramientas de DL surgen supuestos sobre el uso y desempeño de estas herramientas, lo que podría derivar en vulnerabilidades, fallos, inconsistencias o un incremento en los costos en las aplicaciones de DL, se afirma además que las aplicaciones DL pueden diseñarse adquiriendo algún tipo de DT, lo que puede provocar graves fallos en los sistemas y más aún cuando se trata de sistemas relacionados con personas que pueden afectar su salud o integridad.

Por su parte Chen et al., (2021) afirman que las herramientas de DL promueven el desarrollo de la IA y demuestran un potencial considerable en numerosas aplicaciones, sin embargo, se encuentran problemas de seguridad como principal riesgo. También en Lai et al., (2024) realizan un estudio sistemático de vulnerabilidades en sistemas de DL mediante un análisis en herramientas de DL de código abierto, como TensorFlow, Caffe, OpenCV, Keras y PyTorch.

En 2015, Sculley et al. en su artículo "Hidden Technical Debt in Machine Learning Systems", advirtieron sobre el error de asumir que los avances rápidos en el desarrollo de sistemas de aprendizaje automático no conllevan costos. A través de su análisis, identificaron múltiples factores de riesgo en el diseño de estos sistemas, tales como abstracciones poco claras, bucles de retroalimentación ocultos, funciones implícitas, dependencia excesiva de los datos, así como problemas relacionados con la configuración y la gestión de cambios. Estos elementos contribuyen a lo que los autores denominan "deuda técnica oculta", una forma de complejidad que, al no ser evidente, resulta difícil de detectar y mitigar, pero que puede traducirse en elevados costos de mantenimiento y evolución del sistema a largo plazo.

Además de la deuda técnica oculta identificada en los sistemas de aprendizaje automático por Sculley et al. (2015),

investigaciones posteriores han profundizado en la caracterización específica de la deuda técnica (DT) en herramientas de Deep Learning (DL). Uno de los primeros estudios en la identificación, caracterización y medición de la DT en herramientas de DL fue realizado por Liu et al., (2020), quienes identifican, caracterizan y cuantifican distintos tipos de DT presentes en estos entornos. En su trabajo, los autores señalan que los desarrolladores de aplicaciones de DL suelen emplear herramientas especializadas, y que, debido a presiones asociadas al tiempo, los costos y la competencia en el mercado, es común que se comprometa la calidad del software. Esta situación propicia la generación de DT, pues, aunque los desarrolladores de las herramientas son conscientes de dicha DT, los desarrolladores de aplicaciones frecuentemente no lo son.

Entre los hallazgos de Liu et al., (2020) destacan tres aspectos clave que: 1) la existencia de una cantidad significativa de deuda técnica en todos los marcos de DL analizados; (2) la identificación de diversas categorías de DT, incluyendo deuda de diseño, de defectos, de documentación, de pruebas, de requisitos, de compatibilidad y de algoritmos; y (3) la concentración predominante de la DT en el diseño (24,07 % – 65,27 %), seguida por los requisitos (7,09 % – 31,48 %) y de algoritmos (5,62 % – 20,67 %), aunque en ciertos proyectos la compatibilidad también representa más del 10 %.

En un estudio complementario, Liu et al., (2021) examinan la frecuencia, generación y eliminación de la DT en herramientas de DL. Identifican que la deuda de diseño es la más comúnmente introducida, seguida de la deuda de requisitos y de algoritmo. Asimismo, observan que la DT de requisitos es la más eliminada, usualmente por los mismos desarrolladores que la generaron, seguidos por quienes introdujeron la DT de diseño.

Para abordar el estudio de la deuda técnica en este contexto, se han empleado técnicas de análisis de código estático. Por ejemplo, Tang et al., (2021) llevaron a cabo un estudio empírico sobre la refactorización y DT en sistemas de aprendizaje automático, mientras que (Sutoyo, Avgeriou and Capiluppi, 2024) destacan que el análisis de código puede ser eficaz para identificar violación de reglas de codificación, dependencias inadecuadas, *code smells* y otros indicadores asociados a la DT. En este contexto, y con el objetivo de apoyar el análisis de la deuda técnica en código fuente, han surgido diversas herramientas especializadas para su identificación y medición. Li, Avgeriou and Liang, (2015) realizaron una comparación entre herramientas de análisis estático de código de uso libre, como SonarGraph, SonarQube, Squore y Code Inspector, y otras comerciales, como CAST, NDepend, CodeMRI o DV8. En particular, SonarQube ofrece una interfaz intuitiva y diversas funcionalidades que permiten identificar problemas de codificación, vulnerabilidades de seguridad, *code smells* y otros elementos que afectan negativamente la calidad y mantenibilidad del software. Además, proporciona métricas detalladas y análisis continuos que facilitan la comprensión del estado del código y orientan acciones para su mejora.

Sin embargo, otro tipo de DT ocurre cuando los desarrolladores de manera cociente incurren en ella al posponer decisiones técnicas o comprometer ciertos aspectos de diseño. Esta forma de DT, conocida como *deuda técnica auto admitida*, ha sido estudiada por Potdar and Shihab, (2014), quienes analizaron comentarios insertados en el código fuente de proyectos almacenados en repositorios de GitHub. En dichos comentarios, los desarrolladores suelen dejar constancia de errores, tareas pendientes o deficiencias detectadas durante diferentes etapas del desarrollo, reconociendo así explícitamente la existencia de deuda técnica.

Este enfoque ha sido ampliamente adoptado en investigaciones posteriores, como las de Maldonado and Shihab, (2015), OBrien et al. (2022) y Pepe et al. (2024), quienes también utilizaron el concepto de deuda técnica auto admitida (DTAA) para analizar su impacto, evolución y mecanismos de gestión. Más recientemente, Bhatia et al. (2024) señalan que, a pesar de los avances en la comprensión de este tipo de DT en herramientas de DL, aún persisten vacíos importantes sobre cómo se difunde y evoluciona dentro de los sistemas basados en aprendizaje automático que utilizan dichos marcos.

En consecuencia, el acelerado desarrollo de sistemas basados en DL, el uso cada vez más extendido de herramientas especializadas y los riesgos asociados a la presencia de DT subrayan la necesidad de realizar estudios actualizados que permitan comprender mejor estos fenómenos y desarrollar estrategias eficaces para su detección, gestión y mitigación.

3. Contexto de la investigación

3.1 Planteamiento del problema

Como se ha evidenciado en la revisión de la literatura, existen herramientas de DL de código abierto ampliamente utilizadas en el desarrollo de aplicaciones basadas en esta tecnología. Estas herramientas ofrecen ventajas como disponibilidad y facilidad de uso, lo cual ha facilitado la adopción del DL en diversos ámbitos científicos y tecnológicos. Sin embargo, su uso también puede conllevar problemas relacionados con la confiabilidad, el desempeño, la compatibilidad o el mantenimiento del software. Estas limitaciones están vinculadas frecuentemente con la presencia de diferentes tipos de DT, como la de diseño, de requisitos o de algoritmo.

La presencia de DT en herramientas de DL representa riesgos importantes en términos de eficiencia, seguridad, confiabilidad y costos de mantenimiento, tanto en el desarrollo de las herramientas como en las aplicaciones construidas a partir de ellas. Las investigaciones previas mencionadas han señalado esta problemática. Además, como mencionan Bhatia et al. (2024), el ritmo acelerado de evolución de estas herramientas puede originar dificultades relacionadas con la escalabilidad, la compatibilidad y la migración tecnológica, aumentando así la complejidad de su gestión a largo plazo.

Aunque se han realizado esfuerzos por identificar y medir la DT, persiste la necesidad de profundizar en su impacto real dentro del desarrollo de aplicaciones basadas en DL. Por esta razón, el presente trabajo propone una metodología orientada a

medir el impacto en las ciencias y en la sociedad de la deuda técnica auto admitida en herramientas de DL.

3.2 Justificación de la investigación.

Según Sculley et al. (2015), el concepto de DT en sistemas de aprendizaje automático se refiere al compromiso entre la velocidad de desarrollo y los costos de mantenimiento a largo plazo que surgen como consecuencia de decisiones de diseño subóptimas, atajos técnicos o compromisos asumidos durante el desarrollo.

El DL, como subcampo de la Inteligencia Artificial, es ampliamente utilizado por investigadores de diversas disciplinas para abordar problemas complejos con impacto directo en la sociedad. No obstante, como se ha discutido, la presencia de DT en los marcos de DL puede conducir a comportamientos inesperados o resultados no deseados en las aplicaciones, especialmente en contextos críticos como la salud.

Desde una perspectiva ética, resulta relevante considerar las recomendaciones internacionales, como las promovidas por la UNESCO (2022), orientadas a que los sistemas de IA se desarrollen y utilicen al servicio de las personas, las sociedades y los ecosistemas. Estas recomendaciones abordan cuestiones fundamentales relacionadas con la toma de decisiones automatizadas, la equidad, la privacidad, la seguridad y los derechos humanos. En particular, el principio de Proporcionalidad e Inocuidad, en su numeral 26, establece que el uso de sistemas de IA debe estar justificado, ser adecuado al contexto y no vulnerar los valores fundamentales ni los derechos humanos.

Esta dimensión ética adquiere especial importancia en dominios como la salud, donde una falla en un sistema de DL puede tener consecuencias directas sobre los derechos de las personas. Por ejemplo, la Comisión Nacional de Arbitraje Médico (2023) reconoce el derecho del paciente a recibir información clara, suficiente y veraz sobre su diagnóstico y tratamiento. Por lo tanto, los sistemas de DL que se utilicen en este ámbito deben desarrollarse bajo los más altos estándares de calidad y transparencia, minimizando riesgos asociados a la DT.

Como se ha señalado en las secciones anteriores, las aplicaciones de DL tienen el potencial de contribuir significativamente a las ciencias y a la sociedad. En este contexto, el presente estudio busca contribuir al entendimiento de los tipos de DT más prevalentes en herramientas de DL utilizadas en el desarrollo de aplicaciones, con el fin de ofrecer recomendaciones a investigadores y desarrolladores para mitigar sus efectos y mejorar la sostenibilidad y confiabilidad del software.

4. Metodología de investigación propuesta

La investigación tiene por objetivo realizar un estudio y propuesta para la identificación y medición de DTAA en herramientas de aprendizaje profundo considerando tanto su dimensión técnica que incide en la calidad del software, como su posible impacto en las ciencias y en la sociedad.

Se adopta un enfoque cuantitativo de carácter exploratorio-descriptivo, por lo que se propone una metodología de tres fases: exploratorio-descriptiva, propuesta de medición y análisis de impacto. En la figura 2 se presenta esta propuesta.

Fase I. Exploración y descripción de la DTAA en herramientas de DL. Esta fase se enfoca en realizar una revisión de herramientas de DL de código abierto ampliamente utilizadas, tales como PyTorch, Tensor Flow y Keras, y se recopilarán sus versiones estables desde sus repositorios públicos GitHub.

Para la realización del estudio, se contempla utilizar herramientas de análisis de código estático como SonarQube, para obtener los principales indicadores de calidad. También se aplicarán técnicas de Procesamiento de Lenguaje Natural y/o Redes Neuronales para detectar presencia DTAA. De esta manera, se integrará un conjunto de características que correspondan a DTAA. Las actividades asociadas permitirán clarificar el concepto de DTAA en herramientas de DL e identificar sus posibles parámetros de medición.

Fase II. Propuesta metodológica de medición de la DTAA. A partir de los hallazgos de la primera fase y con apoyado de los estudios previos, en esta segunda fase se propondrá un modelo para una medición cuantitativa, e incluirá dimensiones técnicas como tipo de deuda, severidad y frecuencia, lo que servirá como insumo para valorar su potencial riesgo y complejidad en el desarrollo y uso de herramientas DL. Lo anterior permitiría identificar parámetros indicadores e instrumentos de evaluación, considerando métricas de calidad que considera la Ingeniería de Software.

Fase III. Análisis del impacto científico y social. En esta última fase se analizará el posible impacto sobre las aplicaciones científicas y sociales que utilizan herramientas de DL. Para ello, se realizará una revisión de casos de uso en áreas sensibles como la salud, analizando sus resultados conforme a los principios éticos como los que promueve la UNESCO. Asimismo, se discutirán las implicaciones para los derechos de los usuarios y se propondrán desde el punto de vista de la Ingeniería de software las recomendaciones para mitigar dichos riesgos.

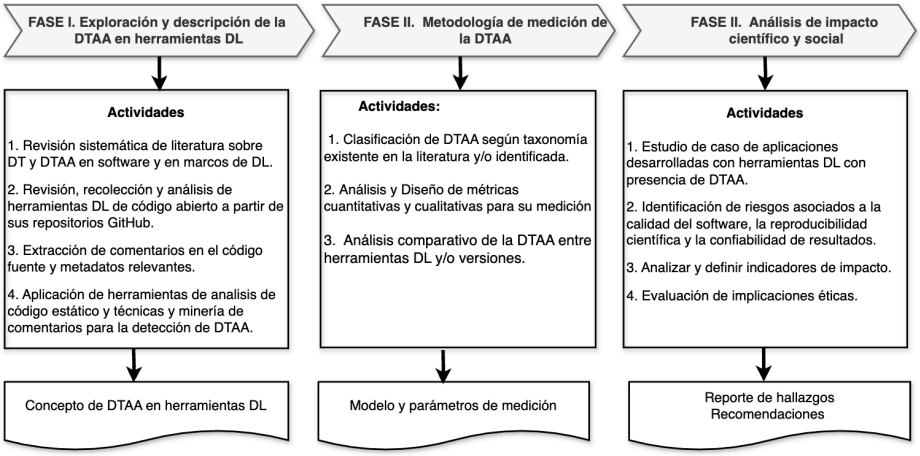


Figura 1. Metodología de investigación propuesta

5. Conclusiones

Los estudios previos sobre DT en herramientas de DL se han enfocado, en su mayoría, en su identificación y caracterización a través del análisis de código estático, con el objetivo de detectar atributos de calidad del software. Además, se ha recurrido al análisis de comentarios en el código fuente, *commits* y *pull requests* realizados por los propios desarrolladores, lo que ha permitido establecer categorías, así como detectar su presencia y posible eliminación.

Más recientemente, Bhatia et al. (2024) han abordado la presencia específica de la DTAA dentro de las herramientas para DL, subrayando la necesidad de comprender su propagación y evolución en sistemas basados en aprendizaje automático.

Por su parte, Li, Avgeriou and Liang (2015) sostienen que la gestión de la Deuda Técnica es clave para mantener la salud y sostenibilidad de los proyectos de software a largo plazo. Entre las actividades propuestas por estos autores, destacan la identificación y medición de la deuda, acciones son fundamentales como punto de partida para su mitigación y reducción de impacto. En el contexto de herramientas de DL, este impacto no se limita a los costos de desarrollo, sino que influye directamente en la calidad y confiabilidad de los sistemas de DL aplicados en áreas científicas y sociales.

Este último aspecto adquiere particular relevancia si se considera que las recomendaciones de la UNESCO (2022), que promueven el desarrollo y uso de sistemas de inteligencia artificial al servicio de las personas, las sociedades y los ecosistemas.

Como trabajo futuro, se plantea la realización de un estudio descriptivo de la DT en herramientas de DL, empleando una metodología basada en principios de ingeniería de software, y utilizando algoritmos y herramientas de procesamiento de lenguaje natural (PLN), así como redes neuronales, con el objetivo de evaluar el impacto de la DT en aplicaciones de DL aplicadas a la ciencia y la sociedad.

6. Contribuciones originales e impactos esperados

Esta investigación busca ampliar los estudios previos sobre DTAA en herramientas de DL. Al proponer una metodología de tres fases permitirá no solo identificar esta deuda, sino también medir su impacto técnico y evaluar sus implicaciones científicas y sociales. A diferencia de trabajos anteriores centrados únicamente en su detección y medición en sus diferentes categorías.

Se espera que este estudio proporcione evidencia empírica sobre la existencia, tipos y magnitud de la DTAA en herramientas de DL para el desarrollo de sistemas habilitados por la IA. Esto permitirá brindar recomendaciones que apoyen a una mejor integración de estas con las soluciones requeridas, reflejado en algunas de las contribuciones y productos como: análisis descriptivo de la DTTA en herramientas DL, análisis del impacto de la DTAA en aplicaciones DL en las ciencias y en la sociedad, así como una metodología para la identificación y medición de la DT en herramientas de DL, recomendaciones ético-técnicas dirigidas a desarrolladores e investigadores sobre cómo reducir, prevenir o gestionar la DTAA en herramientas DL y mejorar su calidad.

Agradecimientos

Expreso mi profundo agradecimiento a Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Apizaco por brindarme la formación académica y los recursos necesarios para el desarrollo de esta investigación, también por las facilidades para poder dedicar tiempo a este proyecto, así como a mis colegas por su colaboración y valiosas contribuciones. Finalmente expreso mi agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación en México por su respaldo y compromiso con la innovación, lo que ha hecho posible la realización de este trabajo.

Referencias

Agudelo Gavira, H. and Sarria Paja, M.O. (2021) ‘Detección de cáncer de seno usando imágenes de histopatología y modelos de aprendizaje profundo pre-entrenados’, *Computer and Electronic Sciences: Theory and*

Applications, 2(2), pp. 27–36. Available at: https://doi.org/10.17981/cesta.02.02.2021.04.

Aracena, C. *et al.* (2022) 'Applications of machine learning in healthcare', *Revista Medica Clinica Las Condes*, 33(6), pp. 568–575. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2022.10.001.

Ashraf, M. *et al.* (2021) 'Prediction of Cardiovascular Disease Through Cutting-Edge Deep Learning Technologies: An Empirical Study Based on TENSORFLOW, PYTORCH and KERAS', in *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, pp. 239–255. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-15-5113-0_18.

Bhatia, A. *et al.* (2024) 'An Empirical Study of Self-Admitted Technical Debt in Machine Learning Software'.

Brown, N. *et al.* (2010) 'Managing technical debt in software-reliant systems', in *Proceedings of the FSE/SDP Workshop on the Future of Software Engineering Research, FoSER 2010*, pp. 47–51. Available at: https://doi.org/10.1145/1882362.1882373.

Castillo Casanova, R. and Lopez Monroy, A. (2021) *Detección de depresión en redes sociales con modelos de aprendizaje profundo: Una revisión de su desempeño e interpretabilidad*.

Chen, H. *et al.* (2021) 'Security issues and defensive approaches in deep learning frameworks', *Tsinghua Science and Technology*, 26(6), pp. 894–905. Available at: https://doi.org/10.26599/TST.2020.9010050.

Chollet, F. (2021) 'What is Deep Learning?', in *Deep Learning with Python*. 2nd edn. USA: Manning Publications , pp. 1–27.

Comisión Nacional de Arbitraje Médico (2023) 'Decálogos de derechos y obligaciones de pacientes y profesionales de la salud', *Revista CONAMED*, 28(S1), p. 21. Available at: https://doi.org/10.35366/113807.

Dong, S., Wang, P. and Abbas, K. (2021) 'A survey on deep learning and its applications', *Computer Science Review*, 40, p. 100379. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100379.

Elshawi, R. *et al.* (2021) 'DLBench: a comprehensive experimental evaluation of deep learning frameworks', *Cluster Computing*, 24(3), pp. 2017–2038. Available at: https://doi.org/10.1007/s10586-021-03240-4.

Fowler, M. (2019) *Technical Debt*. Available at: https://martinfowler.com/bliki/TechnicalDebt.html (Accessed: 2 December 2024).

Kruchten, P. *et al.* (2012) 'Technical debt in software development', *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 37(5), pp. 36–38. Available at: https://doi.org/10.1145/2347696.2347698.

Lai, Z. *et al.* (2024) 'On Security Weaknesses and Vulnerabilities in Deep Learning Systems'.

Lee', M.-C., Lin, J.-C. and Katsikas, S. (2024) *Impact of Recurrent Neural Networks and Deep Learning Frameworks on Real-time Lightweight Time Series Anomaly Detection*.

Li, Z., Avgeriou, P. and Liang, P. (2015) 'A systematic mapping study on technical debt and its management', *Journal of Systems and Software*, 101, pp. 193–220. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jss.2014.12.027.

Liu, J. *et al.* (2020) 'Is using deep learning frameworks free?', in *Proceedings of the ACM/IEEE 42nd International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Society*. New York, NY, USA: ACM, pp. 1–10. Available at: https://doi.org/10.1145/3377815.3381377.

Liu, J. *et al.* (2021) 'An exploratory study on the introduction and removal of different types of technical debt in deep learning frameworks', *Empirical Software Engineering*, 26(2), p. 16. Available at: https://doi.org/10.1007/s10664-020-09917-5.

Maldonado, E. da S. and Shihab, E. (2015) 'Detecting and quantifying different types of self-admitted technical Debt', in *2015 IEEE 7th International Workshop on Managing Technical Debt (MTD)*. IEEE, pp. 9–15. Available at: https://doi.org/10.1109/MTD.2015.7332619.

Noor, M.H.M. and Ige, A.O. (2024) 'A Survey on State-of-the-art Deep Learning Applications and Challenges'.

OBrien, D. *et al.* (2022) '23 shades of self-admitted technical debt: an empirical study on machine learning software', in *Proceedings of the 30th ACM Joint European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering*. New York, NY, USA: ACM, pp. 734–746. Available at: https://doi.org/10.1145/3540250.3549088.

Pepe, F. *et al.* (2024) 'A Taxonomy of Self-Admitted Technical Debt in Deep Learning Systems'.

Potdar, A. and Shihab, E. (2014) 'An Exploratory Study on Self-Admitted Technical Debt', in *2014 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution*. IEEE, pp. 91–100. Available at: https://doi.org/10.1109/ICSME.2014.31.

Rane, N.L. *et al.* (2024) 'Tools and frameworks for machine learning and deep learning: A review', in *Applied Machine Learning and Deep Learning: Architectures and Techniques*. Deep Science Publishing. Available at: https://doi.org/10.70593/978-81-981271-4-3_4.

Sculley, D. *et al.* (2015) *Hidden Technical Debt in Machine Learning Systems*.

Shamshirband, S. *et al.* (2021) 'A review on deep learning approaches in healthcare systems: Taxonomies, challenges, and open issues', *Journal of Biomedical Informatics*, 113, p. 103627. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jbi.2020.103627.

Sutoyo, E., Avgeriou, P. and Capiluppi, A. (2024) 'Deep Learning and Data Augmentation for Detecting Self-Admitted Technical Debt'.

Tang, Y. *et al.* (2021) 'An Empirical Study of Refactorings and Technical Debt in Machine Learning Systems', in *2021 IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering (ICSE)*. IEEE, pp. 238–250. Available at: https://doi.org/10.1109/ICSE43902.2021.00033.

UNESCO (2022) 'Recomendación sobre la ética de la inteligencia Artificial', *Unescodoc/ Biblioteca Digital*, pp. 17–23.

Yang, C., Liang, P. and Ma, Z. (2024) 'An Exploratory Study on Automatic Identification of Assumptions in the Development of Deep Learning Frameworks'. Available at: http://arxiv.org/abs/2401.03653.

A Proposal for the Characterization and Dimensionality of Self-Admitted Technical Debt of Requirements.

Sánchez Hernández, María Janai [1] *, Medina Barrera, María Guadalupe [2] *,

Ramírez Cruz, José Federico [3]*, Pedroza Méndez, Blanca Estela[4]*

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Apizaco.*
Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahusahuatepec,
Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala México, 90491.
(e-mail: [1]d96370620,[2]guadalupe.mb, [3]federico.rc, [4]blanca.pm@ apizaco.tecnm.mx)

Abstract: The concept of technical debt was originally focused only on the code developers wrote, however, the idea evolved and expanded to other areas of the software development life cycle, including requirements engineering. Requirement technical debt (RTD) is one of the least explored types of debt and arises when the requirements are not understood, are ambiguous, incomplete, obsolete, or are not aligned with the final product implemented. This research proposes to characterize and define the dimensionality of RTD, to predict its possible occurrence in new projects. The project is designed to be carried out in five phases: (1) a systematic review of the literature of the last five years to identify in the literature the causes or characteristics and metrics of RTD; (2) extraction of the causes and definition of characteristics with the contribution of experts in the area to strengthen the definition; (3) analysis of open source projects in GitHub repositories to collect real-world data on RTD manifestations through comments, commit, and pull request; (4) application of artificial intelligence to detect patterns and group possible types of RTDs, and finally (5) the development of a predictive model based on extracted rules to predict the presence of RTDs in new projects. This proposal contributes to software engineering by providing a formal definition of RTD. With this information, professionals can identify RTD, minimizing the impact in later stages of development, such as design and architecture, in addition to improving the quality of the software and its long-term sustainability.
Keywords: Technical debt of requirements, characteristics, causes, and dimensions.

1. INTRODUCCIÓN

Cunningham (1993) introdujo el concepto de Deuda Técnica –(*Technical Debt*-TD) como una metáfora de deuda financiera para explicar la refactorización de WyCash, un producto financiero que estaba desarrollando para la empresa Digitalk Smalltalk. Según el autor la metáfora representa el esfuerzo adicional que un equipo de desarrollo debe invertir para agregar nuevas funcionalidades o corregir las ya existentes en un producto de software, lo que equivale al interés que un equipo debe pagar al adquirir esa deuda.

Entonces, entregar productos de software con calidad y sin defectos requiere de más tiempo de desarrollo, que el que requiere de entregar software propenso a defectos o fallos. Sin embargo, debido a diversas razones, como cumplir con una fecha límite o presentar un prototipo funcional, los desarrolladores a menudo priorizan sólo ciertas tareas, lo que los lleva a incurrir en TD.

Diversos estudios identificaron la presencia de TD en diferentes escenarios, incluso, algunos desarrolladores la reconocen, de manera intencional o no. Alhefdhi, Dam y Ghose (2024) señalan que, cuando los desarrolladores identifican la deuda técnica, suelen documentarla mediante comentarios; esta práctica recibe el nombre de Deuda Técnica Auto-Admitida o por sus siglas en inglés -*Self-Admited Technical Debt*-(SATD).

Por su parte McConnell (2008) y Fowler (2009) ampliaron el concepto inicial al considerar que la TD puede ser involuntaria, sobre todo cuando surge debido a la falta de conocimientos o inexperiencia de los profesionales, o bien por problemas en la planificación, y también puede ser intencional, cuando se toman decisiones para obtener decisiones con el fin de obtener beneficios a corto plazo. Un ejemplo de esto puede ser: lanzar un producto de software sabiendo que no genera valor al cliente, pero se cumplen con las fechas de entrega.

Ríos et al. (2018) describen que, si bien la TD sólo se consideraba en los problemas de código y sus artefactos relacionados, en la actualidad el conceptos se extiende a otras etapas del ciclo de vida de un producto de software. En este mismo sentido, Brown et al. (2010) incluyeron en la métafora de la TD otras áreas del ciclo de vida del software, tales como, los requerimientos, las pruebas, diseño, además de la de código, que los autores ya habían definido previamente.

Sin embargo, uno de los tipos de deuda menos explorados es la Deuda Técnica de Requisitos –(*Requirement Technical Debt*- RTD). Según Ernst (2012),"la comunidad ha prestado poca atención a los requisitos a lo largo del tiempo en el software: los requisitos a menudo están muy desincronizados con la implementación o no se utilizan en absoluto. Sin embargo, los requisitos son la validación definitiva del éxito del proyecto, ya que representan los deseos de las partes interesadas para el sistema". Así mismo, Abad y Ruhe (2015),

Lenarduzzi y Fucci (2019) coinciden en que la RTD es un área de estudio poco explorada, y la comunidad debería prestar de mayor atención a esta área, debido a su importancia para las etapas futuras como lo son el diseño y la arquitectura.
Considerando lo anterior, este trabajo presenta una propuesta que contribuye al estudio de la RTD, mediante el desarrollo de un modelo para la caracterización y dimensionalidad de la RTD.

1.1 Planteamiento del problema

Boehm, (1976) escribió: "La ingeniería de requisitos de software es la disciplina para desarrollar una especificación completa, consistente e inequívoca, que puede servir como base para el acuerdo común entre todas las partes interesadas, describiendo lo que hará el producto de software (pero no cómo lo hará; esto se hará en la especificación de diseño)". Por lo tanto, una de las labores más importantes al iniciar un desarrollo de software es describir y documentar bien los requisitos.

Sin embargo, Melo et al. (2022) señalan que "el proceso de requisitos es algo que ha perdido importancia, y muchos de los equipos que trabajan bajo presión deciden asumir las consecuencias de lanzar productos con alta tasa de deuda", lo que implica que los productos no incluyan todas las funcionalidades necesarias o que estas no funcionen de manera efectiva.

De la misma forma Frattini et al. (2023) coinciden en que la RTD tiene consecuencias significativas en etapas posteriores del desarrollo de software, y que la comunidad investigadora no ha explorado suficientemente, lo que ha dejado lagunas en el conocimiento. Como señalan los autores "al igual que la deuda de código, la RTD posee su propia complejidad y los investigadores deben analizarla en contextos prácticos y reales."

En este contexto, Ernst (2012) define la Deuda Técnica de Requisitos (*Requirement Technical Debt* - RTD) como la distancia entre la solución óptima a un problema de requerimientos y la solución actual, donde el interés se refleja en el incremento de esa distancia.

Es importante destacar que diversos autores han comenzado a abordar la RTD y sus causas, Melo et al. (2022) identificaron algunos factores que contribuyen a su aparición, tales como la redacción ambígüa, la falta de comunicación entre el cliente y equipo de desarrollo, la ausencia de documentación formal de los requisitos funcionales y no funcionales, la inexperiencia del profesional encargado para documentar esta etapa, son sólo algunos ejemplos. Estos factores ayudan a identificar características específicas en los proyectos que pueden originar RTD. En cuanto a medición Perera et al. (2023, 2024) han propuesto un modelo de cuantificación y medición de RTD basado en la literatura, aunque los investigadores aún no lo han validado en proyectos reales.

La literatura ha identificado algunos problemas, tales como:

- No existe una caracterización formal de la RTD basada en proyectos reales.
- Los investigadores no han probado en proyectos reales los modelos de medición y cuantificación que propusieron.
- Nadie ha desarrollado herramientas automatizadas que para detectar la RTD.

Por estas razones, creemos que es fundamental desarrollar una propuesta para caracterizar y dimensionar la RTD, y a partir de ella diseñar un modelo de predicción que pueda aplicarse a proyectos reales.

1.2 Trabajos relacionados

Diversos autores han hecho aportaciones significativas al tema de estudio de la RTD.

Abad y Ruhe (2015) propusieron el enfoque de opciones reales para cuantificar y gestionar las decisiones relacionadas con la RTD. En escencia, una opción real permite que los responsables de la toma de decisiones retrasen los compromisos hasta que haya más información disponible, lo que facilita que los responsables tomen decisiones de inversión al considerar el valor esperado antes de actuar. Ademas, los autores propusieron un método para cuantificar la deuda utilizando un modelo binomial combinado con programación dinámica. Este modelo permite visualizar los posibles resultados y su valor asociado, lo que ayuda a gestionar la incertidumbre de manera más efectiva.

Por su parte Lenarduzzi y Fucci (2019) presentan una tipología de deuda de requisitos, clasificada en tres tipos.
Tipo 0: Los desarrolladores incurren en esta deuda cuando no consideran adecuadamente las necesidades de los usuarios, a pesar de que estas han sido expresadas a través de los canales de comunicación establecidos.
Tipo 1: Surge cuando los ingenieros de requisitos, analistas de negocios o desarrolladores formalizan las necesidades de los usuarios utilizando "olores de requisitos" –(*Requirement Smells*- SR), es decir, formulaciones lingüísticas que violan estándares como ISO 29148. Esto puede generar requisitos ambiguos que, si los desarrolladores no corrigen, impactarán negativamente la implementación.
Tipo 2: Este tipo de deuda se presenta cuando los desarrolladores implementan una solución basada en un conjunto de requisitos iniciales, pero, al cambiar estos requisitos, no actualizan la implementación para reflejar nuevos cambios.
Otra contribución relevante proviene de Frattini et al. (2023), quienes documentaron las causas de la RTD a partir de entrevistas a profesionales del área. Los autores mostraron que los desarrolladores perciben la RTD de forma similar a la deuda de código. Además, identificaron tres categorías principales en las que puede incidir RTD:

- **Tiempo:** Las restricciones impuestas por los plazos de entrega del producto de software pueden generar RTD, ya que limitan la profundidad del análisis y la calidad de la especificación de los requisitos.
- **Personas:** La RTD puede originarse cuando los miembros del equipo carecen de los conocimientos técnicos necesarios para implementar ciertos

requisitos, o cuando existe una comunicación deficiente tanto dentro del equipo como con el cliente.

- **Artefactos:** La falta de documentación formal de los requisitos y la redacción ambigua pueden provocar malentendidos y generar reelaboraciones costosas, contribuyendo así a la acumulación de RTD.

Uno de los síntomas que los estudios reportaron con mayor frecuencia fue la insatisfacción de los clientes ante la incompletitud de un requisito.
En el mismo sentido, Perera et al. (2023) destacan que, a diferencia de la deuda de código, la RTD posee una característica distintiva: la participación del usuario en el bucle de retroalimentación. Los autores consideran este elemento como crítico un factor crítico para el éxito del proyecto.

Abad y Ruhe (2015) también enfatizan la importancia de RTD, y señalan que este tipo de deuda puede estar influenciada por diversos factores como la incertidumbre de los requisitos del cliente o del mercado, el contexto del proyecto, la viabilidad, el costo y la duración del desarrollo de cada requisito. Además, los autores subrayan el papel fundamental que desempeñan las personas, ya que, en muchos proyectos, quienes generan la deuda no son los mismos que deben asumir las consecuencias. Esta desconexión suele originarse por una brecha de comunicación entre los equipos técnico y los responsables de la toma de decisiones.

Lenarduzzi y Fucci (2019) coinciden en que la investigación sobre RTD sigue siendo limitada, ya que pocos estudios han propuesto estrategias concretas para su identificación, medición, gestión y mitigación.

Bonfim and Benitti (2024) Presentaron OntoRed como una guía para comprender la RTD, con un enfoque particular en su aparición dentro de organizaciones que aplican metodologías ágiles. Aunque estas prácticas ofrecenventajas al acelerar el desarrollo, también tienden a generar especificaciones deficientes de requisitos. En su estidio, los autores identifican los siguientes aspectos clave:

- **Consecuencias:** La RTD puede aumentar los costos del proyecto, provocar retrasos en la entrega y deteriorar la calidad del software.
- **Causas:** Factores como la información incompleta, la falta de comunicación, la volatilidad de los requisitos y la escazes de tiempo para una planificación adecuada contribuyen a la aparición de RTD.
- **Acciones recomendadas:** Los autores sugieren realizar reuniones periódicas, mantener una documentación clara y establecer ciclos efectivos de retroalimentación, entre otras estrategias, para mitigar los efectos de la RTD.

Frattini et al. (2023) recopilan causas e indicadores de RTD, a partir de un mapeo sistemático de literatura. En su estudio, destacan aspectos como la ambigüedad en la formalización de los requisitos, la entrega de requisitos incompletos, la implementación de soluciones suóptimas, la falta de trazabilidad de los requisitos y el código, la ausencia de documentos formales y las limitaciones del tiempo.

Por su parte, Perera et al. (2024) proponen un modelo para cuantificar RTD. Definen conceptos clave, establecen sus relaciones para facilitar el proceso de cuantificación. Además, identifican diversos costos asociados a la RTD, como: la necesidad de realizar un nuevo diseño, el costo de retrabajo, la insersión de nuevo código, los beneficios de asumir deuda y el costo de rectificación , entre otros.

1.2.1. Discusión de los trabajos relacionados

Diversos autores han contribuido al entendimiento de la Deuda Técnica de Requerimientos, proponiendo enfoques teóricos y prácticos para su identificación, clasificación, cuantificación y mitigación. Autores como Abad y Ruhe (2015) con su propuesta de modelo binomial apoyado de la programación dinámica se puede aplicar a diversos escenarios. Sin embargo, su enfoque puede ser complejo y poco accesible en equipos con pocos recursos o sin formación en finanzas.
Lenarduzzi y Fucci (2019), por otro lado presentan una tipología de tipo descriptivo a través del cual se pueden identifucar diferentes tipos de deuda, pero no hay estrategia clara de mitigación o cuantificación, limitando su aplicabilidad.
Bonfim and Benitti (2024) y Frattini et al. (2023) complementan una visión técnica más amplia con un enfoque más organizacional, Frattini identifica causas como tiempo, personas y artefactos, mientras que Bonfim y Benitti destavcan el impacto de las metodologías ágiles en la generación de RTD, estas investigaciones tienen como ventaja la posibilidad de la aplicabilidad. Y Perera et al. (2024) presentan un avance con su modelo para cuantificar RTD, con la posibilidad de su aplicación en entornos diversos.
Con lo que podemos decir que, a través de las evidencias de la literatura cada día hay un mayor interés en el tema, por lo que un área de oportunidad es el creciente interés en sus causas y cuantificación, pero aún no hay un concenso en las definiciones, falta la validación de los modelos propuestos, hay una falta de herramientas y no hay una caracterización clara y objetiva de la RTD y sus dimensiones.

2. METODOLOGÍA PROPUESTA

Para llevar a cabo este proyecto, proponemos una metodología estructurada en cinco etapas, las cuales se ilustran en la Figura 1, y se describen a continuación:

Fase 1: Revisión del estado del arte. En esta fase, realizaremos una revisión sistemática de la literatura, siguiendo la metodología propuesta por Kitchenham et al. (2009). El objetivo de esta etapa es analizar cómo se ha investigado y abordado la RTD en estudios previos dentro de un periodo de tiempo determinado. De esta manera, se pretende identificar sus posibles causas, características y dimensiones clave, así como las métricas que se han propuesto para medirla.

Fase 2: Extracción de causas y definición de características. En esta etapa, identificaremos las principales causas y características de la RTD basándonos en la revisión de la literatura realizada en la Fase 1. Además, complementaremos esta información con las opiniones de profesionales expertos en el área para definir las características más relevantes que se integrarán en el modelo.

Fase 3: Análisis de proyectos en repositorios abiertos. En esta fase buscaremos proyectos de uso libre en repositorios GitHub para obtener datos del mundo real, analizarlos y caracterizar la RTD y sus dimensiones. Extraeremos comentarios de código, pull request y commits que puedan revelar SATD, así como indicadores de ambigüedad, inconsistencia, volatilidad, incompletitud y obsolescencia de requisitos. Consideramos que GitHub nos permitirá recopilar estos datos de manera eficiente y a gran escala.

Fase 4: Aplicación de técnicas de aprendizaje automático. Emplearemos técnicas de aprendizaje automático para identificar patrones y relaciones entre las características y dimensiones de la RTD en los proyectos analizados. Utilizaremos modelos de clusterización para agrupar los diferentes tipos de RTD según sus características, y también identificaremos reglas que permitan predecir su aparición.

Fase 5: Estimación y predicción de RTD. Finalmente, aplicaremos las reglas definidas en la etapa anterior para estimar la probabilidad de ocurrencia de la RTD en nuevos proyectos. Con ello, buscaremos anticipar su aparición y propocionar información valiosa para su gestión y prevención.

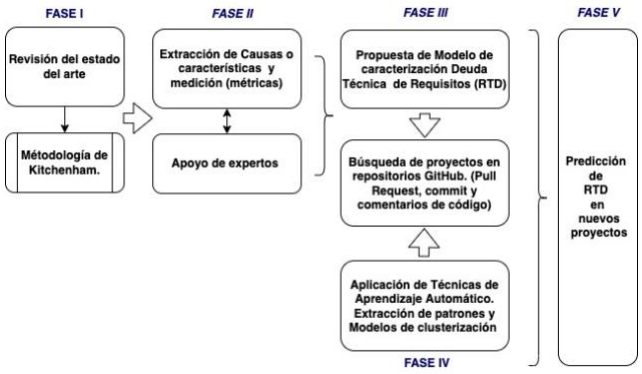


Figura 2. Fases de la metodología propuesta para caracterización, predicción de RTD

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Ya hemos completado la Fase I del proyecto. A partir del análisis de la literatura, identificamos diversas causas que originan la RTD, las cuales se relacionan con factores como el tiempo, los recursos humanos, los recursos económicos y los artefactos; algunas de estas causas se presentan en la Tabla 1. En la Fase II, nos encontramos desarrollando el instrumento que nos permitirá recopilar la opinión de expertos y complementar así la información obtenida en la revisión. Respecto a la Fase III, ya hemos extraído varios repositorios que contienen comentarios de código, *commits* y *pull requests* relevantes para el análisis. Actualmente, estamos procesando y depurando esta información para su posterior tratamiento.

Tabla 1. Causas identificadas

Causa	Factor
Ambigüedad de los requisitos	Artefactos
La no existencia de herramientas para rastreo entre requisitos y funcionalidad	
Ausencia de documentación o documentación incompleta	
No se hacen ejercicios de verificación y validación	
Volatilidad de los requisitos	
Presiones en el tiempo	Tiempo
Priorización deficiente	
Problemas de comunicación	Recursos humanos
Uso de canales de comunicación poco efectivos	
Complejidad de los requisitos	
Falta de pericia en los desarrolladores	
Limitación de recursos	Recursos económicos

4. CONTRIBUCIONES ESPERADAS

Este trabajo ofrece una contribución significativa e innovadora al estudio de la Deuda Técnica de Requisitos (Requirement Technical Debt - RTD), al enfocarse en su identificación, caracterización y aplicación práctica en proyectos reales. A partir del análisis de la literatura, identificamos causas y características clave de la RTD, que servirán como base para diseñar un modelo de caracterización y dimensionalidad. Este modelo propondrá un marco conceptual formal, sustentado en evidencia empírica, que facilitará la comprensión profunda de la RTD y su impacto en el desarrollo de software. Al definir con claridad las características que originan la RTD y las dimensiones donde se manifiesta, este trabajo permitirá desarrollar estrategias efectivas para su detección, gestión y mitigación. Estas estrategias contribuirán a mejorar la calidad del software, aumentar la satisfacción de los usuarios y fomentar prácticas de desarrollo más sostenibles. Asimismo, el diseño de un modelo de predicción permitirá anticipar la aparición de la RTD en etapas tempranas del ciclo de vida del software, reduciendo así su impacto y fortaleciendo la toma de decisiones en entornos reales de desarrollo.

5. CONCLUSIONES

Esta propuesta aborda un tema de creciente interés en el ámbito de la deuda técnica, pero aún poco explorado en relación con los requisitos: la Deuda Técnica de Requisitos (Requirement Technical Debt - RTD). El proyecto se enfoca en caracterizar y dimensionar la RTD a partir de evidencia obtenida en proyectos reales, específicamente a través del análisis de comentarios de código, *pull requests* y *commits* realizados por desarrolladores. La metodología propuesta se compone de cinco fases, diseñadas para alcanzar el objetivo

general del estudio. En la primera fase, identificamos diversas causas y síntomas de la RTD mediante una revisión sistemática de la literatura, la cual ya se encuentra en proceso de evaluación para su publicación. En paralelo, hemos iniciado el análisis de comentarios de código de uso libre extraídos de GitHub, donde detectamos expresiones asociadas a distintos tipos de deuda técnica, lo que confirma la viabilidad del enfoque. Actualmente, avanzamos en la segunda fase, desarrollando un instrumento que nos permitirá recopilar la opinión de profesionales del área. Este insumo será clave para enriquecer la caracterización de la RTD, validar sus dimensiones e identificar métricas relevantes para su medición. Como línea de trabajo futura, planeamos aplicar el modelo de dimensionalidad en contextos reales de desarrollo con el fin de refinar y validar el modelo de predicción propuesto. Este esfuerzo contribuirá a anticipar la aparición de RTD y facilitará su gestión proactiva, mejorando así la calidad y sostenibilidad de los productos de software.

REFERENCIAS

Abad, Z.S.H. and Ruhe, G. (2015) 'Using real options to manage Technical Debt in Requirements Engineering', *2015 IEEE 23rd International Requirements Engineering Conference, RE 2015 - Proceedings*, pp. 230–235. Available at: https://doi.org/10.1109/RE.2015.7320428.

Alhefdhi, A., Dam, H.K. and Ghose, A. (2024) 'Towards automating self-admitted technical debt repayment', *Information and Software Technology*, 167. Available at: https://doi.org/10.1016/j.infsof.2023.107376.

Boehm, B.W. (1976) 'Software Engineering', *IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS*, 25(12).

Bonfim, V.D. and Benitti, F.B.V. (2024) 'Ontored: requirements debt ontology'. Available at: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4499025/v1.

Brown, N. *et al.* (2010) 'Managing technical debt in software-reliant systems', in *Proceedings of the FSE/SDP workshop on Future of software engineering research*. New York, NY, USA: ACM, pp. 47–52. Available at: https://doi.org/10.1145/1882362.1882373.

Cunningham, W. (1993) 'The wycash portfolio management system', *ACM SIGPLAN OOPS Messenger*, 4(2), pp. 29–30. Available at: https://doi.org/10.1145/157710.157715.

Ernst, N.A. (2012) 'On the role of requirements in understanding and managing technical debt', *2012 3rd International Workshop on Managing Technical Debt, MTD 2012 - Proceedings*, pp. 61–64. Available at: https://doi.org/10.1109/MTD.2012.6226002.

Fowler Martin (2009) *Technical debt quadrant*. Available at: https://martinfowler.com/bliki/TechnicalDebtQuadrant.html (Accessed: 7 March 2025).

Frattini, J. *et al.* (2023) 'An initial theory to understand and manage requirements engineering debt in practice', *Information and Software Technology*, 159, p. 107201. Available at: https://doi.org/10.1016/J.INFSOF.2023.107201.

Kitchenham, B. *et al.* (2009) 'Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review', *Information and Software Technology*, 51(1), pp. 7–15. Available at: https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009.

Lenarduzzi, V. and Fucci, D. (2019) 'Towards a holistic definition of requirements debt', *International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement*, 2019-Septemer. Available at: https://doi.org/10.1109/ESEM.2019.8870159.

McConnell, S. (2008) 'Managing technical debt'. Available at: www.construx.com/whitepapers (Accessed: 4 April 2024).

Melo, A. *et al.* (2022) 'Identification and measurement of requirements technical debt in software development: A systematic literature review', *Journal of Systems and Software*, 194, p. 111483. Available at: https://doi.org/10.1016/J.JSS.2022.111483
.

Perera, J. *et al.* (2023) 'Quantifying requirements technical debt: a systematic mapping study and a conceptual model', *2023 IEEE 31st International Requirements Engineering Conference (RE)*, 2023-September, pp. 123–133. Available at: https://doi.org/10.1109/RE57278.2023.00021.

Perera, J. *et al.* (2024) 'Modelling the quantification of requirements technical debt', *Requirements Engineering*, 29(4), pp. 421–458. Available at: https://doi.org/10.1007/s00766-024-00424-3.

Rios, N., Mendonça Neto, M.G. de and Spínola, R.O. (2018) 'A tertiary study on technical debt: types, management strategies, research trends, and base information for practitioners', *Information and Software Technology*, 102, pp. 117–145. Available at: https://doi.org/10.1016/J.INFSOF.2018.05.010.

Deep Neural Network Training with Synthetic Data for BMI Classification

Velázquez Dodge Charles Fernando [**]
Xochimanca Tapia Eduardo [*] **Ayala Coapango Ana Luisa** [*]
Torres Gómez Georgina [*] **Leyva Varela Paola** [*]

[*] *Universidad Stratford de Cuautla, Av Insurgentes 250, Emiliano Zapata, 62744 Cuautla, Mor.*
[**] *Instituto Tecnológico de Cuautla, Libramiento Cuautla-Oaxaca S/N Juan Morales, 62745 Cuautla, Mor. (e-mail: charlesdodge@ieee.org)*

Abstract:
This research explores the use of synthetic data to train a deep neural network for Body Mass Index (BMI) categorization. After training, the model undergoes evaluation using data sourced from actual individuals. The classification based on BMI changes according to an individual's age, and World Health Organization provides a percentile table for the classification of youths, whereas adults and the elderly are categorized using other classifications. This model is taught to classify individuals into underweight, healthy, overweight, and obese. The concept of using synthetic data arises from the challenges associated with obtaining authentic information, particularly data pertaining to children, since parental consent is required according to Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA) U.S. Department of Health and Human Services, Office for Civil Rights (2003) and *Ley Federal de Protección de Datos Personales en Posesión de los Particulares* (LFPDPPP) Ley Federal de México (2010). A further drawback is the inflexibility of the obtained data, and that's why we suggested this strategy to train a neural network, since synthetic data is more available, can be balanced, and may be created for particular classifications according to the needs. After completing the neural network training, we proceed to evaluate the model using real-world data. As a result, the model produces an acceptable classification, which could be readily improved by creating more synthetic data.

Keywords: Synthetic Data, Deep Learning, BMI Classification, Obesity, Health Prediction

1. INTRODUCTION

The Body Mass Index (BMI) is a widely used statistic for determining whether a person is healthy, obese, underweight, or overweight. It is vital to monitor patients in hospitals and avoid various health complications. It is typical in the literature to find the usage of large datasets based on real-world patients Yi et al. (2024); nevertheless, the dataset information may not always suit the particular study goals. Another problem is the privacy of patients, particularly minors, whose data requires parental consent according to U.S. Department of Health and Human Services, Office for Civil Rights (2003) and Ley Federal de México (2010). Synthetic data is a beneficial alternative since it is constantly available, can be focused on the information required, is simple to collect, and is less expensive Smith et al. (2022) Klein and Michels (2024). In this context, we are employing metrics based on Mexican standards; therefore, the data created will be provided by the IMSS online calculator, which is based on World Health Organization percentile data Rodríguez et al. (2011).

Several sectors, including healthcare, have effectively used deep learning. To get effective results in neural network training, the dataset is critical, and synthetic data will meet the data requirements. However, we test the trained model's performance using a real-world situation using data from a group of Mexicans.

The purpose of this project is to investigate the use of synthetic data for training deep neural networks to categorize BMI categories in adults, as well as BMI percentiles for newborns, children, and adolescents.

The neural network uses three input neurons for sex, age, and BMI. The following layer includes eight neurons, the next ten neurons, and finally another layer of eight neurons and four output neurons. The layers employ the RELU activation function, with the exception of the output, which uses the sigmoid function. The learning rate is dynamic and determined by the derivative of the error.

2. STATE OF THE ART

The next works presented help to prove the benefits of the use of synthetic data and show related works with obesity and BMI that use different algorithms.

2.1 The use of synthetic data in biology and medicine

The work of Smith et al. (2022) proves that the synthetic data can be used to share sensitive health information without compromising privacy and that its use accelerates

access to clinical data without the lengthy ethical approval processes.

Other studies that use the synthetic data published by Klein and Michels (2024) recognize the high cost of real data and the challenges of generating synthetic data. Proposes the synthetic generation to train a machine learning model that optimizes the process to detect disease in tomato plants with lower cost. They conclude that the use of synthetic data lets them generate a "good" training data with lower cost and time.

On the other side, we discovered research that utilizes synthetic data but is unrelated to obesity or BMI Almeida et al. (2022). This research highlights the importance of using synthetic data in therapeutic settings since it is more accessible, less expensive, and does not need personal information. The research used synthetic data to substitute for a genuine diabetes patient, which was then analyzed by two certified experts in the field.

2.2 Algorithms used on BMI

For this research, we identified a thorough paper review authored by Yi et al. (2024), which included 40 publications about the usage of deep learning and obesity. None of the 40 publications included in the study discuss the use of synthetic data; the majority are datasets from actual patients, but other types of datasets include genetic and phenotypic databases, pictures, mobile app data, and electronic health records. Traditional feedforward networks, CNNs, LSTMs, and hybrid models have all been utilized.

Other obesity-related papers, such as López Díaz et al. Díaz et al. (2023), were discovered by other methods. They utilized KNN and random trees in teens with an accuracy of 80-87%.

Other publications on baby obesity give a categorization utilizing fuzzy logic with ID3Suca et al. (2016); the findings of this piece were excellent, with an accuracy of 83.65% in males and 76.13% in women. Other similar study used fuzzy rules in Mexican childrenAlva et al. (2020); they obtained a prediction of 93% to 97% in children aged 10 to 14 years old.

2.3 Conclusions

The current state of the art shows the advantages of utilizing synthetic data, including cost reduction, time efficiency, and the preservation of patient privacy. There are many algorithms used for BMI and obesity; however, those utilizing synthetic data are limited, particularly in application to a younger population.

3. METHODOLOGY

This section describes the method used to generate our data to train the model and the architecture of the neural network.

3.1 Generation of data

To generate the synthetic data, high-level students from the areas of nursing and nutrition generated, based on their

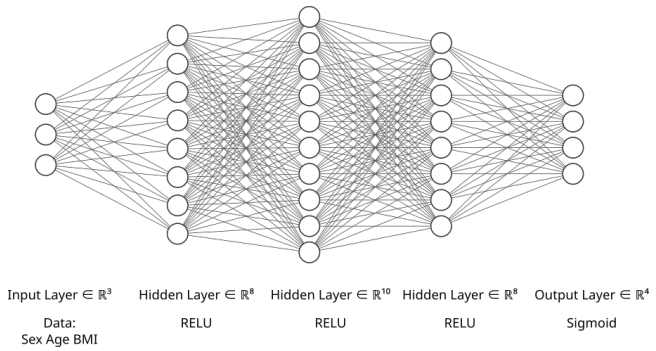


Fig. 1. Neural network architecture

experience, a list of age, gender, weight, and height. Using the IMSS's online calculator (*https://imss.gob.mx/salud-en-linea/calculaimc*), they created a balanced list with the same number of men and women, varying ages, and the same number of underweight, overweight, obese, and healthy classes. Finally, they validated the consistency.

The final dataset obtained has 100 registers, with 24 representing underweight, 27 for healthy, 27 for overweight, and 22 for obese. The data were also normalized, with 100 representing the maximum age and 40 representing the maximum BMI.

3.2 Neural Network Architecture

The neural network receives input from three neurons: BMI, age, and sex. The output is four neurons for classification: underweight, healthy, overweight, and obese.

The first hidden layer contains eight neurons with the RELU activation function, the second has ten neurons with the RELU activation function, and the final hidden layer has eight neurons with the RELU activation function as well. The output layer employs the sigmoid activation function. All layers are fully connected, and similar models were utilized for deep learning in BMI applications Varela-Tapia et al. (2022). The RELU function is employed to avoid the vanishing gradient Hochreiter (1991).

The implemented deep neural network consists of an input layer with n neurons corresponding to the input features and three hidden layers with ReLU activation:

$$h_j = \max(0, \sum_i w_{ij} x_i + \theta_j) \tag{1}$$

An output layer with sigmoid activation:

$$y_k = \frac{1}{1 + e^{-\sum_j w_{jk} h_j - \theta_k}} \tag{2}$$

3.3 Training

Cost function: Mean Squared Error (MSE) was used:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} (t_{pk} - y_{pk})^2 \tag{3}$$

Weight update using backpropagation:

$$w_{ij} = w_{ij} + \eta \cdot \delta_j \cdot x_i + \alpha \cdot \Delta w_{ij} \tag{4}$$

where

$$\delta_j = \frac{\partial E}{\partial h_j} \tag{5}$$

During training, we discovered a difficulty reducing error. So, we modified the learning rate equation to make the value dynamic:

$$\eta = \frac{\eta_{\max}}{1 + \lambda \left(\frac{dE}{dt}\right)^2} \tag{6}$$

The Table 1 shows the parameters and architecture information:

Parameter	Value
Epochs	50,000
Batch size	100
Input neurons	3
Hidden layer 1	8
Hidden layer 2	10
Hidden layer 3	8
Output neurons	4
Bias initialization	0.08
Initial learning rate	1×10^{-5}
Minimum learning rate	1×10^{-9}
Maximum learning rate	1×10^{-4}
Learning rate decay	0.9
Momentum (α)	0.1
Momentum decay	0.99
Tolerance	1×10^{-4}
Activation function (hidden layers)	ReLU
Activation function (output layer)	Sigmoid

Table 1. Hyperparameters and architecture of neural network.

The learning rate changes every epoch acording to the equation (6)

4. RESULTS

To validate the model's performance, real data from young individuals and children was used to assess the network's classification accuracy. The data set of the Table 4 was obtained by nutrition students using the online aplication given by IMSS.

The performance of the neural network was assessed using 48 test patterns. The predicted and actual outputs of each pattern were compared. A pattern was judged properly categorized if all of the predicted outputs matched the actual results.

Out of the 48 test patterns, 35 were properly categorized and 13 were incorrectly classified. This yields an overall categorization accuracy of around 72.9%. Table 2 displays the final classification results in a confusion matrix where the main diagonal shows the correct classifications, while Table 3 displays the model's performance with different metrics.

	A	B	C	D
A	2	1	0	0
B	2	19	7	0
C	0	0	7	3
D	0	0	0	7

Table 2. Confusion Matrix of the Neural Network. Classes: A=Underweight, B=Healthy, C=Overweight and D=Obesity.

Class	Precision	Recall	F-Measure
Underweight	50.00	66.67	57.14
Healthy	90.48	73.08	80.85
Overweight	70.00	100.00	82.35
Obesity	100.00	100.00	100.00

Table 3. Metrics of the Neural Network's Performance

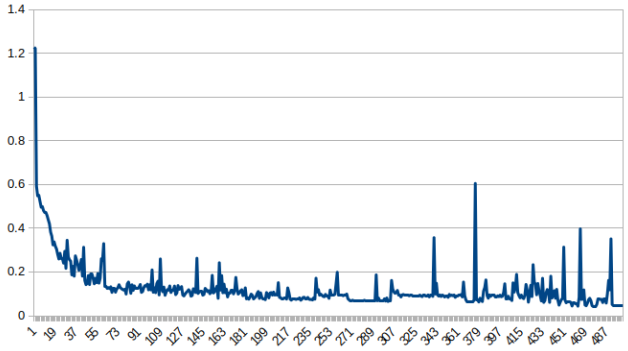


Fig. 2. Mean Squared Error (MSE)

5. CONTRIBUTIONS

The contributions of this study are the following:

- The use of the IMSS government calculator to generate synthetic to train a deep artificial neural network that is faster and easier than conventional methods while protecting patient privacy. This is an improvement to BMI data acquisition and makes the data more adaptable to the needs.
- The use of deep learning for BMI prediction in a mexican young population is a novel approach. Given the difficulty of the bureaucratic process, parental permission is required, as well as consideration of local law depending on the country.
- A dataset of teenagers groups from Mexico obtained by nutrition students.

In this study, we demonstrate the acceptable performance of a model trained with synthetic data utilizing IMSS standards and an online calculator. This technique is a unique approach to training a deep neural network for BMI classification in mexican adolescents. The protection of minors' biometric and personal information, addressing ethical concerns.

6. DISCUSSION

The accuracy of 72.9% is a good starting point to investigate the use of synthetic data. We consider that an acceptable starting point, and it may be improved in future works. The results for underweight are lower than the others, so more data is needed to improve the significance and quality of the neural network. We attempted to generate diverse data in age, gender, and BMI classification; however, it is necessary to increase the infant data because it is nonlinear when compared to adult data classification. That's because the children's classification is based on statistical tables. Other changes that could improve the results include expanding the classification with more variables, such as weight and height. Perhaps

it is redundant, but there may be a pattern in the additional information that leads to improved classification performance, especially on newborns that are classified with other metrics like the head size and the proportion of their body Rodríguez et al. (2011).

The limitation of this study was the volume of data. Generating synthetic data is easier than getting the data from real people, but it requires validation from experienced people in the area. We aimed to gather high-quality data to train, however the data set is too small to train the model. To improve the results, a larger dataset is needed, as well as modifications to the model architecture, such as incorporating dropout and experimenting with other training algorithms, like Adam.

7. CONCLUSIONS

Using synthetic data for BMI is a simple and successful method that eliminates the need for patients to provide their information, especially for children. Our performance is acceptable, but we believe it might be improved by using additional synthetic data for training. The train performed well (95% accuracy), but had some trouble identifying infants correctly. The IMSS categorization use height and body proportions rather than BMI, as outlined in the IMSS guideline Rodríguez et al. (2011). This ambiguity in the model leads to negative consequences for babies and early children.

At the start of the experiments, we used data generated by ChatGPT combined with the IMSS calculator, but we discovered discrepancies between the values calculated with the IMSS online application. The training performance was around 70%, so we decided to delete the ChatGPT data and used the online calculator created by the government health authority.

Id	Sex	Age	Height	Weight	BMI	Class
1	M	15	1.76	72.6	23.4375	overweight
2	M	15	1.9	84.1	23.2964	overweight
3	M	15	1.62	55.8	21.2620	healthy
4	M	14	1.66	65.4	23.7335	overweight
5	F	16	1.59	57.8	22.8630	healthy
6	M	15	1.74	61.5	20.3131	healthy
7	F	15	1.61	60	23.1473	healthy
8	F	15	1.6	49.5	19.3360	healthy
9	F	15	1.51	80.7	35.3932	obesity
10	M	17	1.9	87.5	24.2382	healthy
11	M	17	1.74	70.4	23.2527	healthy
12	M	17	1.8	90.7	27.9938	overweight
13	M	17	1.7	96.5	33.3910	obesity
14	M	17	1.7	102.9	35.6055	obesity
15	F	17	1.53	56.9	24.3069	healthy
16	F	17	1.68	68	24.0930	healthy
17	F	17	1.6	49.4	19.2969	healthy
18	F	17	1.61	90.08	34.7517	obesity
19	F	17	1.53	44.2	18.8816	healthy
20	F	17	1.65	65.9	24.2057	healthy
21	M	17	1.8	81	25	overweight
22	M	16	1.7	80	27.6817	overweight
23	M	16	1.69	53.8	18.8369	healthy
24	F	16	1.57	47.2	19.1488	healthy
25	M	16	1.71	84.7	28.9662	obesity
26	F	16	1.49	40.3	18.1523	healthy
27	F	16	1.63	64.9	24.4270	overweight
28	F	14	1.55	56.7	23.6004	overweight
29	F	14	1.59	62.3	24.6430	overweight
30	M	14	1.57	51.1	20.7311	healthy
31	F	14	1.53	52.8	22.5554	healthy
32	F	14	1.5	43.1	19.1556	healthy
33	M	14	1.45	37.4	17.7883	healthy
34	M	14	1.72	81.9	27.6839	overweight
35	M	14	1.74	63.4	20.9407	healthy
36	M	14	1.64	70	26.0262	obesity
37	F	14	1.44	40.5	19.5313	healthy
38	F	12	1.6	44.2	17.2656	healthy
39	F	12	1.53	45.7	19.5224	healthy
40	M	12	1.44	42.2	20.3511	overweight
41	M	12	1.48	37.2	16.9832	healthy
42	M	12	1.61	46.9	18.0934	healthy
43	F	12	1.53	61.9	26.4428	obesity
44	F	12	1.43	37.9	18.5339	healthy
45	M	13	1.48	34.65	15.8190	healthy
46	M	13	1.71	61	20.8611	overweight
47	F	13	1.45	36.2	17.2176	healthy
48	M	13	1.63	47.4	17.8403	healthy

Table 4. Real-world data used to validate.

REFERENCES

Almeida, A.R., Déniz, A., Fabelo, H., Ortega, S., Soguer, C., Wägner, A., and Callicó, G.M. (2022). Validación clínica y análisis de datos sintéticos de mujeres con diabetes generados con técnicas de inteligencia artificial: prueba de concepto. *Endocrinol Diabetes Nutr.*, 69, Espec Cong 1, 210.

Alva, R., Laria, J., Ibarra, S., Castán, J., and Teran, J. (2020). Propuesta de un modelo difuso para determinar sobrepeso y obesidad en niños y adolescentes. *Revista Chilena de Nutrición.* SCIELO.

Díaz, S.L., Sibaja, J.P., Martínez, A.F., and Vázquez, S.J. (2023). Algoritmos de clasificación para la detección de obesidad en adolescentes: Un estudio comparativo entre knn y árboles de decisión. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información.*, 11, 23.

Hochreiter, S. (1991). *Untersuchungen zu dynamischen neuronalen Netzen.* Ph.D. thesis, Technische Universität München.

Klein, Waller, P.P.T. and Michels (2024). Synthetic data at scale: a development model to efficiently leverage machine learning in agriculture. *PubMed.* URL `https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39351023/`.

Ley Federal de México (2010). Ley federal de protección de datos personales en posesión de los particulares. Accessed: 2025-05-13.

Rodríguez, M.R., Ruano, M.D., Blanno, A.G., Hernández, C.Q., Gómez, V.G., and Márquez, R.H. (2011). Abordaje diagnóstico y seguimiento del paciente pediátrico con talla baja. Catálogo Maestro de Guías de Práctica Clínica. IMSS-510-11.

Smith, A., Lambert, P.C., and Rutherford, M.J. (2022). Generating high-fidelity synthetic time-to-event datasets to improve data transparency and accessibility. *BMC Medical Research Methodology*, 22(1), 176. doi:10.1186/s12874-022-01654-1. URL `https://doi.org/10.1186/s12874-022-01654-1`.

Suca, C., Córdova, A., Condori, A., and Cayra, J. (2016). Modelo difuso para la predicción de casos de obesidad empleando el árbol gfid3 generalizado. In *Research in Computing Science.*

U.S. Department of Health and Human Services, Office for Civil Rights (2003). Ocr privacy brief: Summary of the hipaa privacy rule. Accessed: 2025-05-13.

Varela-Tapia, E., Acosta-Guzmán, I., Acosta-Varela, C., Marcillo-Sanchez, P., Pérez, D., and Bravo, J. (2022). Intelligent predictive model of bmi in nutritionists' patients using machine learning algorithms: Logistic regression and neural networks. In *Proceedings of the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: "Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions"*. URL https://doi.org/10.18687/laccei2022.1.1.791.

Yi, X., He, Y., Gao, S., and Li, M. (2024). A review of the application of deep learning in obesity: From early prediction aid to advanced management assistance. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 18, 103000.

Design of a Three-Phase Inverter Controlled by an Artificial Neural Network Based on Model Predictive Control to Three-Phase Inductive Wireless Power Transfer.

Tirado Torres, Germán*, Ramírez Hernández, Jazmín*, Hernández González, Leobardo*.

**Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Culhuacan, Instituto Politécnico Nacional, Av. Santa Ana No. 1000, Col. San Francisco Culhucan, Mexico City 04430, México.*
(e-mail: gtiradot1500@alumno.ipn.mx, jramirezhe@ipn.mx, lhernandezg@ipn.mx)

Abstract: This article presents the methodology used to design a three-phase inverter controlled by an artificial neural network based on a predictive model that is coupled with a three-phase rectifier using inductors for wireless power transmission. The process starts with the design of the predictive model of the inverter, which was developed from the mathematical modelling of the three-phase currents. The Clarke transform is applied to optimize computational performance. The inverter design, controlled by the predictive model is validated by a simulation in MATLAB Simulink. During this phase, data corresponding to 60,000 operating cycles are recollected in a database. An artificial neural network is trained, using a Perceptron-type topology, in which the reference currents, the measured currents and the voltages of each phase are incorporated as input parameters, and the switching vector determined by the predictive control as output. At this stage, the optimal weights of the system are determined to reproduce the predictive control behavior. The training is validated in a new simulation in Simulink. The results show that the artificial neural network reproduces the predictive control operation with an efficiency of up to 88.9%, in a 3.574 kW converter. The three-phase inverter is coupled with a rectifier with a star-star inductor configuration. The results validate the proposed controller being a suitable solution for a three-phase wireless charger for high power applications such as electric vehicles rechargers or Unmanned Aerial Vehicle.

Keywords: Wireless power transfer, Artificial neural network controller, Model predictive control, Three-phase inverter, Artificial intelligence.

1. INTRODUCCIÓN

Los inversores electrónicos son dispositivos que convierten corriente continua (CD) en corriente alterna (CA), mientras que los rectificadores electrónicos son dispositivos que convierten corriente alterna (CA) en corriente continua (CD). éste último proceso es fundamental para la energización de dispositivos electrónicos digitales y baterías.

Los inversores trifásicos actualmente son utilizados en diferentes aplicaciones, la más común es la gestión de las fuentes de energía renovable, como las turbinas eólicas, los sistemas de energía fotovoltaica [9], los cuales normalmente producen energía en forma de corriente continua y requieren de una conversión a CA para ser integrada a la red de suministro.

También son utilizados para el uso de algunas máquinas eléctricas que funcionan con corriente alterna como ejemplo: los motores eléctricos [6] o en sistemas de transferencia inalámbrica de energía (WPT, por sus siglas en inglés) [3]. La alta demanda de vehículos eléctricos y/o híbridos actualmente está generando la necesidad de implementar sistemas de control para la carga optimizada de baterías para electromovilidad.

Existen diversas técnicas de control aplicables a los inversores, que varían en complejidad y efectividad. Entre las más básicas se encuentran el control por PWM discontinuo (DPWM, por sus siglas en inglés) [2]. Estas técnicas son relativamente simples y se utilizan ampliamente en aplicaciones donde los requerimientos de precisión no son tan estrictos. Sin embargo, también existen técnicas de control más avanzadas y robustas, como la modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM, por sus siglas en inglés) [6]. En algunos casos, estas técnicas permiten el cierre del lazo de control, lo que permite regular ciertos parámetros del sistema con el objetivo de mejorar la respuesta dinámica y mantener el sistema estable.

Algunas técnicas de control en estudio para la gestión de las energías renovables es el control por lazo de seguimiento de fase (phase-locked loop, PLL) [5], la cual es una técnica que controla el sistema mediante la regulación del voltaje de una fuente controlada por voltaje, esto a partir de la comparación de la transformada d-q.

Los inversores multi-nivel (MLIs) son topologías innovadoras que ofrecen menos perdidas por conmutación, baja distorsión armónica total (THD) y alta frecuencia de conmutación. En [7] se propone un HMLI que mejora el contenido armónico y el THD empleando técnicas de PWM en altas frecuencias generando siete niveles con inversores de puente-H en cascada (CHBIs, por sus siglas en inglés) lo que aumenta el número de elementos electrónicos, pero con la ventaja de que se emplea una sola fuente de CD. La estrategia de control propuesta es a través de modulación por espacio vectorial (SVPWM por sus siglas en inglés) donde se realiza la selección de los 21 posibles vectores de voltajes espaciales que corresponden a los posibles estados de conmutación del inversor; 6 vectores estacionarios largos, 12 vectores estacionarios cortos y 3 vectores neutros.

Actualmente se ha profundizado en la investigación de los inversores para sistemas de transmisión inalámbrica para carga en vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en ingles), y para aplicación en la recarga de baterías en vehículos eléctricos, ya que permiten una alta tasa de transferencia de energía y la eliminación del uso de un rectificador con corrección de potencia en la etapa de recepción [1].

Una técnica de control que ha sido estudiada recientemente es el control predictivo por modelo (MPC por sus siglas en inglés). Esta técnica es muy intuitiva y de fácil implementación para el control en convertidores de potencia que tienen diversos modos de operación. Se basan en un modelo matemático que predice el comportamiento futuro de la variable a controlar (voltaje, corriente, torque, etc), basado a los posibles estados de conmutación de los interruptores; se selecciona y se envía al convertidor el estado de conmutación que genera la variable de control cercana a la referencia establecida [8]. Esta técnica es muy robusta a variantes en la operación del circuito, sin embargo, cuando la topología del convertidor incluye un elevado número de interruptores, las predicciones requieren de un alto costo computacional que compromete la frecuencia de operación del convertidor.

Como solución a este problema se han desarrollado técnicas basadas en inteligencia artificial (AI por sus siglas en inglés), por ejemplo, controladores que emplean Redes Neuronales Artificiales (ANN por sus siglas en inglés), donde las ANN son entrenadas a partir de otro controlador, para posteriormente sustituirlo con un menor costo computacional. En este trabajo propone un cargador trifásico con transferencia de energía inalámbrica; el transmisor está compuesto por un inversor trifásico y en el receptor por un rectificador trifásico, unidos mediante un acoplamiento inductivo estrella-estrella, de acuerdo a la Fig. 1. Para realizar la regulación de corriente en el transmisor se propone un controlador basado en una red neuronal artificial entrenada por un controlador predictivo.

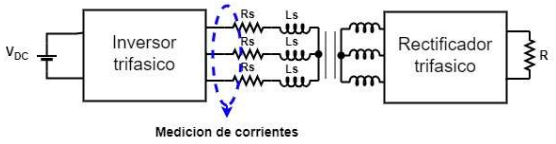


Fig. 1. Esquema de un inversor trifásico y un rectificador trifásico, acoplados por bobinas.

2. CONTROLADOR PREDICTIVO PARA LA REGULACIÓN DE CORRIENTE EN EL INVERSOR TRIFÁSICO

El control predictivo propuesto se basa en un modelo matemático discreto que predice el valor de la corriente futura a partir de los ocho modos de operación del convertidor. Estas corrientes son contrastadas con corrientes de referencia sinusoidales desfasadas 120° entre sí; para seleccionar la variable de conmutación apropiada se selecciona la función de costo que minimice los estados de conmutación.

2.1 Modelado matemático del circuito electrónico.

En la Fig. 2 se muestra la topología de un inversor trifásico, el cual consiste en tres ramas inversoras conformadas por dos interruptores cada una de ellas, la primera rama está compuesta por S_1 y S_4, la segunda por S_2 y S_5 y la tercera por S_3 y S_6.

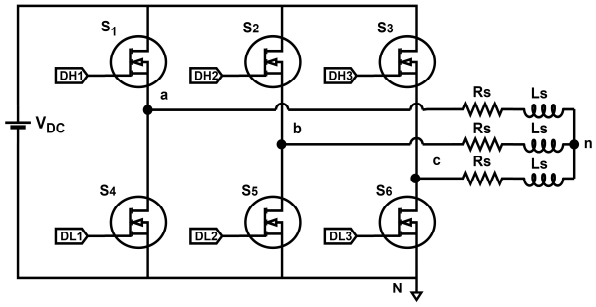


Fig. 2. Diagrama electrónico de un inversor trifásico carga inductiva en configuración estrella

El modelado matemático se realiza a partir del análisis del voltaje en las tres fases que dependen de los circuitos equivalentes de los modos de operación.

En la Fig. 3 se muestra el circuito electrónico equivalente para la fase a que corresponde al voltaje V_{aN} donde, V_{nN} es el voltaje entre los nodos n y N.

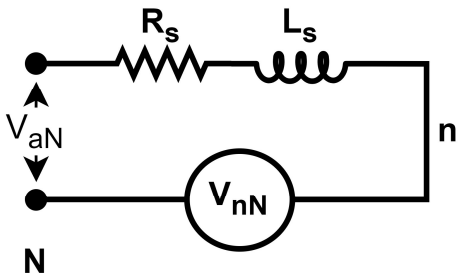


Fig. 3. Diagrama electrónico de una fase de un inversor trifásico.

De acuerdo a la Fig. 3 las ecuaciones para v_{aN}, v_{bN} y v_{cN} son:

$$v_{aN} = L_S \frac{d}{dt} i_a + R_S i_a + v_{nN} \quad (1)$$

$$v_{bN} = L_S \frac{d}{dt} i_b + R_S i_b + v_{nN} \quad (2)$$

$$v_{cN} = L_S \frac{d}{dt} i_c + R_S i_c + v_{nN} \quad (3)$$

Donde L_s y R_s corresponde a la resistencia e inductancia de la fase en operación, i_a, i_b y i_c son las corrientes que circulan por el circuito equivalente cuando los interruptores correspondientes de cada caso están activos.

Las ecuaciones (1) – (3) pueden plantearse de manera general como se indica en la Ec. 4.

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{L_S} \frac{d}{dt} \boldsymbol{i} + R_S \boldsymbol{i} + \boldsymbol{v}_{nN} \quad (4)$$

Con el fin de reducir el costo computacional se transforma de R^3 a R^2 aplicando la transformada de Clark [4 y 10]. Donde los vectores $\boldsymbol{i}$ y $\boldsymbol{v_{nN}}$ se definen por la Ec. 5 y Ec. 6 respectivamente:

$$\boldsymbol{i}_{(\alpha,\beta)} = \frac{2}{3}(i_a + \boldsymbol{a} i_b + \boldsymbol{a}^2 i_c) \quad (5)$$

$$\boldsymbol{v}_{nN(\alpha,\beta)} = \frac{2}{3} v_{nN}(1 + \boldsymbol{a} + \boldsymbol{a}^2) = 0 \qquad (6)$$

Para sistemas trifásicos balanceados con desfase de 120° se considera $a = e^{i\frac{2\pi}{3}} = \frac{-1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} j$.

En la ecuación (7) se expresa el voltaje del inversor en función de v_{aN}, v_{bN} y v_{cN} en sus coordenadas en (α,β)

$$\boldsymbol{v}_{(\alpha,\beta)} = \frac{2}{3}(v_{aN} + \boldsymbol{a} v_{bN} + \boldsymbol{a}^2 v_{cN}) \qquad (7)$$

Donde $v_{aN,}$ v_{bN} *y* v_{cN} pueden expresarse por las Ec. 8 – 9 en función de los estados de conmutación de las ramas S_a, S_b *y* S_c:

$$v_{aN} = S_a V_{DC} \qquad (8)$$

$$v_{bN} = S_b V_{DC} \qquad (9)$$

$$v_{cN} = S_c V_{DC} \qquad (10)$$

El voltaje $v_{aN} = V_{DC}$ si el valor de $S_a = 1$ y esto cumple cuando S_1 está activado y el S_4 está desactivado, si los interruptores S_1 *y* S_4 cambian de estado el valor de $S_a = 0$ y el valor de $v_{aN}=0$. De igual manera sucede con los voltajes v_{bN} *y* v_{cN}, cuando se cumplen las condiciones para los interruptores S_2, S_5, S_3 y S_6 que afectan a S_b y S_c respectivamente.

En la ecuación (4) se sustituye la derivada de la corriente por la Ec. 11 que es la aproximación de Euler cuando el tiempo de muestreo es pequeño.

$$\frac{d\boldsymbol{i}}{dt} \approx \frac{\boldsymbol{i}_{(\alpha,\beta)}(t_k + T_s) - \boldsymbol{i}_{(\alpha,\beta)}(t_k)}{T_s} \qquad (11)$$

donde $\boldsymbol{i}_{(\alpha,\beta)}(t_k)$ es la corriente medida en el instante t_k e $\boldsymbol{i}_{(\alpha,\beta)}(t_k+T_s)$ es la corriente futura. Sustituyendo la Ec. 11 en la Ec. 4 y despejando la corriente futura, se obtiene:

$$\boldsymbol{i}_{(\alpha,\beta)}(t_k + T_s) \approx \left(1 - \frac{R_s}{L_s}\right)\boldsymbol{i}_{(\alpha,\beta)}(t_k) + \frac{T_s}{L_s}(\boldsymbol{v}_{(\alpha,\beta)}(t_k)) \qquad (12)$$

Con la ecuación (12) se pueden obtener los ocho posibles valores de corriente obtenidos a partir de los ocho posibles estados de conmutación.

2.2 Ecuación de costo para selección de estado de conmutación.

La ecuación (13) corresponde a la función de costo que se emplea para seleccionar el estado óptimo de conmutación, Se comparan las ocho posibles corrientes futuras con la corriente de referencia en sus coordenadas ortogonales (α-β). El estado de conmutación que minimice la función de costo es seleccionado y enviado al convertidor.

$$g = \left|i_{ref\alpha}(t_k + T_s) - i_\alpha(t_k + T_s)\right| + \left|i_{ref\beta}(t_k + T_s) - i_\beta(t_k + T_s)\right| \qquad (13)$$

2.3 Simulación de un inversor operado por MPC

En la Fig. 4 se muestra el circuito que se emplea en la simulación en Matlab-Simulink. Se muestra el inversor trifásico operado por el MPC acoplado con un rectificador trifásico con los parámetros de la Tabla 1.

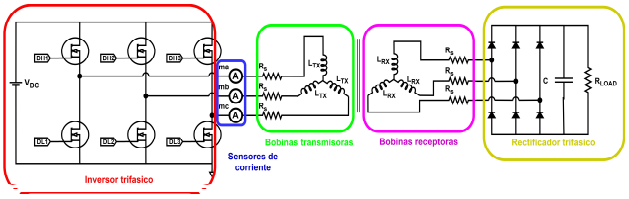


Fig. 4. Diagrama electrónico de un inversor trifásico carga inductiva en configuración estrella-estrella acoplado a un rectificador trifásico.

Tabla 1. Parámetros de simulación.

Propiedades	***Valor***	***Unidades***	***Tolerancia***
Inductancia	1.3	mH	±10%
Resistencia	8	Ω	Typ.

Las formas de onda generadas durante el proceso de simulación se presentan en la Fig. 5, las cuales muestran cómo se comporta el modelo bajo las condiciones establecidas en la Tabla 2. Como se puede observar en dichas formas de onda, el controlador predictivo basado en modelo predictivo demuestra una notable capacidad para seguir las referencias de manera precisa, se presenta un pequeño rizado en su seguimiento. De la simulación se guardaron los datos de entrada: la corriente i_α en el vector I_{mA}, la corriente i_β en el vector I_{mB}, la corriente de referencia $i_{ref\alpha}$ en el vector I_{rA}, la corriente de referencia $i_{ref\beta}$ en el vector I_{rB} y los voltajes v_α y v_β en los vectores V_{sA} y V_{sB} respectivamente; y como salida: se guarda el estado de conmutación definido por el control predictivo para cada una de las ramas inversoras, con estos datos se realiza una base de datos para proceder con el entrenamiento de la red neuronal.

Tabla 2. Condiciones de la simulación del control por modelo predictivo

Parámetros	**Valor**	**Unidades**
Frecuencia	20	kHz
Amplitud de referencia	20	A
Inductancia	1.3	mH
Resistencia	8	Ω

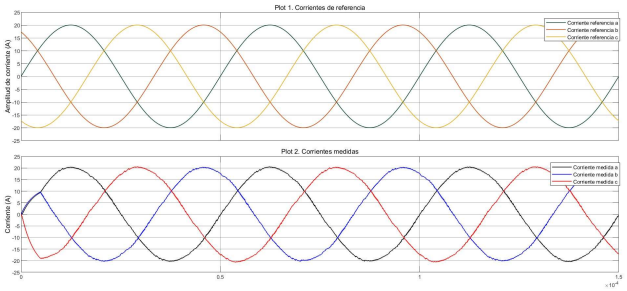


Fig. 5. Formas de onda de la corriente un inversor trifásico controlado por MPC.

3. ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL

Para llevar a cabo el entrenamiento de la red neuronal, es fundamental contar con un conjunto adecuado de datos, ya que estos permiten a la red neuronal artificial aprender y ajustar sus parámetros para imitar el funcionamiento del MPC. En este caso, la recopilación de datos se realizó mediante 60,000 ciclos

de información, lo que proporciona una muestra representativa para el proceso de entrenamiento, asegurando que la red pueda obtener pesos óptimos. La red neuronal artificial propuesta es de tipo Perceptrón, un modelo simple pero eficaz para tareas de clasificación y predicción (ver Fig. 6). El diseño de la red neuronal artificial se compone de seis entradas, que son esenciales para la correcta operación del sistema: I_{mA}, I_{mB}, I_{rA}, I_{rB}, V_{sA} y V_{sB}. Cada una de estas variables aporta información esencial para el comportamiento de las neuronas de salida. En cuanto a las salidas de la red neuronal artificial, se definen tres estados de conmutación, el valor de las neuronas de salida dependen de la función de activación, para este caso en particular se utiliza la función escalón, (ver Fig. 7) la cual cambia su estado dependiendo de la suma de la multiplicación de las neuronas de entrada por los pesos que afectan a cada neurona de salida, cada salida corresponde a los interruptores de las tres fases del inversor, lo que permite que el modelo realice las predicciones o decisiones necesarias para cada una de ellas de manera independiente. Este enfoque asegura que la red sea capaz de gestionar de forma eficiente las distintas variables involucradas, mejorando la precisión y efectividad de las predicciones generadas durante el entrenamiento.

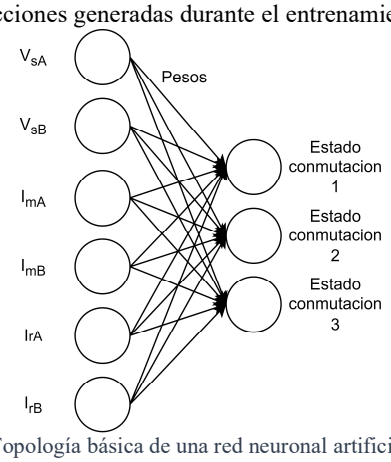
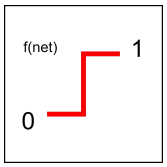


Fig. 6. Topología básica de una red neuronal artificial tipo perceptron.



$$f(net) = 0 si (net < 0)$$

$$f(net) = 1 si (net \geq 0)$$

Fig. 7. Diagrama de flujo del entrenamiento de una red neuronal artificial.

En la Fig. 8 se muestra el proceso para determinar los pesos óptimos de la red neuronal, se lleva a cabo un análisis de la acumulación de errores a lo largo de cada época de entrenamiento. Este proceso consiste en evaluar la evolución del error global de la red con el paso de las iteraciones, permitiendo observar las mejoras en el ajuste de los pesos en relación con el comportamiento del sistema. Al monitorear la acumulación de errores durante cada época, se logró identificar la convergencia de la red hacia los valores óptimos de los pesos, es decir, aquellos que minimizan la diferencia entre las predicciones realizadas por la red y los valores esperados. Este enfoque asegura que a medida que avanza el entrenamiento, los pesos se ajusten de manera eficiente, mejorando la capacidad de la red para generalizar y ofrecer resultados más precisos en situaciones futuras.

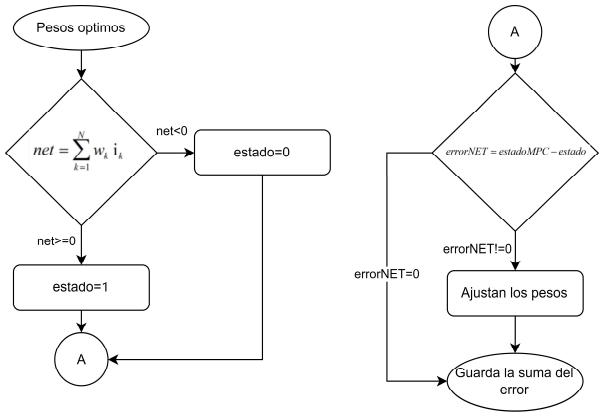


Fig. 8. Diagrama de flujo del entrenamiento de una red neuronal artificial.

En la Fig. 9, se puede observar que, en la época 38, las sumas de los errores alcanzan un valor mínimo, lo que indica que la red ha logrado una convergencia efectiva hacia los pesos óptimos. Se seleccionan los pesos correspondientes a la época 38, ya que son los más adecuados para su implementación en el modelo final, y reflejan el equilibrio óptimo entre el ajuste de los datos de entrenamiento y la capacidad de la red para determinar los estados de conmutación adecuados. Para mayor claridad, los pesos seleccionados en esa época se presentan en la Tabla 3, donde se detallan los valores específicos de cada uno de los parámetros ajustados durante el proceso de entrenamiento donde W1 a W6 corresponde a los pesos que conectan las seis neuronas de entrada con la neurona de salida del estado de conmutación de la primer rama inversora, de W7 a W12 los pesos que conectan las entradas con la segunda neurona de salida y W13 a W18 los pesos que conectan con la tercera neurona de salida.

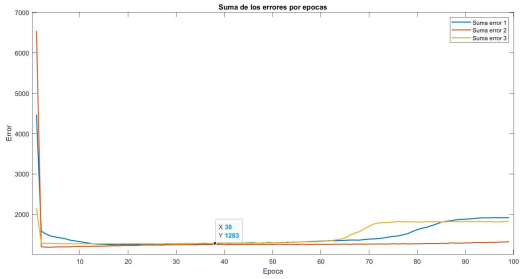


Fig. 9. Suma total de los errores en cada época.

Tabla 3. Valores de los pesos seleccionados.

W1	-0.018	**W10**	0.16
W2	0.26	**W11**	0.24
W3	0.027	**W12**	-0.21
W4	-0.41	**W13**	0.39
W5	-0.37	**W14**	0.47
W6	-0.324	**W15**	-0.38
W7	0.52	**W16**	-0.5
W8	-0.33	**W17**	0.18
W9	-0.67	**W18**	0.6

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON LA OPERACIÓN DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL.

Se llevó a cabo una simulación en Simulink de MATLAB para modelar un inversor trifásico utilizando los mismos parámetros establecidos previamente. En esta simulación, el inversor fue controlado por la red neuronal artificial, cuyos pesos óptimos fueron seleccionados según los resultados obtenidos en la época 127, como se muestra en la Tabla 3. Este control basado en la red neuronal permite ajustar el comportamiento del inversor de manera precisa y eficiente, aprovechando el aprendizaje previo realizado durante el entrenamiento. Además, la simulación se ejecutó bajo un conjunto específico de cambios en la amplitud de la corriente de referencia y el voltaje de suministro. Al aplicar estos parámetros en la simulación, se puede observar cómo la red neuronal responde y regula el inversor bajo diferentes escenarios

En la Fig. 10 se presentan las formas de onda que ilustran el comportamiento del inversor con una amplitud de referencia de 16 Amperes, la variación del voltaje de entrada del inversor, de 240 Volts a 360 Volts en pasos de 60 Volts y se indica el comportamiento de las corrientes obtenidas, como se observa el control aplicado al esquema inversor, permite obtener resultados estables a pesar de que el voltaje de suministro varié.

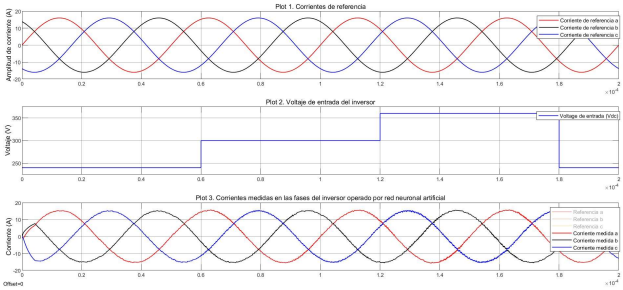


Fig. 10. Formas de onda de la simulación de un inversor trifásico controlado por red neuronal artificial con Iref=16A, bajo cambios en el voltaje de entrada.

En la Fig. 11 se muestran las formas de onda en el mismo orden y características de la Fig. 10, con una amplitud de referencia de 20 Amperes, este es el caso de la operación deseada, donde la potencia de salida es de 3.574 kW con una demanda de potencia a la entrada de 3.18 kW en el inversor, las formas de onda permiten visualizar los efectos de las variaciones en el voltaje de entrada tienen en la operación del inversor.

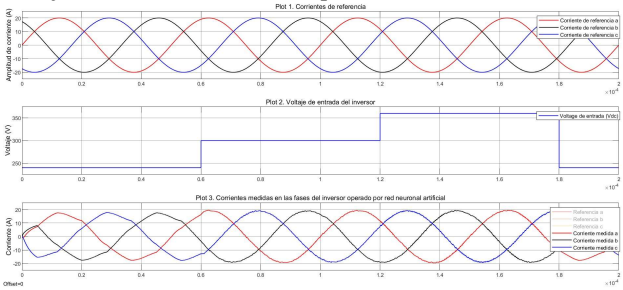


Fig. 11. Formas de onda de la simulación de un inversor trifásico controlado por red neuronal artificial Iref=20A, bajo cambios en el voltaje de entrada.

En la Fig. 12 se muestran las formas de onda en el mismo orden y características de la Fig. 10, con una amplitud de referencia 24 Amperes, a través de estas gráficas, se puede evaluar cómo el sistema maneja las variaciones en el voltaje de entrada y cómo mantiene la salida de acuerdo con la amplitud de la referencia, lo cual es fundamental para garantizar un funcionamiento estable del inversor bajo diferentes condiciones de operación.

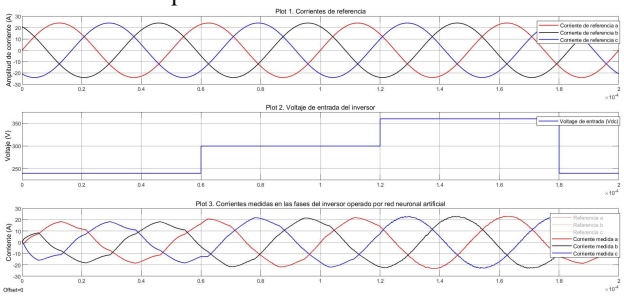


Fig. 12. Formas de onda de la simulación de un inversor trifásico controlado por red neuronal artificial Iref=24A, bajo cambios en el voltaje de entrada.

En la Fig. 13 se muestra el voltaje de salida del rectificador trifásico, el cual presenta un valor de 138.8 Volts rms para una potencia de 2.113kW. La diferencia de potencia entre la salida del inversor y la salida del rectificador se atribuye a un efecto de acoplamiento magnético entre las bobinas, que genera una ligera variación en el voltaje de salida. A pesar de este pequeño error, se puede notar que el rizado del voltaje en corriente continua (CC) es prácticamente imperceptible, lo que refleja la estabilidad del sistema y su capacidad para mantener un voltaje de salida estable. Este bajo nivel de rizado es crucial, ya que garantiza un funcionamiento eficiente y fiable del sistema, con mínimas fluctuaciones en la señal de voltaje a pesar de las pequeñas variaciones causadas en la entrada del inversor trifásico.

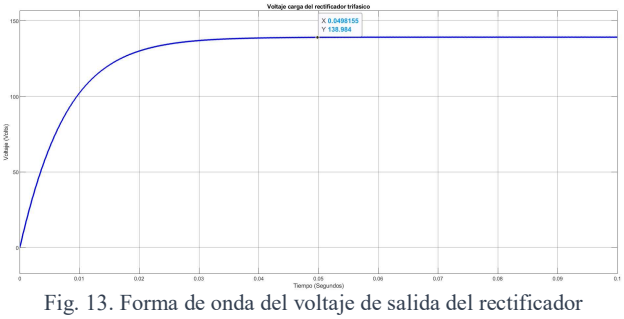


Fig. 13. Forma de onda del voltaje de salida del rectificador trifásico.

Aunque la red neuronal artificial de tipo Perceptrón ha demostrado ser capaz de funcionar adecuadamente bajo condiciones extremas, cabe señalar que su rendimiento podría no ser el óptimo en todos los casos. En este sentido, es posible que la investigación y el desarrollo de otras topologías de redes neuronales artificiales, que consideren otros factores puedan ofrecer mejoras en la eficiencia del sistema. Estas nuevas configuraciones podrían aprovechar características particulares de datos o escenarios específicos.

4. CONCLUSIONES

En este estudio, se presentó una metodología para el diseño de un inversor trifásico controlado por una red neuronal artificial, acoplado a un rectificador trifásico y diseñado para la transmisión inalámbrica de energía. A través del desarrollo de un modelo predictivo basado en la transformada de Clark se logró reducir la complejidad computacional y optimizar el rendimiento del sistema. El control de este inversor utilizando la red neuronal artificial Perceptron permitió ajustar con precisión los parámetros del sistema, alcanzando una eficiencia del 88.9% y una potencia de salida de 3.574 kW con una potencia de entrada de 3.18 kW en el inversor, en el rectificador se presenta una potencia de salida de 2.113kW con variaciones en el bus de CD, esto demuestra el potencial de esta metodología para mejorar el rendimiento de sistemas de conversión de energía y optimizar la transmisión inalámbrica. Si bien el sistema mostró un pequeño rizado en su seguimiento de referencia, este fenómeno no comprometió el rendimiento general, aun considerando la robustez del modelo en condiciones operativas normales y con variaciones. Además, el uso de redes neuronales artificiales para optimizar el control de inversores abre nuevas posibilidades para la mejora de sistemas de transmisión de energía inalámbrica, donde la precisión y eficiencia son esenciales. Los resultados obtenidos, aunque prometedores, también sugieren la existencia de áreas de mejora, especialmente en la reducción de errores debido al acoplamiento magnético y en la optimización del control en condiciones de operación extremas.

El estudio plantea importantes perspectivas para futuras investigaciones, como la implementación de diferentes tipos de redes neuronales artificiales o el uso de técnicas adicionales para reducir el rizado de voltaje y mejorar la eficiencia de conversión de energía. También, el desarrollo de inversores de alta eficiencia con control de diferentes tipos de redes neuronales artificiales basadas en otros modelos podría ser clave para enfrentar los retos de la implementación de sistemas de transmisión inalámbrica de energía.

REFERENCIAS

1. Chiuk Song et. (2015). Three-phase magnetic field design for low EMI and EMF automated resonant wireless power transfer charger for UAV. *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. pp. 1-4. Boulder, CO, USA, doi: 10.1109/WPT.2015.7140179.
2. H. -J. Lee, A. Yoo, C. Hong and J. Lee. (2015). A carrier-based adjustable discontinuous PWM for three-phase voltage source inverter. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. pp. 2870-2875. Montreal, QC, Canada, doi: 10.1109/ECCE.2015.7310062.
3. Pries, J. G. -J. Su. Galigekere V. and Onar O. (2020). Phase Shift Control of a Three-Phase Inverter for Balanced Secondary Currents in Misaligned Three-Phase Inductive Power Transfer Systems. *IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*. Pp 10-15. Seoul, Korea (South), doi: 10.1109/WoW47795.2020.9291271.
4. K. A. R. Fathima and M. L. Bharathim. (2017). A novel grid integration scheme for the hybrid electric power generation using solar and wind energy resources. *International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC)*. pp. 599-609. Melmaruvathur, India, doi: 10.1109/ICCPEIC.2017.8290434.
5. Haq, M. I. Humayra, J. T. Rahman, M., Tanzil, S. and Hanan, A. H. (2021). Control and Simulation of a Three-Phase Inverter. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. pp. 1419-1424. St. Petersburg, Moscow, Russia, doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396464.
6. M. A. F. M. Faudzi et al. (2021). Design Three Phase Inverter for Compressor Drive using Single-Phase AC Source. *Information Technology To Enhance e-learning and Other Application (IT-ELA)*. pp. 183-188. Baghdad, Iraq, doi: 10.1109/IT-ELA52201.2021.9773625.
7. Kishore, N. Shukla, K. and Gupta, N. (2022). A Novel Three-Phase Multilevel Inverter Cascaded by Three-Phase Two-Level Inverter and Two Single-Phase Boosted H-Bridge Inverters. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*. pp. 330-334. Singapore, Singapore.
8. Ramirez-Hernandez J, Juarez-Sandoval O. U, Hernandez-Gonzalez L. Tirado-Torres G. Vazquez-Fierros L. M. (2024). Artificial Neural Network Controller based on Model Predictive Control for a Current Regulation in a Three-phase Inverter. *2024 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC),* pp. 1-6. Ixtapa, Mexico, doi: 10.1109/ROPEC62734.2024.10877095.
9. Dziri, S.Alhato, M. M.Bouallèaue, S. and Siarry, P. (2022). Modeling and Control of a Three-Phase DC-AC Inverter in Grid-connected PV Systems under Unbalanced Conditions. *IEEE 21st international Ccnference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA).* pp. 589-594. Sousse, Tunisia, doi: 10.1109/STA56120.2022.10019044.
10. Tiantian, J. Yong, W. and Zongyang, L. (2020). Fault Diagnosis of Three-Phase Inverter Based on CEEMDAN and GWO-SVM. *Chinese Automation Congress (CAC)*. pp. 2362-2368. IEEE. Shanghai, China, doi: 10.1109/CAC51589.2020.9327856.

Intelligent Software Testing Property-Based Automation by Prompt Engineering

Gil Garcia Erven German * **Quintero Meza Ricardo Rafael** *

* *Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán, 80100.*
Emails: erven.gg@culiacan.tecnm.mx, ricardo.qm@culiacan.tecnm.mx

Abstract: The increasing complexity of modern software development demands more efficient, comprehensive, and adaptive testing methodologies that ensure the reliability, robustness, and quality of applications while optimizing the costs and time associated with system maintenance and evolution. Although traditional testing approaches remain widely used, they present significant limitations in terms of coverage, scalability, and adaptability, especially in the face of dynamic and ever-evolving systems. In this context, the integration of large language models (LLMs) through prompt engineering techniques emerges as a promising and innovative alternative for the automation, enhancement, and extension of software testing processes. This work introduces a novel tool that combines the generative capabilities of LLMs, accessed through specialized APIs, with the rigor of property-based testing (PBT). This synergy enables the automatic generation of test properties and intelligent code validation, facilitating early error detection and contributing to the development of more robust and reliable software from the early stages of the development life cycle. By leveraging prompt engineering, the proposed tool not only guides the accurate formulation of test properties but also orchestrates the generation of diverse and relevant test data. This approach aims to overcome the inherent limitations of conventional testing methodologies by enhancing test coverage, reducing manual effort, and improving scalability. The result is a more optimized verification process that promotes higher standards of software quality and reliability. This proposal represents a significant step toward intelligent test automation by integrating the strengths of artificial intelligence with formal validation methodologies. It opens new possibilities for the application of LLMs in software engineering, offering a practical and scalable solution for improving testing workflows in increasingly complex software environments.

Keywords: Prompt, Properties, Test

1. INTRODUCCIÓN

La industria en general se encuentra siempre en transición tratando de generar nuevos productos y servicios, que según el tipo de mercado son requeridos por los clientes. Desde el punto de vista de software, los requerimientos son uno de los puntos iniciales para el desarrollo, pues imponen las pautas a cumplir con el funcionamiento del mismo, pero que cumpla con el funcionamiento de manera temporal no es suficiente; el producto debe tener la versatilidad para futuras modificaciones, requerimientos o añadiduras que sean necesarias. Es ahí donde la calidad del software tiene que ser evaluada. La calidad del software no debe entenderse como una etapa aislada del ciclo de vida, sino como un aspecto transversal que se extiende desde el análisis de viabilidad hasta el despliegue, pasando por el mantenimiento y la evolución del sistema. (Baresi and Pezzè, 2006). Dentro de las estrategias para garantizar esta calidad, las pruebas de software desempeñan un papel fundamental. Estas consisten en la ejecución de un programa bajo distintas condiciones de entrada para verificar su comportamiento esperado.

Por lo tanto, una prueba tiene un resultado negativo si un error es detectado durante las ejecuciones, y el resultado es positivo si en el conjunto de prueba no se tiene un error. (Fink and Bishop, 1997) Entre los enfoques más prometedores en los últimos años se encuentran las pruebas basadas en propiedades (Property-Based Testing, PBT), que permiten una validación más exhaustiva del comportamiento del software mediante la definición de propiedades generales que deben cumplirse en todos los casos, facilitando así la detección temprana de errores y la automatización de los casos de prueba. Paralelamente, los Modelos de Lenguaje de gran tamaño (LLMs) están transformando diversas áreas del desarrollo de software. Entrenados con enormes volúmenes de texto, estos modelos son capaces de generar código, documentar funciones, sugerir mejoras e incluso asistir en la creación de pruebas automatizadas. (Brown et al., 2020). La interacción con los LLMs se realiza a través de prompts —instrucciones en lenguaje natural— cuya formulación precisa y contextualizada resulta clave para obtener resultados útiles.

Este proceso ha dado origen a la disciplina de la ingeniería de prompts, centrada en la optimización de estas instrucciones para maximizar la efectividad de los modelos. (Liu et al., 2023). Como resultado, la combinación entre la ingeniería de prompts y las pruebas basadas en propiedades se presenta como una propuesta innovadora para mejorar la calidad del software. Esta integración no solo permite automatizar etapas clave del proceso de validación, sino que también reduce significativamente la intervención manual, facilita la detección temprana de errores y contribuye a un desarrollo más ágil, confiable y alineado con las nuevas capacidades de la inteligencia artificial.

2. METODOLOGÍA

En el actual panorama del desarrollo asistido por inteligencia artificial, el aprovechamiento de modelos de lenguaje grandes (LLMs) como Mistral Large (Higginbotham and Matthews, 2024) para generar código ha ganado tracción significativa. Sin embargo, la generación automática de código plantea una preocupación central: ¿cómo garantizar su corrección y robustez sin intervención manual intensiva? Para abordar esta problemática, se propone **MistralHypothesis**, una extensión para Visual Studio Code que integra generación de código mediante LLMs con validación automatizada basada en pruebas por propiedades, usando la biblioteca *Hypothesis* (MacIver, 2018).

2.1 Propósito y Arquitectura de MistralHypothesis

El propósito principal de **MistralHypothesis** es automatizar y facilitar la adopción de pruebas basadas en propiedades (PBT) durante la generación de código con LLMs, permitiendo a desarrolladores validar implementaciones sin salir de su entorno de trabajo. Esta extensión busca no solo verificar la corrección funcional, sino también promover buenas prácticas y robustez en el software generado.

La arquitectura se compone de tres elementos principales:

(1) **Interfaz WebView integrada en VS Code:** Una ventana interactiva desde la cual el usuario puede ingresar su código en Python como si fuera un *prompt* de lenguaje natural o estructurado.
(2) **Módulo de generación con Mistral Large:** El código ingresado se interpreta como una especificación inicial que Mistral Large transforma en una implementación funcional en Python.
(3) **Módulo de validación con Hypothesis:** El código generado es analizado para extraer propiedades lógicas, a partir de las cuales se diseñan pruebas con Hypothesis. También se genera una sección de sugerencias con mejoras de diseño, posibles errores lógicos y refactorizaciones recomendadas.

2.2 Funcionamiento y Flujo de Trabajo

El flujo de trabajo propuesto es simple, pero funcional:

(1) El usuario abre un archivo Python en VS Code y lanza la extensión.
(2) Desde la interfaz proporcionada, el usuario ingresa un fragmento de código (o descripción funcional) como un *prompt*.
(3) Al enviar el prompt, la extensión interactúa con la API de Mistral Large, que responde con una implementación funcional del código objetivo aplicando la logica que implica el uso de la librería Hypothesis.
(4) Inmediatamente, este nuevo código es evaluado bajo una batería de pruebas generadas automáticamente con Hypothesis, basadas en propiedades inferidas o definidas previamente.
(5) El resultado del análisis se presenta al usuario en dos apartados:
- **Código generado con PBT:** Implementación funcional con pruebas Hypothesis incorporadas.
- **Área de mejora:** Comentarios sobre calidad del código, posibles mejoras y áreas de oportunidad.

2.3 Selección de API para la modificación de código

Considerando que los diferentes LLMs pueden generar respuestas totalmente distintas, optamos por buscar la mejor manera de analizar las características de cada uno, y qué mejor que hacerlo de forma paralela modificando parámetros principales y analizando las salidas generadas. En este contexto, GitHub Models se presentó como la plataforma elegida, ofreciendo un entorno que facilita la consulta de algunas de las APIs de LLMs de mayor demanda actual. Su enfoque permite no solo acceder de manera centralizada a modelos de última generación, sino también establecer comparaciones sistemáticas entre ellos, garantizando que las decisiones sobre su implementación se basen en datos objetivos.

El vasto ecosistema de proyectos y herramientas de evaluación presentes en GitHub (Dohmke, 2024) nos proporcionó el marco necesario para analizar objetivamente el rendimiento de modelos como Mistral Large, Llama y ChatGPT en tareas relevantes para nuestro objetivo.

La Tabla 1 ilustra el desempeño de algunos de los modelos más significativos del mercado en los reconocidos benchmarks de codificación HumanEval (Zheng et al., 2023) y MBPP (Yu et al., 2024). Estos puntos de referencia, ampliamente adoptados por la comunidad científica para evaluar la habilidad de los modelos en la resolución de problemas de programación a partir de descripciones en lenguaje natural, nos ofrecieron una perspectiva inicial sobre las capacidades relativas de cada arquitectura. Los resultados revelaron una destacada aptitud de Mistral Large en el benchmark MBPP, centrado en la resolución de problemas de programación. Por otro lado, Gemini Pro demostró un liderazgo en HumanEval, un benchmark diseñado para evaluar la capacidad de los modelos para abordar problemas más intrincados que requieren un razonamiento más profundo.

Tabla 1. Rendimiento en los puntos de referencia de codificación populares de los modelos LLM líderes del mercado.(Team, 2024)

Modelo	HumanEval	MBPP
Mistral Large	45.1%	**73.1%**
LLaMA 2 70B	29.3%	49.8%
GPT-3.5	48.1%	–
GPT-4	67.0%	–
Claude 2	–	–
Gemini Pro 1.0	**67.7%**	–

Estos resultados, junto con consideraciones sobre el costo y la disponibilidad de las APIs, influyeron en nuestra decisión de enfocar nuestra herramienta en la integración con Mistral Large, explorando sus capacidades para la generación de propiedades de prueba que capturen las invariantes esenciales del software bajo análisis.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Durante el desarrollo de **MistralHypothesis**, se diseñaron diferentes tipos de prompts para evaluar su efectividad en distintos contextos de desarrollo:

- **Prompts funcionales:** Solicitan implementar funciones con condiciones específicas, como: *"Escribe una función que invierta una cadena y valide que siempre regrese la cadena original si se invierte dos veces."*
- **Prompts de propiedades:** Describen comportamientos generales del código como: *"Genera una función que sume dos listas y asegúrate de que la longitud del resultado sea igual a la suma de ambas longitudes."*
- **Prompts mixtos:** Mezclan descripciones en lenguaje natural con fragmentos de código para guiar al modelo otorgando mayor contexto.
  Un ejemplo sería:

  Escribe una función en Python que reciba dos listas y las concatene, el resultado tendrá una longitud igual a la suma de ambas, usa como base la siguiente linea de código:
  `def concatenar_listas(lista1, lista2):`

Estos prompts no solo permiten generar código, sino que actúan como catalizadores para el diseño automático de propiedades, lo cual representa una innovación clave de esta herramienta. Para tener mayor entendimiento del mismo, se llevó a cabo una prueba de Prompt con el ejemplo:

Crear un script en Python para analizar archivos CSV y extraer los nombres y correos electrónicos con los siguientes requisitos:

- *El script debe ser capaz de leer archivos CSV grandes y manejarlos de manera eficiente.*
- *Debe extraer los nombres y correos electrónicos de las columnas específicas en el archivo CSV.*
- *La salida debe estar en formato JSON para facilitar su uso en otros programas.*
- *Haz un ejemplo de una ejecución y muestra el JSON resultante.*

Con el estudio de los resultados se tomaron puntos de relevancia, los cuales se muestran en la tabla.

Tabla 2. Comparativa de modelos LLMs (Raúl et al., 2024)

Criterio	Mistral Large	GPT-4	Gemini Pro
¿Explica cómo lo implementa o el funcionamiento?	Sí	Sí	Sí
¿Genera código sencillo?	Sí	Sí	Sí
¿El JSON de la salida es correcto?	Sí	No	Sí
¿Muestra un ejemplo de ejecución?	Sí	Sí	Sí
¿Ejecuta correctamente?	No, falta de generación de datos	No, inventa datos	No, ha sido necesario modificar datos
¿Lenguaje sencillo?	Sí	Sí	Sí
¿Es veráz la información?	Sí	Sí	Sí, bajo contexto
¿Libre uso (coste)?	Sí	No, uso limitado	No
Total	**7/8**	**5/8**	**6/8**

Considerando lo anterior, dentro de esta plataforma y con los datos de rendimiento obtenidos, se definieron los actores clave para la interacción con la API, estableciendo los roles y responsabilidades dentro del proceso de prueba automatizada:

- Sistema: Actúa como el orquestador principal, siendo el asistente para el desarrollo de software que utiliza una librería de Python para la ejecución de pruebas basadas en propiedades. El Sistema es responsable de enviar los prompts a la API y procesar las respuestas.
- Usuario: Es quien proporciona el prompt inicial que será evaluado por la API del LLM. Este prompt guía la generación o modificación de código y la posible sugerencia de propiedades de prueba.
- Asistente : Representa el modelo de lenguaje (inicialmente Mistral Large) que recibe el prompt y realiza las modificaciones solicitadas y genera comentarios relevantes en relación al código

Con estos parámetros definidos y a través de la experimentación con distintos Prompts, se optó por el uso de Mistral Large para la generación de código y la asistencia en la definición de propiedades de prueba en las etapas iniciales de desarrollo de nuestra herramienta. Esta decisión se fundamentó en su capacidad demostrada para un mejor entendimiento del código Python, el lenguaje principal de nuestra librería de pruebas basadas en propiedades, así como en su sólida comprensión del lenguaje natural utilizado en los prompts, lo que facilitó la obtención de respuestas más precisas y útiles para nuestro objetivo.

3.1 Contribución al Desarrollo de Software

MistralHypothesis representa un aliado al permitir que las potentes capacidades de las pruebas basadas en propiedades (PBT) sean accesibles a un espectro más amplio de desarrolladores, incluso aquellos con menor experiencia en pruebas formales. Su integración con Visual Studio Code permite al usuario su uso dentro del entorno de desarrollo, promoviendo una cultura de calidad proactiva desde las etapas iniciales del proyecto. Al demostrar la capacidad de los LLMs para trascender la generación de código y asistir activamente en su verificación, MistralHypothesis establece una nueva forma de colaboración entre los modelos de lenguaje de gran tamaño y la generación de código . Esta colaboración permite la creación de software más confiable y fácilmente mantenible, al tiempo que reduce la carga manual de la creación de pruebas y fomenta la adopción de prácticas de calidad robustas en todo el ciclo de vida del desarrollo.

4. CONCLUSIONES

La propuesta de combinar la capacidad generativa de un LLM como Mistral Large con el rigor de la verificación de Hypothesis dentro de un entorno familiar como Visual Studio Code sienta las bases para una herramienta innovadora que democratiza la adopción de pruebas robustas. MistralHypothesis podría transformar el flujo de trabajo de los desarrolladores, permitiendo incluso a aquellos con menor experiencia en pruebas formales integrar PBT de manera accesible y eficiente. Al automatizar la generación de implementaciones a partir de "prompts-código" y proporcionar un marco para su verificación sistemática, se establece una nueva forma de colaboración entre humanos y modelos inteligentes. Si bien persisten desafíos en la creación de prompts que guíen a los LLMs hacia código útil y en la definición de propiedades que capturen la esencia del comportamiento esperado, el potencial para garantizar software más confiable, mantenible y con una cultura de calidad integrada desde el inicio es significativo.

REFERENCIAS

Baresi, L. and Pezzè, M. (2006). An introduction to software testing. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 148(1), 89–111.

Brown, T.B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., Askell, A., et al. (2020). Language models are few-shot learners. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 1877–1901.

Dohmke, T. (2024). Introducing github models: A new generation of ai engineers building on github. Https://github.blog/news-insights/product-news/introducing-github-models/, consultado el 11 de abril de 2025.

Fink, G. and Bishop, M. (1997). Property-based testing: A new approach to testing for assurance. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 22(4), 74–80.

Higginbotham, G.Z. and Matthews, N.S. (2024). Prompting and in-context learning: Optimizing prompts for mistral large.

Liu, P., Yuan, W., Fu, J., Jiang, Z., Hayashi, H., and Neubig, G. (2023). Pre-train, prompt, and predict: A systematic survey of prompting methods in natural language processing. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 55(3), 1–35.

MacIver, D. (2018). Hypothesis: A powerful, flexible, and easy to use library for property-based testing. Available at: https://hypothesis.works.

Raúl, Tomás, and María, J. (2024). Versus: openai gpt-4 vs. google gemini pro vs. mistral ai large. Https://www.paradigmadigital.com/dev/versus-openai-gpt4-google-gemini-pro-mistral-ai-large/, consultado el 11 de abril de 2025.

Team, M.I. (2024). Au large. Https://mistral.ai/news/mistral-large.

Yu, Z., Zhao, Y., Cohan, A., and Zhang, X.P. (2024). Humaneval pro and mbpp pro: Evaluating large language models on self-invoking code generation. *arXiv preprint arXiv:2412.21199*.

Zheng, Q., Xia, X., Zou, X., Dong, Y., Wang, S., Xue, Y., Shen, L., Wang, Z., Wang, A., Li, Y., et al. (2023). Codegeex: A pre-trained model for code generation with multilingual benchmarking on humaneval-x. In *Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 5673–5684.

Deep Learning Models to Detect Cervical Cancer in Cells Images: A Literature Review

García García, Luis Rodolfo, Hernández Pérez, María Yasmín, Ortiz Hernández, Javier

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México, 62490.*
(e-mail: d24ce110@cenidet.tecnm.mx, yasmin.hp@cenidet.tecnm.mx, javier.oh@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: Cervical cancer is a public health problem that affects thousands of women in Mexico and around the world. Timely diagnosis is essential to receive medical treatment and avoid future injury or even death. Artificial intelligence, particularly deep learning models, has advanced the analysis of cells images for timely and accurate cancer detection. This study presents a review of deep learning models in forty articles to contribute to the study of this topic. The techniques that were applied for preprocessing, single and overlapping segmentation in Pap smear cell images, feature extraction and classification. Convolutional Neural Network (CNN) models are the most widely used for cancer detection, along with the SIPaKMeD dataset. Articles were searched in Mendeley, IEEE Xplorer, Google Scholar, PubMed, ResearchGate, and ScienceDirect databases.

Keywords: cervical cancer, pap smear cells images, deep learning, classification.

1. INTRODUCCIÓN

El cáncer es una de las principales causas de mortalidad en el mundo. Entre los más comunes y que más afecta a la mujer es el cáncer cérvico uterino. La Organización Mundial de la Salud (OMS) reportó que en el año 2022 se presentaron 604,127 casos de cáncer cérvico uterino en 185 países causando la muerte a 341,831 mujeres *(Singh, et al., 2023)*. En México, el Centro Nacional de Equidad de Género y Salud Reproductiva (CNEGSR), publicó el año 2023 que el cáncer cérvico o de cuello uterino es la segunda causa de muerte por cáncer y cada año mueren más de 4,000 mujeres mayores de 25 años *(CNEGSR, 2024)*. El cáncer es una enfermedad curable si se detecta a tiempo. El diagnóstico oportuno es imprescindible para reducir la severidad y su avance. Los sistemas para detección de cáncer cérvico uterino son necesarios para minimizar la mortalidad de esta enfermedad *(Wubineh, et al., 2024)*. Las células cervicales se analizan a través de un microscopio por parte del citólogo, sin embargo, la interpretación visual es subjetiva y consume mucho tiempo debido a que se analizan y clasifican cientos o miles de células *(Allehaibi, et al., 2019)*. El problema computacional para detectar cáncer cérvico uterino mediante el análisis de imágenes celulares ha sido estudiado y se han propuesto diversas soluciones para automatizar el proceso y ayudar al citólogo en la detección oportuna de cáncer. Los algoritmos de visión artificial y Aprendizaje Profundo (Deep Learning), han ayudado a los médicos especialistas en su labor de detectar oportunamente el cáncer en imágenes que contienen miles de células y que oscilan entre 50,000 a 300,000 *(Plissiti & Nikou, 2013)*, como se muestra en las imágenes de la Figura 1 y Figura 2.

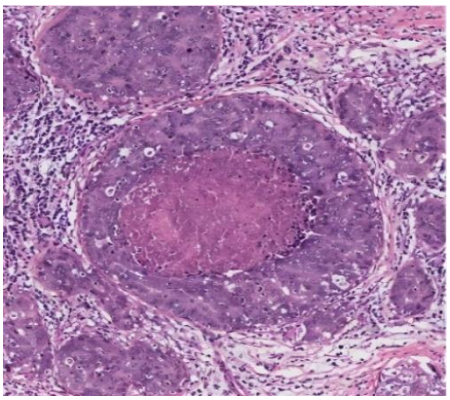


Figura 1. Imagen de Papanicolaou, (Plissiti & Nikou, 2013).

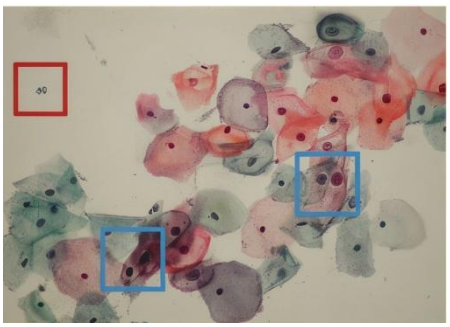


Figura 2. Imagen celular de papanicolaou, cuadro azul células sobrepuestas, cuadro rojo moco o sangre, (Plissiti & Nikou, 2013).

1.1 Marco Teórico

Los modelos de Aprendizaje Profundo son redes que se basan en el principio de las redes neuronales, las cuales están compuestas por neuronas en diferentes capas. La ecuación de una neurona es, $a = f(wp + b)$, como se muestra en la Figura 3, donde p, representa la entrada y a, la salida, w, representa el peso y b, el sesgo de la ecuación, la función de transferencia que se aplica, puede ser hard limit, Linear, Log-Sigmoid, entre otras (Hagan, et al., 2014).

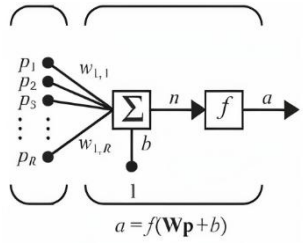


Figura 3. Red Neuronal de una Neurona, (Hagan, et al., 2014).

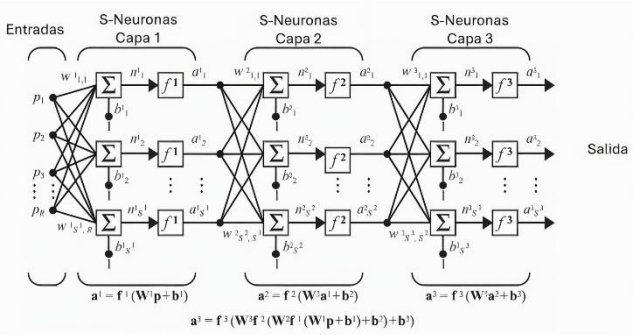


Figura 4. Red Neuronal de S Neuronas y 3 Capas, (Hagan, et al., 2014).

En la imagen de la Figura 4, se muestra una red profunda con 3 capas de neuronas, con un vector de entrada, **P**= [$p1$, $p2$, $p3$, …, pR]. La salida de la primera capa, $a_1^1, a_2^1, \ldots, a_s^1$, es la entrada a la segunda capa cuya salida es $a_1^2, a_2^2, \ldots, a_s^2$. Esta, a su vez, alimenta a la última capa en donde se realiza el proceso de clasificación. Este modelo es una arquitectura completamente conectada FC (full connected), donde cada entrada se conecta a cada neurona de la primera capa. Los pesos y el sesgo son valores que se van ajustando durante el entrenamiento de la red neuronal. Cuando la entrada es una imagen, los valores p representan un pixel, si la imagen tiene una buena resolución por ejemplo de 1024x1024 el número de entradas sería de 1,048,576, lo que resulta en una carga computacional de memoria y procesamiento muy alta, para lograr una mejor optimización de recursos computacionales, lo que se requiere son pocas entradas y que cada entrada pueda tener suficiente información para detectar cáncer de manera rápida y precisa. Las redes CNN (Convolutional Neural Networks) permiten optimizar el vector de entrada a través de diferentes capas que reducen la dimensionalidad, como se muestra en la imagen de la Figura 5. Las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) son arquitecturas profundas diseñadas para llevar a cabo procesos de segmentación, detección y clasificación de objetos. Estas redes se componen de varias etapas: etapa de convolución, etapa de agrupamiento (Max polling) y etapa completamente conectada (FC). Las redes CNN se centran en extraer atributos básicos: líneas, colores y bordes. A medida que el proceso de convolución recorre la imagen a través de las diferentes capas de la CNN, se comienzan a reconocer formas más complejas del objeto, hasta que finalmente se logra identificar el mismo y clasificarlo por medio de la red totalmente conectada, la cual tiene como entrada un vector con las características obtenidas en las capas convolucionales.

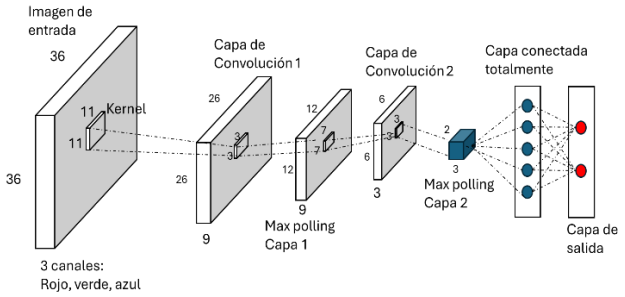


Figura 5. Arquitectura de Red CNN.

2. METODOLOGÍA

La búsqueda de artículos se realizó con base a la cadena de texto: "Images of cervical cancer cells" and "deep learning" and "classification", obtenida al aplicar la metodología PICO. La búsqueda se realizó en las bases de datos: Mendeley, IEEE Xplorer, Google Scholar, PubMed, ResearchGate y ScienceDirect. Para identificar artículos relevantes, se planteó la siguiente cadena de texto:

- *Population: Images of cervical cancer cells*
- *Intervention: Deep Learning*
- *Comparing: --*
- *Outcome: Classification*

2.1 Criterios de búsqueda

- En un rango de fecha (año 2019 al 2025).
- Artículos en idioma inglés.
- Artículos publicados.
- Artículos citados más de una vez, solo en el caso de ResearchGate.

Conforme al marco PRISMA 2020 (Page, et al., 2021), se filtraron los artículos con base a los criterios de búsqueda y exclusión. Se obtuvieron un total de 270 artículos como se presenta en el diagrama de flujo PRISMA 2020 que se muestra en la Figura 6. En donde se desglosan los artículos identificados, removidos, filtrados, recuperados y seleccionados. En total se encontraron 3,698 artículos, de los cuales se excluyeron 3,428: 3,093 fueron excluidos de la base de datos ResearchGate por tener solo una cita. También se excluyeron 217 artículos que se referían al estudio de otro tipo de cáncer, (mama, pulmón, hígado, piel, entre otros). Después de este proceso se excluyeron 118 artículos que contenían cáncer cervical en su resumen y Aprendizaje Profundo, pero, trataban con imágenes de colposcopía y no con imágenes celulares de pruebas de Papanicolaou. Finalmente, como se mencionó antes fueron seleccionados 270 artículos que tienen que ver con el análisis de imágenes celulares y Aprendizaje Profundo para detección y clasificación de cáncer. De estos

artículos se analizaron 40 por su relevancia, debido a que cubren los procesos de detección y clasificación de cáncer, desde el procesamiento de las imágenes, segmentación de células sobrepuestas e individuales, extracción de características, entrenamiento de redes de Aprendizaje Profundo y pruebas para la detección y clasificación.

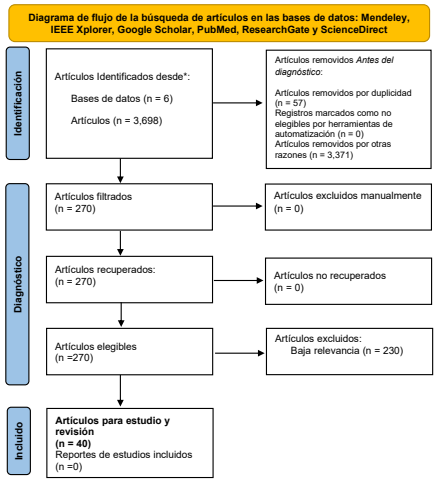


Figura 6. Diagrama de flujo PRISMA 2020, (Page, et al., 2021).

2.2 Revisión de artículos

La revisión se agrupa en los siguientes temas: adquisición de imágenes, preprocesamiento, segmentación y clasificación.

2.2.1 Adquisición de imágenes

El conjunto de datos SIPaKMeD es el más utilizado para la detección y clasificación de células con cáncer, el cual contiene 4,049 imágenes de una sola célula y multicélula, también se utilizaron otros conjuntos de datos como el Herlev el cual contienen 917 imágenes de una sola célula. El ISBI 2014 y 2015 con 961 imágenes multicélula, el CERVIX93 con 93 imágenes multicélula. CRIC (Center for Recognition and Inspection of Cells) con 400 imágenes multicélula. APACS23 (Annotated PAp smear images for Cell Segmentation 2023) contiene 37,000 imágenes, y otros conjuntos públicos como el CCEDD (Cervical Cell Edge Detection Dataset) con 686 imágenes y el cx22 con 1,320 multicélulas mencionados en (Harangi, et al., 2024). Algunos artículos indican que produjeron sus propios conjuntos de imágenes, para entrenamiento y prueba.

2.2.2 Preprocesamiento

El procesamiento de la imagen se realiza para mejorar la imagen, con el objetivo de obtener una alta precisión en la segmentación y clasificación de las células. Esta etapa incluye la reducción del ruido debido a factores de luminosidad, mecánicas etc., por ejemplo, el ruido Poisson, Gaussiano, entre otros. También incluye el mejoramiento de la imagen, debido al bajo contraste que se puede presentar en las imágenes celulares. El objetivo de esta etapa es que la célula pueda segmentarse delineando correctamente el citoplasma y el núcleo. Por ejemplo, en (Win, et al., 2020), aplican el filtro de mediana para reducir el ruido y CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) para mejorar la imagen. En (Sentürk & Uzun, 2022), aplican el filtro de mediana para mejorar la imagen antes de realizar el entrenamiento con redes preentrenadas. En (Merlina, et al., 2023), propusieron un modelo Polynomial Contrast Enhancement (PCE) como método de preprocesamiento para mejorar la detección de bordes en células sobrepuestas. En (Nazir, et al., 2023), ajustan el tamaño de las imágenes y posteriormente segmentan con Aprendizaje Profundo U-Net para identificar el citoplasma y núcleo en imágenes con ruido. En (Zhao, et al., 2022), resaltan los bordes de las células con el operador Canny y morfología para extraer información y mejorar la segmentación de núcleos en imágenes celulares. En general todos realizan preprocesamiento a la imagen antes de iniciar las etapas de segmentación y clasificación.

2.2.3 Segmentación

El objetivo de la segmentación es extraer la célula (citoplasma y núcleo) para posteriormente obtener sus características. En (Allehaibi, et al., 2019), emplean la red MASK R CNN para segmentar la célula completa (citoplasma y núcleo) de imágenes con células sobrepuestas e individuales y determinar las máscaras automáticamente para cada imagen. En (Hussain, et al., 2020), diseñaron un modelo de representación de forma basado en autoencoders para la segmentación del núcleo. En (Bandyopadhyay & Nasipuri, 2020), propusieron K-Means para agrupar características y el algoritmo Watershed para segmentar células sobrepuestas. En (Chowdary & Yogarajah, 2023), utilizan el modelo de Red Neuronal Residual SE-UNet para segmentar núcleos de las células, concatenando sus características para clasificar imágenes. En (R & A, 2019), aplicaron el algoritmo Fuzzy C-Means para segmentar células sobrepuestas además utilizaron características de color RGB (Red, Green, Blue) y textura de los núcleos sobrepuestos.

2.2.4 Clasificación

La clasificación es la última etapa en el proceso de detección de células con cáncer. Durante el proceso de clasificación, se lleva a cabo la extracción de características, es decir, se obtiene la información más representativa de la imagen. Esta información se utiliza para clasificar la célula según el sistema de clasificación establecido. En (Fang, et al., 2022), proponen CNN extrayendo características a través de múltiples kernels con diferentes tamaños, lograron una precisión del 95.6%. En (Chen, et al., 2020), utilizan ensemble que combina múltiples modelos preentrenados mediante transferencia de aprendizaje (ResNet, DenseNet, etc.). Ajustaron los hiperparámetros y aplicaron técnicas de aumento de datos, obtuvieron una precisión del 97.8%. En (Khanarsa & Kitsiranuwat, 2024), usan CNN para extracción de características y Random Forest y Support Vector Machine (SVM) para clasificación, también ajustaron hiperparámetros, obtuvieron una precisión del 95%. En (Nour, et al., 2024), combinan la red neuronal MobileNetv3 para extracción de características y Stacked Extreme Learning Machine (SELM) para clasificación, utilizaron el algoritmo de optimización Gazelle (GOA) para ajustar hiperparámetros, obtuvieron una precisión del 98.5%. En (Maurya, et al., 2024), combinan las características extraídas de Machine Learning y la red CNN MobileNetV1, realizan reducción de dimensiones

y realizan la clasificación con el algoritmo SVM, ajustan hiperparámetros usando Particle Swarm Optimization (PSO) logran una precisión del 97.8%. En (Ahishakiye & Kanobe, 2024), proponen dos modelos uno con Deep Gaussian Process (DGP) con kernel hibrido, el segundo con Support Vector Machine (SVM) y una función de kernel optimizado, logran una precisión del 100% con el modelo SVM. En (Sentürk & Uzun, 2022), usan cinco redes preentrenadas: SqueezeNet, VGG-19, AlexNet, ResNet-50 e InceptionV3 para la clasificación. SqueezeNet logró una precisión de 96.9%.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

En la Tabla 1 y Tabla 2, se presentan los 40 artículos; conjunto de datos y algoritmo que usaron, así como, la precisión que lograron en la detección de cáncer. Muchos de los trabajos utilizan las redes CNN y la técnica de aprendizaje por transferencia como en (Mulmule & Kanphade, 2022), (Ahishakiye & Kanobe, 2024), (Wang, et al., 2020), (Bhatt, et al., 2021), (Ahmed, et al., 2024), lo cual mejora la precisión (reducir falsos negativos), debido a que usan los pesos *w* de redes preentrenadas. De esta manera se mitiga la falta de conjuntos de imágenes. Algunos autores aumentan las imágenes rotándolas a diferentes grados, con el objetivo de reducir el desbalanceo del conjunto de datos como en (Desiani, et al., 2024), (Wubineh, et al., 2024), (Alsalatie, et al., 2023) y lograr que el modelo clasifique correctamente. Otros autores han utilizado diferentes redes preentrenadas para obtener diferentes características, las cuales suman para obtener un vector de entrada con mayor información como en (Khanarsa & Kitsiranuwat, 2024), (Chen, et al., 2020), (Win, et al., 2020), (Nour, et al., 2024), (Khozaimi & Mahmudy, 2024), (Alzahrani, et al., 2024) y (Harangi, et al., 2024), el objetivo es obtener la información sustancial de la célula, para posteriormente reducir la dimensionalidad, esta estrategia en algunos casos mejora la precisión en la clasificación. En resumen, las redes CNN obtienen altas precisiones, sin embargo, aún son vistas como **"cajas negras"** (Yang, et al., 2023), debido a que no se visualiza porqué el algoritmo determinó que esa célula tiene cáncer y más aun no hay trazabilidad de esa característica de la célula en una imagen multicelular.

Tabla 1. Resumen de artículos de Preprocesamiento y Segmentación.

No.	Artículo	Conjunto de datos	Aprendizaje Profundo (Deep Learning)	Precisión
1	(Zhou, et al., 2019)	CPS (Cervical Pap Smear)	IRNet (Instance Relation Network)	92%
2	(Hussain, et al., 2020)	Herlev	FCNN (Fully Convolutional Neural Networks)	98.8%
3	(R & A, 2019)	ISBI2014 ISBI2015	Fuzzy C-Means Clustering	--
4	(Bandyopadhyay & Nasipuri, 2020)	Herlev	K-Means y Watershed	--
5	(Zhao, et al., 2021)	SIPaKMeD Herlev	SEENS (Selective Edge Enhancement-based) Nuclei Segmentation	92%
6	(Chen & Zhang, 2021)	ISBI 2014 ISBI 2015	Mask R-CNN	92%
7	(Zhao, et al., 2022)	Herlev	Star-Convex Polygons, Deep Learning	99.6%
8	(Nazir, et al., 2023)	110 imágenes	U-Net	Dice: 0.92
9	(Wita, 2023)	6139 imágenes	U-Net + MobileNetV2 Encoder	98%

Tabla 2. Resumen de artículos de Preprocesamiento, Segmentación y Clasificación.

No.	Artículo	Conjunto de datos	Aprendizaje Profundo (Deep Learning)	Precisión
10	(Desiani, et al., 2024)	184 imágenes	U-Net CNN	93.75%
11	(Allehaibi, et al., 2019)	Herlev	MASK R-CNN, VGG-like	96%
12	(Chen, et al., 2020)	SIPaKMeD	Snapshot Ensemble	97.8%
13	(Win, et al., 2020)	SIPaKMeD y Herlev	Random Forest+ Bagging Ensamble Classifier	98.27%
14	(Wang, et al., 2021)	143 imágenes	Deep Learning	93%
15	(Bhatt, et al., 2021)	SIPaKMeD	ConvNet, Transfer Learning, Progressive Resizing	99.7%
16	(Benhari & Hossseini,	SIPaKMeD	IFDL (Improved Fuzzy Deep Learning)	94%
17	(Mulmule & Kanphade, 2022)	CERVIX93	AlexNet, ImageNet, Places365	99.03%
18	(Sentürk & Uzun, 2022)	SIPaKMeD	Transfer Learning (SqueezeNet, VGG-19, AlexNet, ResNet-50, InceptionV3)	96.9%
19	(Fang, et al., 2022)	SIPaKMeD	Deep Neural Network (DNN)	96.5%
20	(Alsalatie, et al., 2023)	Herlev	Ensemble Deep Learning (CNN, Voting Classifier)	99.6%
21	(Wang, et al., 2020)	389 imágenes	PsiNet-TAP	98%
22	(Altun & Talu, 2022)	Generan DataSet	GAN	FID: 12.5
23	(Rutili de Lima, et al., 2023)	SIPaKMeD	Mask R-CNN	F1-Score (3 y 5 clases):
24	(Chowdary & Yogarajah, 2023)	SIPaKMeD Herlev	Residual SE-UNet y Multi-layer Perceptron (MLP)	95%
25	(Merlina, et al., 2023)	797 imágenes	Polynomial Contrast Enhancement PCE- filtros Robert y Prewitt	86.8%
26	(Khanarsa & Kitsiranuwat, 2024)	SIPaKMeD	Ensemble Learning (CNN + Random Forest + SVM)	95%
27	(Nour, et al., 2024)	Herlev	Gazelle Optimization Algorithm (GOA), MobileNetv3 y Stacked Extreme Learning Machine	98.5%
28	(Maurya, et al., 2024)	SIPaKMeD	SVM, Particle Swarm Optimization (PSO)	97.8%
29	(Joynab, et al., 2024)	SIPaKMeD	Federated Learning CNN	94.36%
30	(Ahishakiye & Kanobe, 2024)	963 imágenes	Deep Gaussian Processes (DGP), Support Vector Machines (SVM)	(SVM): 100%;
31	(Khozaimi & Mahmudy, 2024)	SIPaKMeD	ResNet-18, ResNet-34, VGG-16	72.8%
32	(Ahmed, et al., 2024)	SIPaKMeD	Multi-Deep Transfer Learning, Smoothing Cross Entropy	98.9%
33	(Ando, et al., 2024)	CRIC	Deep Learning, Interpretable AI	95%
34	(Alzahrani, et al., 2024)	SIPaKMeD	Vision Transformer (ViT), Ensemble Learning	97.54%

No.	Artículo	Conjunto de datos	Aprendizaje Profundo (Deep Learning)	Precisión
35	(Muksimova, et al., 2024)	Herlev SIPaKMeD	EfficientNetV2, Vision Transformers y Reinforcement Learning (RL)	99.97%
36	(Alohali, et al., 2024)	SIPaKMeD	Swin Transformer, Genetic Algorithm (GA), Random Forest (RF)	99.01%
37	(Harangi, et al., 2024)	APACS23	Fully Convolutional Networks (FCN-8, FCN-16, FCN-32), Ensemble	97.76%
38	(Wubineh, et al., 2024)	419 imágenes SIPaKMeD	RES_DCGAN, ResNet50V2 Self-Attention	98%
39	(Bhavsar & Shrimali, 2025)	Herlev	ResNet50V2, ResNet101, DenseNet121, DenseNet169, XceptionNet e InceptionResNetV2	98%
40	(Li, et al., 2024)	SIPaKMeD	CNN+ ViT	98.02%

4. CONCLUSIONES

En este estudio se presentó una revisión de 40 artículos con modelos de Aprendizaje Profundo, para la detección y clasificación de cáncer cérvico uterino. Las redes EfficientNetV2, Vision Transformers, así como, Deep Gaussian Processes (DGP) y Support Vector Machines (SVM) lograron la mayor precisión y esto se debe a que combinan modelos para extraer más y mejores características. Por otro lado, la falta de conjuntos de imágenes públicos y etiquetados son fundamentales para continuar con estas investigaciones. El avance en las técnicas de Aprendizaje por Transferencia ha permitido avanzar en estas investigaciones a pesar de la falta de conjuntos. Finalmente, la reducción del ruido y mejorar la imagen en la etapa de preprocesamiento son vitales para mejorar la precisión en la detección y clasificación de cáncer.

REFERENCIAS

Ahishakiye, E. & Kanobe, F., 2024. Optimizing cervical cancer classification using transfer learning with deep gaussian processes and support vector machines. *Discover Artificial Intelligence,* 4(1), p. 73.

Ahmed, R. et al., 2024. Early Detection and Categorization of Cervical Cancer Cells Using Smoothing Cross Entropy-Based Multi-Deep Transfer Learning. *IEEE Access.*

Allehaibi, K. H. S. et al., 2019. Segmentation and Classification of Cervical Cells Using Deep Learning. *IEEE Access,* Volume 7, pp. 116925-116941.

Alohali, M. A. et al., 2024. Swin-GA-RF: genetic algorithm-based Swin Transformer and random forest for enhancing cervical cancer classification. *Frontiers in Oncology,* Volume 14, p. 1392301.

Alrajjal, P. V., Choudhury, M., MYA, K. & VB, S., 2021. Squamous intraepithelial lesions (SIL: LSIL, HSIL, ASCUS, ASC-H, LSIL-H) of Uterine Cervix and Bethesda System. *Cytojournal. 2021 Jul 17;18:16. doi: 10.25259,* 2021(1).

Alsalatie, M. et al., 2023. A new weighted deep learning feature using particle swarm and ant lion optimization for cervical cancer diagnosis on pap smear images. *Diagnostics,* 13(17), p. 2762.

Altun, S. & Talu, M. F., 2022. A new approach for Pap-Smear image generation with generative adversarial networks. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University,* 37(3), pp. 1401--1410.

Alzahrani, M., Khan, U. & Al-Garni, S., 2024. Ensemble and Transformer Encoder-based Models for the Cervical Cancer Classification Using Pap-smear Images. *Journal of Electrical Systems,* Volumen 20, pp. 1637-1646.

Ando, Y. et al., 2024. Toward Interpretable Cell Image Representation and Abnormality Scoring for Cervical Cancer Screening Using Pap Smears. *Bioengineering,* 11(6), p. 567.

Bandyopadhyay, H. & Nasipuri, M., 2020. Segmentation of pap smear images for cervical cancer detection. *2020 IEEE Calcutta Conference (CALCON),* pp. 30--33.

BD Inc., B., 2024. BD Inc., BD. *https://www.bd.com/.*

Benhari, M. & Hossseini, R., 2022. An Improved Fuzzy Deep Learning (IFDL) model for managing uncertainty in classification of pap-smear cell images. *Intelligent Systems with Applications,* Volumen 16, p. 200133.

Bhatt, A. R., Ganatra, A. & Kotecha, K., 2021. Cervical cancer detection in pap smear whole slide images using convnet with transfer learning and progressive resizing. *PeerJ Computer Science,* Volumen 7, p. e348.

Bhavsar, B. & Shrimali, B., 2025. TransPapCanCervix: An Enhanced Transfer Learning-Based Ensemble Model for Cervical Cancer Classification. *Computational Intelligence.*

Cesari, M. I. & Espartaro, V., 2022. Uso del software ImageJ en análisis de imágenes médicas.

Chen, J. & Zhang, B., 2021. Segmentation of overlapping cervical cells with mask region convolutional neural network. *Computational and Mathematical Methods in Medicine,* 2021(1), p. 3890988.

Chen, W., Li, X., Gao, L. & Shen, W., 2020. Improving computer-aided cervical cells classification using transfer learning based snapshot ensemble. *Applied Sciences,* 10(20), p. 7292.

Chen, Z.-H.et al., 2021. Artificial intelligence for assisting cancer diagnosis and treatment in the era of precision medicine. *Cancer communications (London, England),* p. 1100–1115.

Chowdary, G. J. & Yogarajah, P., 2023. Nucleus segmentation and classification using residual SE-UNet and feature concatenation approach incervical cytopathology cell images. *Technology in Cancer Research \& Treatment,* Volumen 22, p. 15330338221134833.

CNEGSR, 2024. Mes de la Sensibilización sobre Cáncer de Cuello Uterino (CCU). *Centro Nacional de Equidad de Género y Salud Reproductiva 01 de agosto de 2024, url= https://www.gob.mx/salud.*

Desiani, A. et al., 2024. Simple Data Augmentation and U-Net CNN for Neclui Binary Segmentation on Pap Smear Images. *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics,* Volume 12, pp. 264--275.

Fang, M., Lei, X., Liao, B. & Wu, F.-X., 2022. A deep neural network for cervical cell classification based on cytology images. *IEEe Access,* Volumen 10, pp. 130968--130980.

Hagan, M. T., Demuth, H. B., Beale, M. H. & Jesús., O. D., 2014. *Neural Network Design.* 2nd ed. Oklahoma: Martin Hagan.

Harangi, B. et al., 2024. Pixel-wise segmentation of cells in digitized Pap smear images. *Scientific Data,* 11(1), p. 733.

Heinze, G. et al., 2018. Los médicos especialistas en México. *Gaceta Médica de México,* Volume 2018, p. 351.

Hussain, E. et al., 2020. A shape context fully convolutional neural network for segmentation and classification of cervical nuclei in Pap smear images. *Artificial Intelligence in Medicine,* Volume 107, p. 101897.

Joynab, N. S. et al., 2024. A federated learning aided system for classifying cervical cancer using pap-smear images. *Informatics in Medicine Unlocked,* Volume 47, p. 101496.

Khanarsa, P. & Kitsiranuwat, S., 2024. Deep learning-based ensemble approach for conventional pap smear image classification. *ECTI Transactions on Computer and Information Technology (ECTI-CIT),* 18(1), pp. 101--111.

Khozaimi, A. & Mahmudy, W. F., 2024. New Insight in Cervical Cancer Diagnosis Using Convolution Neural Network Architecture. *arXiv.*

Li, M. et al., 2024. Vtcnet: A Feature Fusion DL Model Based On CNN and ViT for the classification of cervical cells. *International Journal of Imaging Systems and Technology,* 34(5), p. e23161.

Mango, L. J., 1996. Neuromedical Systems, Inc.. *Karger, Acta Cytologica,* Volume 40, pp. 53--59.

Maurya, R., Rajput, L. & Mahapatra, S., 2024. Deep and Domain Specific Feature-Based Cervical Cancer Classification Using Support Vector Machine Optimized with Particle Swarm Optimization. *IEEE Access.*

Merlina, N. et al., 2023. Optimization of the preprocessing method for edge detection on overlapping cells at Pap smear images. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization,* 7(2), pp. 471--476.

Muksimova, S. et al., 2024. Novelty Classification Model Use in Reinforcement Learning for Cervical Cancer. *Cancers,* 16(22), p. 3782.

Mulmule, P. & Kanphade, R., 2022. Classification of Cervical Cytology Overlapping Cell Images with Transfer Learning Architectures. *Biomedical and Pharmacology Journal,* Volumen 15, pp. 277-284.

Nazir, N., Sarwar, A. & Saini, B. S., 2023. A Robust Deep Learning Approach for Accurate Segmentation of Cytoplasm and Nucleus in Noisy Pap Smear Images. *Computation,* Volumen 11, p. 195.

Nour, M. K. et al., 2024. Computer aided cervical cancer diagnosis using gazelle optimization algorithm with deep learning model. *IEEE Access,* Volume 12, pp. 13046--13054.

Omodunbi, B. A. et al., 2024. Detection of Cervical Cancer Using Deep Transfer Learning.

Page, M. J. et al., 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ (Clinical research ed.),* pp. 372, n71.

Plissiti, M. & Nikou, C., 2013. A Review of Automated Techniques for Cervical Cell Image Analysis and Classification. *Springer Science+Business Media Dordrecht 2013,* Volumen 4, pp. 1-18.

Rahaman, M. M. et al., 2021. DeepCervix: A deep learning-based framework for the classification of cervical cells using hybrid deep feature fusion techniques. *Computers in Biology and Medicine,* Volume 136, p. 104649.

R, P. & A, P., 2019. Cervical Cell Segmentation from Overlapped Cells using Fuzzy C-Means Clustering. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE),* Volume 8, pp. 3401-3404.

Rutili de Lima, C., Khan, S., Shah, S. & Ferri, L., 2023. Mask Region-based CNNs for Cervical Cancer Progression Diagnosis on Pap Smear Examinations. *Heliyon,* Volumen 9, p. e21388.

Sentürk, Z. K. & Uzun, S., 2022. An improved deep learning based cervical cancer detection using a median filter based preprocessing. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi,* Issue 32, pp. 50--58.

Singh, D. et al., 2023. Global estimates of incidence and mortality of cervical cancer in 2020: a baseline analysis of the WHO Global Cervical Cancer Elimination Initiative. *The lancet global health,* 11(2), pp. e197--e206.

Wang, C.-W.et al., 2021. Artificial intelligence-assisted fast screening cervical high grade squamous intraepithelial lesion and squamous cell carcinoma diagnosis and treatment planning. *Scientific Reports,* 11(1), p. 16244.

Wang, P. et al., 2020. Adaptive pruning of transfer learned deep convolutional neural network for classification of cervical pap smear images. *IEEE Access,* Volume 8, pp. 50674--50683.

Win, K. P., Kitjaidure, Y., Hamamoto, K. & Myo Aung, T., 2020. Computer-assisted screening for cervical cancer using digital image processing of pap smear images. *Applied Sciences,* 10(5), p. 1800.

Wita, D. S., 2023. Image Segmentation of Normal Pap Smear Thinprep using U-Net with Mobilenetv2 Encoder. *Journal Medical Informatics Technology,* pp. 31--35.

Wubineh, B. Z., Rusiecki, A. & Halawa, K., 2024. Classification of cervical cells from the Pap smear image using the RES_DCGAN data augmentation and ResNet50V2 with self-attention architecture. *Neural Computing and Applications,* 36(34), pp. 21801--21815.

Yang, Y. et al., 2023. Advances in AI-based Cancer Cytopathology. *Interdisciplinary Medicine.*

Zhao, M. et al., 2021. SEENS: Nuclei segmentation in Pap smear images with selective edge enhancement. *Future Generation Computer System,* Volume 114, pp. 185-194.

Zhao, Y. et al., 2022. Automatic segmentation of cervical cells based on star-convex polygons in pap smear images. *Bioengineering,* 10(1), p. 47.

Zhou, Y. et al., 2019. IRNet: Instance Relation Network for Overlapping Cervical Cell Segmentation. *Springer International Publishing,* 1(1), pp. 640--648.

Multivariate temperature prediction using deep learning

Allan Mizael Jiménez Fernández*, Juan Javier González Barbosa*, Erika Alarcón Ruiz*, Juan Frausto Solís*, Mirna Patricia Ponce Flores*

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Ciudad Madero, Tamaulipas, México.*

**G15070895@cdmadero.tecnm.mx, jjgonzalezbarbosa@hotmail.com, erika.ar@cdmadero.tecnm.mx, juan.frausto@gmail.com, mirna.pf@cdmadero.tecnm.mx*

Abstract: Climate change is a phenomenon that affects planet Earth and living beings, due to this, different types of challenges arise when facing its mitigation. One of these challenges is predicting temperature. To perform temperature prediction, it is necessary to select a machine learning technique such as neural networks, multiple linear regression, or support vector machines, among others. This work focuses on neural networks for use in different climatological time series from four cities in Mexico (Tampico, Tijuana, Monterrey, and Guadalajara). The time series contain data on the behavior of variables such as humidity, dew point, wind speed, and pressure over 11 years (2012-2022). These variables affect the temperature, which will be taken as the dependent variable to be forecasted. The result is a multivariate model that normalizes time series data using min-max scaling. A temperature prediction is then performed using a recurrent neural network (RNN) such as a long-short-term memory (LSTM) based on multivariate analysis. The purpose of this work is to contribute to climate change mitigation and provide a multivariate model for various problems encountered in different research areas. The results show satisfactory model performance, achieving mean absolute percentage error (MAPE) of less than 5.4% in all cities analyzed, validating the multivariate approach and the use of LSTM for climatological applications.

Keywords: Climate change, Temperature, Prediction, Multivariate, Deep learning, RNN, LSTM, Normalization.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los fenómenos más críticos del siglo XXI, afectando tanto a los ecosistemas como a las actividades humanas en muchos ámbitos y que provoca cambios de temperatura extremos, estos cambios tan significativos iniciaron desde que los seres humanos lograron industrializar los distintos procesos que hoy en día movilizan al mundo. En particular, la temperatura es una variable clave en los estudios climáticos, dado que su comportamiento influye directamente en sectores como la agricultura, la energía, el transporte y la salud pública.

La predicción de la temperatura y de las variables que afectan el cambio climático es de suma importancia ya que son utilizadas en la vida del ser humano, tiene aplicación en el desarrollo de áreas como agricultura, transporte, energía, turismo, etc. Así como también permite generar programas de mitigación para enfrentar el problema del cambio climático y tener una idea clara de lo que serán las temperaturas en un futuro.

El desarrollo de modelos predictivos basados en inteligencia artificial ha mostrado resultados prometedores, especialmente en lo que se refiere a series temporales multivariables. Este trabajo presenta una propuesta de modelo basado en redes neuronales LSTM, entrenado con datos multivariables de cuatro ciudades mexicanas, con el objetivo de generar pronósticos precisos de temperatura.

1.1 Estado del arte y antecedentes

A través del tiempo, el estudio de la predicción de la temperatura ha avanzado a pasos agigantados en búsqueda de obtener mejores resultados y un menor error en su pronóstico debido a la importancia que esta predicción tiene en las diferentes áreas donde se utiliza esta información diariamente.

En los trabajos previos se han realizado diversas predicciones de datos climatológicos, cada una de estas predicciones con diferentes configuraciones. Se han utilizado distintos métodos tanto de aprendizaje automático como de aprendizaje profundo. También en la selección de variables, pueden cambiar la importancia de las variables independientes debido a la posición geográfica o a la estación del año. Además, se puede incluir un modelo multivariable donde se utilizan distintas variables independientes para predecir la variable dependiente o un modelo univariable el cual trabaja con una variable.

El trabajo que fue hecho por Roy (2020) en la ciudad de Nueva York es un ejemplo de como se puede utilizar el aprendizaje profundo en la predicción de la temperatura del aire. En el trabajo obtuvieron un MAPE que oscila entre 10.85% - 2.58%. Utilizó las siguientes técnicas: Multi-Layer Perceptron (MLP), Long Short Term Memory Network (LSTM) y una combinación de Convolutional Neural Network (CNN) y LSTM. Las variables utilizadas fueron el promedio de la velocidad del viento, la lluvia, la caída de nieve, profundidad

de la nieve, el promedio de la temperatura, la temperatura máxima y la temperatura mínima.

Oshodi (2022) realizó un trabajo en la ciudad de Seattle donde obtuvo un MAPE aproximado del 15%. El proyecto desarrolla una investigación sobre algoritmos basados en aprendizaje automático para la predicción meteorológica donde propuso un modelo de pronóstico meteorológico basado en aprendizaje automático. El modelo sugiere implementar cuatro algoritmos de clasificación el bosque aleatorio, el árbol de decisión, el modelo bayesiano naive gaussiano y el de aumento de gradiente.

El trabajo realizado por Appau. (2023) en 5 ciudades de China (Beijing, Shanghai, Guangzhou, Chengdu, y Shenyang) sirve como antecedente en el uso del aprendizaje profundo, donde obtuvieron un MSE de 8.62 hasta 24.20 dentro de las observaciones de las 5 ciudades antes mencionadas. En la experimentación utilizaron redes neuronales recurrentes con un regularizador Ridge durante la etapa de entrenamiento y un optimizador de hiperparámetros como lo es la optimización bayesiana para predecir la temperatura en 5 ciudades de China. Las variables utilizadas fueron la temperatura, el punto de rocío, la humedad relativa, la presión y la velocidad del viento.

1.2 Justificación y contribución del trabajo

Dado que los modelos para predecir la temperatura pueden ser diversos, en este trabajo se propone un modelo multivariable utilizando una red neuronal recurrente como lo es Long Short-term Memory (LSTM) donde las variables independientes a utilizar sean las que tengan mejor desempeño en la etapa de selección de variable y buscando una configuración adecuada para los hiperparámetros de la red neuronal.

Todo esto con la finalidad de obtener el mínimo de error de porcentaje absoluto medio llamado (MAPE) en la predicción de la temperatura.

2. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se hace uso del aprendizaje profundo mediante una red neuronal recurrente como lo es LSTM aplicando un modelo multivariable para predecir la temperatura. A continuación, se describe la metodología utilizada para desarrollar el modelo antes mencionado.

2.1 Series de tiempo

La base de datos utilizada en esta investigación son series de tiempo con datos climatológicos obtenidas en los sitios de internet weather underground (2023) y SINAICA (2023). Las series de tiempo describen el comportamiento de 5 variables climatológicas durante el periodo de enero del 2012 a diciembre del 2022 en las ciudades de Guadalajara, Monterrey, Tampico y Tijuana.

Tabla 1. Variables climatológicas

Variables
Temperatura
Punto de rocío
Humedad
Velocidad del viento
Presión

Todos los datos de las variables antes mencionadas fueron normalizados para facilitar el análisis e interpretación de la base de datos. El método de normalización utilizado es el de normalización Min-Max; mediante este método obtenemos un valor dentro del rango de 0 a 1 y su fórmula se describe como:

$$T\ normalizada = \frac{T\ promedio - T\ mínima}{T\ máxima - T\ mínima} \quad (1)$$

Donde: T es temperatura, T promedio es la temperatura promedio obtenida de los valores de temperatura máxima y mínima de la base de datos, T mínima es la temperatura mínima absoluta observada en todo el conjunto de datos y T máxima es la temperatura máxima absoluta observada en todo el conjunto de datos.

Después de normalizar los datos, se divide la base de datos para la fase de experimentación, dichas series de tiempo fueron divididas en 3 etapas: entrenamiento, validación y prueba. Los porcentajes fueron distribuidos de la siguiente manera:

Tabla 2. Valores de cada fase en la experimentación

Etapa	Porcentaje
Entrenamiento	80%
Validación	10%
Prueba	10%

2.1 Modelo multivariable usando aprendizaje profundo

En el modelo propuesto se realiza una predicción de la temperatura utilizando todas las variables restantes de la base de datos, es decir, un modelo multivariable donde el punto de rocío, la humedad, la velocidad del viento y la presión son utilizadas para pronosticar la temperatura.

Considerar dos o más variables independientes beneficia al modelo ya que se realiza un análisis multivariable que es una técnica estadística que se utiliza para examinar y comprender las relaciones entre múltiples variables simultáneamente. A diferencia del análisis univariable, que se centra en una sola variable, el análisis multivariable considera la interacción entre dos o más variables

El objetivo principal del modelo multivariable es identificar patrones, tendencias y asociaciones complejas que no pueden ser descubiertas mediante el análisis de una sola variable.

Para obtener la predicción de la temperatura usando un modelo multivariable se utiliza una red neuronal recurrente (RNN) como lo es una LSTM (Long Short-Term Memory) que es utilizada para predecir series de datos. Gracias a que la LSTM puede aprender dependencias a largo plazo gracias a su arquitectura la hace especialmente útil para predecir series de datos temporales, y en este caso, para predecir series de datos climatológicos que fueron recopilados a través del tiempo.

En la metodología de este trabajo se entrena y se valida la red neuronal para pronosticar la etapa de prueba, tal como lo muestra la tabla 2, con los porcentajes correspondientes a cada etapa.

El pseudocodigo de la red neuronal es el siguiente:

```
model = Sequential()
model.add(LSTM(128,return_sequences=True,
input_shape=(X_combined_train_val.shape[1],
X_combined_train_val.shape[2])))

model.add(Dropout(0.2))
model.add(LSTM(128))
model.add(Dropout(0.2))
model.add(Dense(64, activation='relu'))
model.add(Dense(1))

model.compile(optimizer=Adam(learning_rate=0.001),
loss='mean_squared_error')

model.fit(X_combined_train_val,  y_combined_train_val,
epochs=20, batch_size=32, verbose=1)
```

Donde los hiperparámetros utilizados se muestran a continuación:

Tabla 3. Valores de los hiperparámetros

Hiperparámetro	Valor
Número de capas	5
Units primera capa	128
Units segunda capa	128
Units capa densa	64
Return sequences 1ra capa	True
Return sequences 2da capa	False
Número de características por entrada	3
Dropout ambas capas	0.2
Función de activación	relu
Optimizador	Adam (0.001)
Épocas	20
Batch size	32
Units capa densa de salida	1
Time step	10

Para evaluar el modelo anteriormente descrito se utiliza la métrica de error MAPE (Mean Absolute Percentage Error) que nos ayuda a comprobar la precisión de modelos de predicción, como en análisis de series temporales y regresión. Esta métrica nos permite observar el error promedio entre los valores reales y los valores pronosticados como un porcentaje del valor real.

Una vez configurada la red neuronal y sus hiperparámetros, se introducen las series de tiempo de los datos de las variables climatológicas para obtener los resultados de un pronóstico de la temperatura con un análisis multivariable de las ciudades de Monterrey, Guadalajara, Tampico y Tijuana.

3.RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Para evaluar el modelo se llevaron a cabo experimentaciones en cada ciudad donde se obtuvieron bases de datos con suficiente información de las variables independientes para pronosticar la temperatura.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

3.1 Guadalajara

En la ciudad de Guadalajara se realizó la predicción de la temperatura utilizando la métrica de error MAPE para evaluar el modelo. Los resultados de la experimentación son los siguientes:

Tabla 4. Resultado del MAPE en Guadalajara.

Pronóstico LSTM Guadalajara		
Variable dependiente	Variables independientes	MAPE
Temperatura	• Punto de rocío • Humedad • Velocidad del viento • Presión	2.3133 %

Con estos resultados obtenemos la siguiente gráfica:

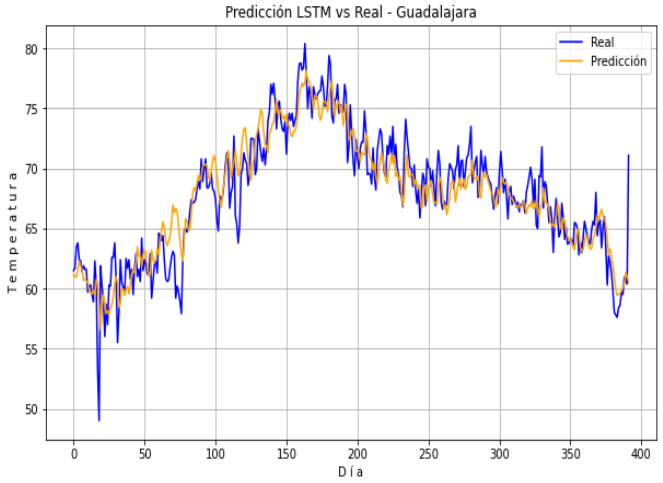


Fig. 1. Tendencia de los datos reales y datos pronosticados. En la ciudad de Guadalajara

La figura 1 muestra en el eje X los días y en el eje Y la temperatura. La gráfica indica la tendencia de las dos series de tiempo en la ciudad de Guadalajara, la serie de tiempo de los datos reales en color azul y la serie de tiempo de los datos pronosticados el color naranja.

3.2 Monterrey

En la ciudad de Monterrey se realizó la predicción de la temperatura utilizando la métrica de error MAPE para evaluar el modelo. Los resultados de la experimentación son los siguientes:

Tabla 5. Resultado del MAPE en Monterrey.

Pronóstico LSTM Monterrey		
Variable dependiente	Variables independientes	MAPE
Temperatura	• Punto de rocío • Humedad • Velocidad del viento • Presión	5.3553 %

Con los resultados de la tabla 5 podemos visualizar la gráfica siguiente:

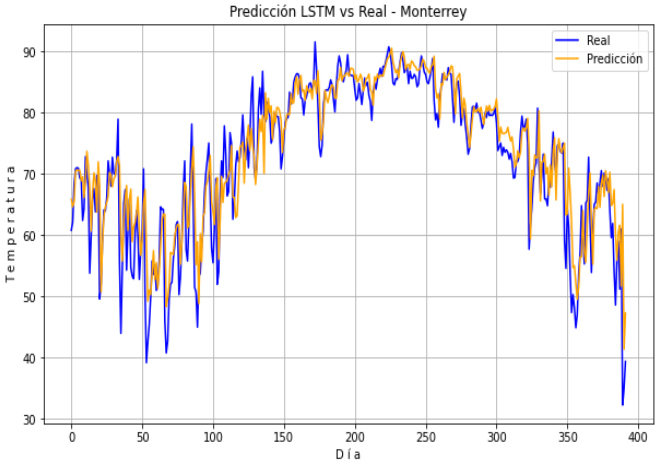


Fig. 2. Tendencia de los datos reales y datos pronosticados en la ciudad de Monterrey.

La figura 2 expresa la tendencia temporal de los datos reales y los datos pronosticados de la ciudad de Monterrey.

3.3 Tampico

En la ciudad de Tampico se realizó la predicción de la temperatura utilizando la métrica de error MAPE para evaluar el modelo. Los resultados de la experimentación son los siguientes:

Tabla 6. Resultado del MAPE en Tampico.

Pronóstico LSTM Tampico		
Variable dependiente	Variables independientes	MAPE
Temperatura	• Punto de rocío • Humedad • Velocidad del viento • Presión	3.1500 %

Con los resultados de la tabla 6 obtenemos la siguiente gráfica:

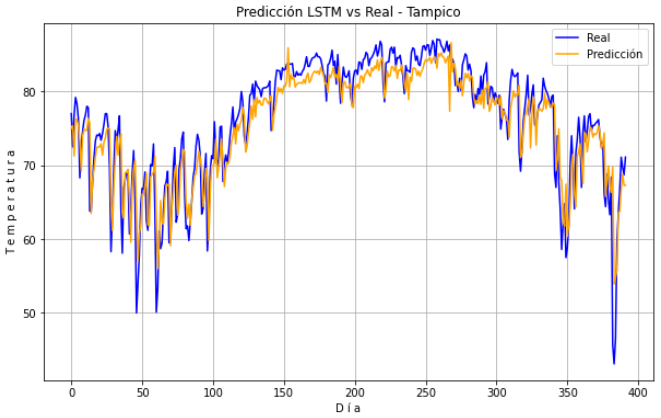


Fig. 3. Tendencia de los datos reales y datos pronosticados en la ciudad de Tampico.

La figura 3 ayuda a visualizar la tendencia de las series temporales reales y las series pronosticadas por la red neuronal en la ciudad de Tampico.

3.4 Tijuana

En la ciudad de Tijuana se realizó la predicción de la temperatura utilizando la métrica de error MAPE para evaluar el modelo. Los resultados de la experimentación son los siguientes:

Tabla 7. Resultado del MAPE en Tijuana.

Pronóstico LSTM Tijuana		
Variable dependiente	Variables independientes	MAPE
Temperatura	• Punto de rocío • Humedad • Velocidad del viento • Presión	3.5047 %

Al graficar la serie temporal real y la serie temporal pronosticada el resultado es el siguiente:

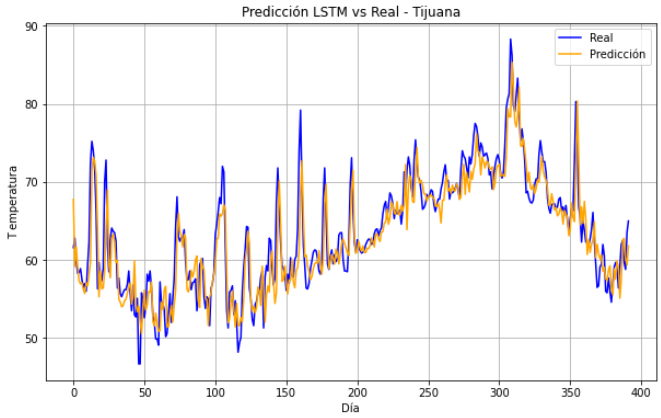


Fig. 4. Tendencia de los datos reales y datos pronosticados en la ciudad de Tijuana.

En la figura 4 se aprecia cómo se comportan las series temporales, tanto la serie real como la serie de datos pronosticada en la ciudad de Tijuana.

La tabla a continuación hace una comparativa del desempeño del modelo multivariable usando aprendizaje profundo en cada ciudad. El error fue medido con MAPE.

Tabla 8. Resultado del MAPE por ciudades.

Pronostico LSTM	
Ciudad	**MAPE**
Guadalajara	2.3133 %
Tampico	3.1500 %
Tijuana	3.5047 %
Monterrey	5.3553 %

El análisis muestra que el modelo LSTM multivariable puede adaptarse eficazmente a diferentes condiciones climáticas regionales. El bajo margen de error obtenido en todas las ciudades resalta la capacidad del modelo para capturar patrones complejos de temperatura a partir de variables meteorológicas asociadas.

Asimismo, los resultados sugieren que la inclusión de múltiples variables independientes mejora significativamente la capacidad predictiva respecto a modelos univariables tradicionales, al permitir una caracterización más rica del sistema atmosférico.

A continuación, una comparación de los resultados de las investigaciones encontradas en el estado del arte con el trabajo actual:

Análisis comparativo				
	Roy, D. S.	Oshodi, I.	Appau Nketiah et. al	Trabajo actual
MAPE	2.58 - 10.85%	15%	-	2.31 - 5.35%
MSE	-	-	8.62 - 24.20	4.09 - 22.96

Podemos observar que el desempeño del modelo en el trabajo actual es tan bueno como el desempeño de los modelos que se encuentran en el estado del arte.

6. CONCLUSIONES

El cambio climático plantea importantes desafíos para la gestión ambiental y la planificación territorial. Una de las herramientas más prometedoras en la mitigación y adaptación al cambio climático es la predicción precisa de variables atmosféricas, como la temperatura. En este estudio se presenta un modelo multivariable de predicción de temperatura basado en redes neuronales recurrentes del tipo LSTM (Long Short-Term Memory), aplicado a series de tiempo climatológicas de las ciudades mexicanas de Guadalajara, Monterrey, Tampico y Tijuana. Las variables predictoras incluyen punto de rocío, humedad relativa, velocidad del viento y presión atmosférica, recopiladas en un periodo de 11 años (2012–2022). Se empleó una estrategia de normalización min-max y se dividieron los datos en conjuntos de entrenamiento (80%), validación (10%) y prueba (10%). Los resultados muestran un rendimiento satisfactorio del modelo, alcanzando errores porcentuales absolutos medios (MAPE) inferiores al 5.4% en todas las ciudades analizadas, lo que valida el enfoque multivariable y el uso de LSTM para aplicaciones climatológicas.

REFERENCIAS

Appau Nketiah, E., Chenlong, L., Yingchuan, J. and Appah Aram, S. (2023) *Recurrent neural network modeling of multivariate time series and its application in temperature*

forecasting. PLOS ONE. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285713

Oshodi, I. (2022) *Machine Learning-Based Algorithms for Weather Forecasting*. *International Journal of Artificial Intelligence and Machine Learning*, 2(2), pp. 12–20. https://doi.org/10.51483/ijaiml.2.2.2022.12-20

Roy, D. S. (2020) *Forecasting the air temperature at a weather station using deep neural networks*. *Procedia Computer Science*, 170, pp. 517–522. https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.11.005

Weather Underground (n.d.) *Weather history and forecasting*. Available at: https://www.wunderground.com/

SINAICA (n.d.) *Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire*. Available at: https://sinaica.inecc.gob.mx/

Artificial Intelligence to Predict Energy Production in Sediment Microbial Fuel Cells

Prieto Alvarado Rogelio *, Rodríguez Rangel Héctor *, Blenda Ramírez Pereda *, Feregrino-Rivas Marlenne**

* *Tecnológico Nacional de México, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Instituto Tecnológico de Culiacán, Av. Juan de Dios Bátiz 310 Pte. Col. Guadalupe, C.P. 80220, Culiacán, Sinaloa.*
(e-mail: {D24171315, hector.rr, blenda.rp}@ culiacan.tecnm.mx}).

** *Instituto Politécnico Nacional, Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México*
(e-mail: (coordinadordci@culiacan.tecnm.mx)

Abstract: Sediment Microbial Fuel Cells (SMFC) are a type of renewable energy that is biocompatible and long-lasting. SMFC can produce electricity due to the exoelectrogenic capacity of the microorganisms contained in sediments. However, the energy production behavior of a SMFC is not linear and can be difficult to predict using traditional methods. Therefore, in this work, Machine Learning (ML) and Artificial Neural Network (ANN) algorithms are implemented to predict the energy production of Sediment Microbial Fuel Cells (SMFC). The dataset was obtained from monitoring four SMFC built with sediments obtained from two points, one marine and one river; both points are in the municipality of Culiacán, Sinaloa. The *k* nearest neighbors (KNN), Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM) and Multilayer Perceptron (MLP) algorithms were applied. The result obtained from each algorithm was evaluated using statistical measures a) Mean Squared Error (MSE) and b) R-squared (R^2).

Keywords: Artificial Intelligence, Sediment Microbial Fuel Cells, SMFC, Artificial Neural Network, ANR, Renewable Energy.

1. INTRODUCCIÓN

Profundizar en el estudio y conocimiento del comportamiento de las Celdas de Combustible Microbiano de Sedimentos (CCMS o *Sediment Microbial Fuel Cells*, SMFC) permitirá ampliar su adopción y mejorar su funcionamiento. Es posible contribuir, para alcanzar este propósito, mediante la implementación de algoritmos de aprendizaje computacional (*Machine Learning*, ML).

La producción de energía mundial está basada mayormente en energías no renovables que generan contaminación, aportan casi el 90% de las emisiones de dióxido de carbono, son las responsables de la generación de los gases de efecto invernadero (GEI) que afectan el medio ambiente y que han contribuido al cambio climático [SEI et al. (2019)](SEI et al. 2023).

Existen iniciativas a nivel mundial que impulsan la producción de energía basadas en energías renovables (Naciones Unidas (ONU) 2023). Sin embargo, la mayor producción de este tipo de energía proviene de las energías solar y eólica (Energy Agency 2024). Por ello, es necesario impulsar otras fuentes de energías renovables, por ejemplo, la biomasa. Las CCMS están basadas en el uso de biomasa como fuente de energía. Las CCMS proveen energía renovable que es biocompatible y de larga duración. Las CCMS son capaces de producir electricidad debido a la capacidad exoelectrógena de los microorganismos contenidos en ella (Rahimnejad 2023) (Chang et al. 2020).

Los antecedentes de producción de energía con organismos surgieron en el siglo XVIII, con la observación de ranas; y la generación de electricidad con microorganismos, en 1911 (Potter y Waller 1911). Inicialmente se utilizó la denominación de «Sistemas bioelectroquímicos» (Logan et al. 2006). En la actualidad, se usa el término Celdas de Combustible Microbianas de Sedimento (CCMS), se conoce que su producción de electricidad es baja y su comportamiento no es lineal. La CCMS tiene como ventaja que es de larga duración y es biocompatible (Rahimnejad 2023). Actualmente, las CCMS se han utilizado en aplicaciones de robótica suave, para energizar sensores remotos en entornos donde no se tiene acceso a electricidad y no se permite el uso de contaminantes (Tsompanas et al. 2021). Profundizar en el estudio y conocimiento del comportamiento de las CCMS permitiría ampliar su adopción y mejorar su funcionamiento. Por tanto, el presente trabajo tiene como objetivo diseñar y validar un modelo predictivo que mediante técnicas de aprendizaje automático realice la predicción de la producción de energía generada por una CCMS. Para realizar la predicción se propuso la implementación de algoritmos de aprendizaje computacional y de Redes Neuronales Artificiales (RNA). El conjunto de datos fue obtenido del estudio realizado por (Feregrino-Rivas et al. 2023).

2. TRABAJOS PREVIOS

En esta sección se presentan los hallazgos de investigaciones referentes a la estimación de la producción de energía de las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) y a las celdas de combustible microbianas de sedimentos (CCMS o SMFC) utilizando técnicas de Inteligencia Artificial (IA), en específico, técnicas de aprendizaje computacional.

La Tabla 2.1 muestra una comparativa de los trabajos antes mencionados; en ella se pueden observar las principales aportaciones y las técnicas o algoritmos propuestos. En los trabajos analizados se reporta que los sistemas bioelectroquímicos (BES) no tienen un comportamiento estable y, de manera incipiente, se ha realizado experimentación para aplicar técnicas de IA en la predicción del comportamiento de las celdas. Se detectó como área de oportunidad, realizar mayor experimentación para predecir el comportamiento de las variables fisicoquímicas de interés y de la producción de energía con mayor precisión; así también, se encontraron pocos trabajos que aborden la simulación en la construcción de CCMS para optimizar su funcionamiento y producción de energía.

Tabla 1. Tabla comparativa del estado del arte.

Autor	Aportación	Técnicas o algoritmos propuestos
1. (Rahimnejad 2023)	Las CCM son difíciles de modelar y sus salidas son difíciles de recrear. Estimar la energía producida por las CCM podría ampliar su uso.	«*Nonlinear autoregressive model with exogenous inputs*» (NARX)
2. (Tsompanas et al. 2021)	La predicción de la producción de energía en las CCM es retadora porque las CCM no tienen un comportamiento estable.	Modelo NARX, de fácil implementación y permite ciclos abiertos y cerrados.
3. (Gürbüz, Günay, y Tapan 2024)	Los factores más relevantes para obtener un alto rendimiento son: la temperatura de funcionamiento, la luz natural, el medio de soporte del suelo y el diseño del humedal construido.	Conjunto de datos de 229 observaciones para celdas de combustible microbianas de origen vegetal (PMFC) con 159 variables descriptivas y una variable objetivo.
4. (Gadkari 2022)	Se analizan las limitaciones de los métodos basados en IA para predecir y optimizar los sistemas bioelectroquímicos BES.	Redes neuronales artificiales (ANN), programación genética (GP), lógica difusa (FL), la regresión por vectores de soporte (SVR) y el sistema de inferencia neuronal difusa adaptativo (ANFIS)
5.(Mais et al. 2024)	Uso de medidas de fomento de la confianza es primordial en el diseño y ampliación de escala de los sistemas bioelectroquímicos BES.	Análisis de modelos computacionales: el uso de técnicas de IA, para construir BES con un enfoque multifísico.
6.(Gürbüz, Günay, y Tapan 2024)	Implementar técnicas de IA para mejorar la eficiencia de las Celdas de Combustible planta-microbiana (PMFC). Concluye que las variables más influyentes (respecto a la eficiencia en la producción de energía) fueron la temperatura, la luz natural y el soporte del suelo.	Análisis de componentes principales (ACP), los árboles de clasificación y el análisis SHapley Additive exPlanations (SHAP).
7. (Li et al. 2023)	Utilizan técnicas de IA para predecir comunidades microbianas, productos o sustratos y el rendimiento del reactor, entre otras.	Redes neuronales artificiales (RNA), algoritmos genéticos (GP), lógica difusa (FL), regresión de vectores de soporte (SVR) y sistema de inferencia difusa neuronal adaptable (ANFIS)

2.1 Algoritmos para realizar predicción

A continuación, se describen los algoritmos utilizados para analizar el conjunto de datos y realizar predicciones (regresiones).

a. ***k-nearest neighbors* (kNN)**. En el aprendizaje automático (o *Machine Learning* (ML)) el aprendizaje supervisado recibe como entrada datos etiquetados para entrenar a los algoritmos predictivos. El algoritmo *k* vecinos más cercanos (*k-nearest neighbors* (kNN)) es un clasificador de aprendizaje supervisado que mediante proximidad realiza tareas de clasificación o regresión (Pedregosa et al. 2011). El tipo de problema que se resuelve en este artículo requiere implementar el algoritmo kNN para regresión.

b. ***Random Forest* (RF)**. Algoritmo propuesto por Breiman y Cutler en 2001, utiliza múltiples árboles de decisión para obtener un resultado único. RF permite eliminar características (o variables) que podrían tener bajo impacto en el resultado o ejecución del modelo de regresión (Pedregosa et al. 2011).

c. **Support Vector Machine (SVM)**. es un algoritmo de aprendizaje supervisado que obtiene un hiperplano para dividir el conjunto de datos; con ello procede a identificar puntos en una de las regiones del hiperplano (Pedregosa et al. 2011).

d. **Perceptrón Multicapa (*Multilayer Perceptron* (MLP))**. El Perceptrón Multicapa (*Multilayer Perceptron*: (MLP)) es un tipo de Red Neuronal Artificial (RNA). utiliza computadoras para replicar el procesamiento de datos de las redes neuronales biológicas: implementa muchas unidades de procesamiento (neuronas) altamente interconectadas para procesar y transferir la información. En la Figura 1 se observa la arquitectura básica de un MLP. Las neuronas se organizan en capas. La red recibe una o más entradas en la capa inicial, en las capas internas (u ocultas) procesa y transfiere la información y, finalmente obtiene y proporciona el resultado en la capa de salida.

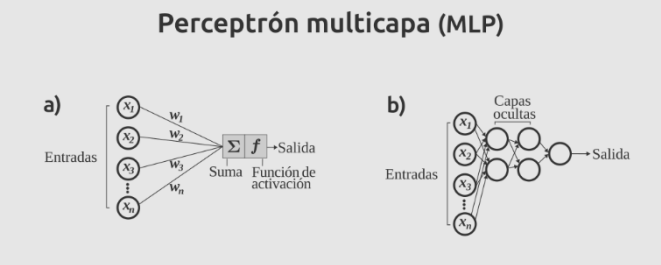


Fig. 1. Arquitectura básica de un perceptrón multicapa (MLP). Ilustración: diseño propio

3. METODOLOGÍA

Para este trabajo, se aplicaron tres pasos, como parte de la metodología; estos pasos se muestran en la Figura 2.

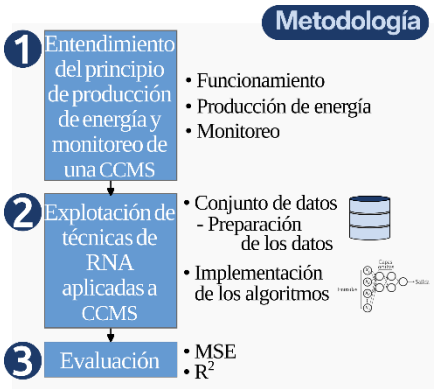


Fig. 2. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo. Ilustración: diseño propio.

3.1 Entendimiento del principio de producción de energía y monitoreo de una CCMS

Las Celdas de Combustible Microbianas (CCM o *Microbial Fuel Cell:* MFC) constituyen una alternativa de solución a los problemas energéticos, debido a sus características: alta disponibilidad, es energía limpia y biocompatible.

Una CCM es capaz de generar energía a partir de microorganismos exoelectrógenos, es un biorreactor electroquímico en el cual los microorganismos exoelectrógenos oxidan un sustrato y liberan electrones debido a su proceso metabólico.

Las celdas de combustible microbiano de sedimentos (CCMS o *Sediment Microbial Fuel Cell,* SMFC), un tipo de CCM son dispositivos que generan electricidad a partir de que los microorganismos exoelectrógenos degradan la materia orgánica, contenida en sedimentos, al interior de la celda. Los sedimentos pueden provenir de cuerpos de agua como ríos, mares y lagunas que ya se han utilizado en CCMS (Rahimnejad 2023) (Chang et al. 2020).

La cantidad de energía obtenida en un CCMS dependerá de diversos factores, tales como la cantidad de materia orgánica y el tipo de microorganismos contenidos en los sedimentos, el diseño, el material de los electrodos y de las variables fisicoquímicas.

3.2 Explotación de técnicas de RNA aplicadas a CCMS

Se propone utilizar el conjunto de datos obtenido en el estudio propuesto por (Feregrino-Rivas et al. 2023). El conjunto de datos fue obtenido del monitoreo de cuatro CCMS construidas con sedimentos obtenidos de dos puntos: uno marino y otro de río. Los puntos geográficos fueron determinados mediante un estudio geológico que permitió obtener la geolocalización de estos puntos. Los puntos fueron ubicados en: a. Ribera del Río San Lorenzo `(24°18'44.806"N) (107°21'4.791"W)` y b. En la bahía El Conchal, Sinaloa y `(24°14'30.726.806"N) (107°19'564.46"W)`. Se construyeron 4 CCMS en total: uno con sedimentos en época de estiaje y uno con sedimentos en época de lluvias recolectados de cada punto.

El monitoreo se realizó durante 30 días para cada CCMS, con mediciones en intervalos de una hora. En las mediciones se consideraron las variables: *conductividad eléctrica, salinidad, oxígeno disuelto, temperatura* y *voltaje*. (Feregrino-Rivas et al. 2023) en su propuesta, realizó el promedio diario de cada variable, para finalmente, obtener un valor calculado por día para cada variable.

Después de obtener el conjunto de datos con esas características, se procedió a:

1. Preparación de los datos.
   a. Limpieza de los datos. Se determinó el dominio de cada variable, es decir, el rango de valores permitido o esperado. Se eliminaron los registros que presentaban valores anormales o los que omitían el valor de alguna variable. Inicialmente se tenían 146 registros, después de la limpieza se obtuvieron 139.
   b. Reorganizar los datos. Se aplicó la transpuesta (A^t) para obtener los datos organizados por columnas. Se obtuvieron cuatro (4) archivos con formato separado por comas (CSV). Todos los registros se almacenaron en un único archivo con formato CSV.

c. Se realizó un análisis de distribución de las variables de entrada. La Figura 3 muestra un gráfico de dispersión para cada variable de entrada con respecto al voltaje (V).

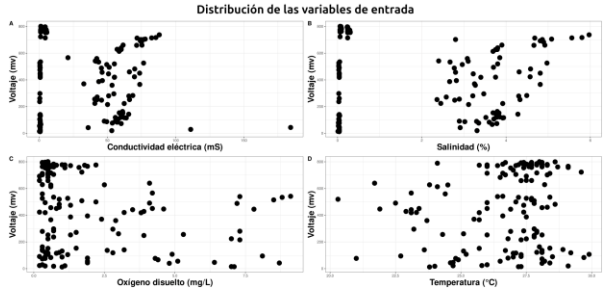


Fig. 3. Gráfica de dispersión de las variables de entrada.

2. Implementación de los algoritmos de Aprendizaje Computacional (*Machine Learning*, ML) y Redes Neuronales Artificiales (RNA). Para escribir el código, se utilizó la biblioteca *Scikit-learn* (Pedregosa et al. 2011) del lenguaje de programación *Python*. Previo a la ejecución de cada algoritmo se realizó la normalización de valores del conjunto de datos de manera separada, por cada columna. Se aplicaron las normalizaciones: *Robust Scaler* o *Standard Scaler*. Respecto al conjunto de datos, se dividió en dos subconjuntos aleatorios, un subconjunto del 80% (111 registros) para entrenamiento y del 20% (28 registros) para pruebas. La división de los datos evita el sobreajuste lo cual limitaría la habilidad del modelo para generalizar nuevos datos.

a. Aprendizaje Computacional (*Machine Learning*, ML)

1. *k* vecinos más cercanos (KNN). Se ejecutó 10 veces este algoritmo, una con cada escalador y con valores de $k = \{1,3,5,7,9\}$.

2. *Random Forest* (RF). Se ejecutó cuatro veces. Dos ejecuciones: una con cada escalador, con los siguientes parámetros fijos: *n_stimators=100* y *random_state=42*. El parámetro *random_state* permite controlar la aleatoriedad. Dos ejecuciones más utilizando la función *GridSearchCV* de *Scikit-learn* que permite ejecutar el algoritmo varias veces, a partir de parámetros iniciales, para obtener los mejores valores y combinaciones de parámetros. Se asignaron los siguientes valores a los parámetros iniciales para *GridSearchCV*: *estimator=model, param_grid=param_grid, cv=5, n_jobs=-1, verbose=2, scoring='neg_mean_squared_error'*.

3. *Support Vector Machines* (SVM). Se ejecutó dos veces, una con cada escalador, con los siguientes parámetros fijos: se utilizó el *kernel=rgf*, el parámetro de regularización *C=1.0* y *epsilon=0.1*.

b. Redes Neuronales Artificiales (RNA)

Perceptrón Multicapa (*Multilayer Perceptron* (MLP)). Se ejecutó dos veces una con cada escalador, con los siguientes parámetros fijos: *random_state=42, early_stopping=True, validation_fraction=0.2*. La Tabla 2 muestra los valores asignados a los parámetros iniciales para *GridSearchCV* con el objetivo de encontrar los mejores valores para los hiperparámetros.

La topología del MLP se compone de 1 capa oculta con 75 neuronas.

Tabla 2. Parámetros utilizados en el GridSearchCV en la ejecución del algoritmo Perceptrón Multicapa.

Parámetro	**Valor**
mlp__hidden_layer_sizes	[(50,), (75), (100,), (100, 100), (128, 64, 32)]
mlp__activation	['relu']
mlp__solver	['adam']
mlp__alpha	[0.0001, 0.001]
mlp__learning_rate	['constant', 'adaptive']
mlp__learning_rate_init	[0.001]
mlp__max_iter	[400]
mlp__batch_size	[64]

3.3 Evaluación

Una vez obtenido el resultado de la ejecución de los algoritmos indicados en la metodología, se propuso evaluar la precisión de la predicción mediante el cálculo de las medidas estadísticas: a) Error cuadrático medio (*Mean Squared Error*, MSE) para medir el error; y b) R cuadrada (*R-squared*, R^2) para evaluar el ajuste al modelo de regresión.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

La Tabla 3 muestra los parámetros utilizados y los resultados de la evaluación obtenidos: a) MSE y b) R^2 para cada algoritmo ejecutado. Para MSE los valores esperados son tendientes a 0 y para R^2 los valores esperados están en el rango de 0 a 1

Tabla 3. Parámetros utilizados y resultados obtenidos para cada algoritmo evaluado.

Alg.	**Parámetros**	**Normalización**	**MSE**	**R^2**
KNN	k=1	RobustScaler	0.2399	0.2433
KNN	k=1	Standard Scaler	0.7279	0.1578
KNN	k=3	RobustScaler	0.1518	0.2134
KNN	k=3	Standard Scaler	0.6433	0.2557

Alg.	Parámetros	Normalización	MSE	R^2
KNN	k=5	RobustScaler	0.1383	0.2830
KNN	k=5	Standard Scaler	0.5190	0.3995
KNN	k=7	RobustScaler	0.1583	0.1797
KNN	k=7	Standard Scaler	0.6376	0.2623
KNN	**k=9**	**RobustScaler**	0.1651	**0.1440**
KNN	k=9	Standard Scaler	0.6671	0.2281
RF	n_stimators=100, random_state=42	RobustScaler	0.0662	0.6568
RF	n_stimators=100, random_state=42	Standard Scaler	0.3046	0.6475
RF	**GridSearchCV**	**RobustScaler**	**0.0659**	0.6583
RF	GridSearchCV	Standard Scaler	0.2929	0.6611
SVM	kernel=rgf, C=1.0, epsilon=0.1	RobustScaler	0.1648	0.1458
SVM	kernel=rgf, C=1.0, epsilon=0.1	Standard Scaler	0.6831	0.2096
MLP	random_state=42, early_stopping=True, validation_fraction=0.2, GridSearchCV	RobustScaler	0.1488	0.2287
MLP	random_state=42, early_stopping=True, validation_fraction=0.2, GridSearchCV	Standard Scaler	0.6877	0.2044

Para el algoritmo KNN, a partir de estos resultados, se generó una gráfica comparativa, tal como se muestra en la Figura 4. El algoritmo KNN con el parámetro $k = 5$ obtuvo un menor valor MSE y con el parámetro $k = 9$ obtuvo un menor valor R^2.

De manera global, se puede observar en los resultados que el algoritmo con un mejor MSE fue *Random Forest* con un valor de 0.0659, y KNN con un R^2 de 0.144. En el caso del MLP el conjunto entrenamiento obtuvo un mejor resultado con RobusScaler, valores de MSE=0.4734 y de R^2= 0.5419 con StandardScaler.

En el trabajo de (Tsompanas et al., 2021) se aplica aprendizaje computacional (ML) utilizando el modelo «*nonlinear autoregressive model with exogenous inputs*» (NARX) para predecir la salida de una Celda de Combustible Microbiana (CCM). NARX analizó un conjunto de datos de 8064 registros y obtuvo un nivel de precisión alto, con valores de MSE de $1.049x10^{-}5$ y del coeficiente de correlación de *Pearson* $R = 0.999317$.

También el trabajo desarrollado por (de Ramón-Fernández, Salar-García, Ruiz Fernández, Greenman, y Ieropoulos, 2020) presenta un alto nivel de precisión, con valores de $R = 0.932$ aplicando RNA a CCM de cerámica. Sus resultados demuestran que las RNA son herramientas útiles y fiables para predecir la obtención de energía en CCM.

En el presente trabajo se tiene un conjunto de datos con solamente 139 registros, por lo cual, se realizó un primer acercamiento exploratorio del uso de técnicas de aprendizaje computacional y de RNA aplicadas en CCMS.

Como trabajo futuro, se propone generar un conjunto de datos con un mayor número de registros, lo cual permitirá a los algoritmos de ML y de RNA contar con una mayor cantidad de datos para realizar el entrenamiento y mejorar el ajuste al comportamiento de los datos a lo largo del tiempo.

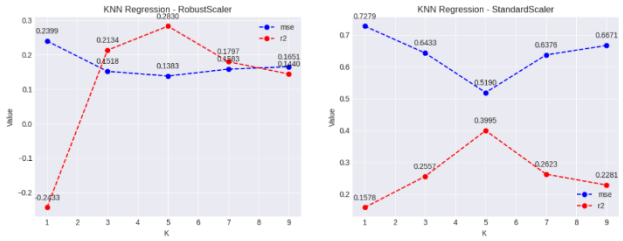


Fig. 4. Algoritmo KNN. Comparativa del error de las ejecuciones con los valores *k*={1,3,5,7,9} aplicando las normalizaciones *RobustScaler* y *StandardScaler*.

El conjunto de datos propuesto deberá generarse a partir de un monitoreo, con mayor frecuencia, de una CCMS y, preferentemente, de manera automatizada. La automatización en el monitoreo permitirá disminuir errores ocasionados por factor humano, así también, mantener consistencia en los tiempos de adquisición de datos de las variables de interés.

Un paso posterior a la generación del conjunto de datos podría ser experimentar con otros algoritmos de ML y RNA como el NARX (*Nonlinear Autoregressive Exogenous*) que basa su experimentación en una configuración de agrupamiento de las CCMS.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo consistió en calcular la predicción de la producción de voltaje en una CCMS utilizando algoritmos de aprendizaje computacional y RNA. El conjunto de datos, con un total de 139 registros, fue obtenido del monitoreo de cuatro

CCMS construidas con sedimentos obtenidos de dos puntos: uno marino y otro de río.

Se aplicaron y evaluaron algoritmos de Aprendizaje Computacional (*Machine Learning*, ML) y Redes Neuronales Artificiales (RNA), en específico: k vecinos más cercanos (KNN), *Random Forest* (RF), *Support Vector Machines* (SVM) y Perceptrón Multicapa (*Multilayer Perceptron* (MLP)).

Para evaluar la precisión de la predicción se realizó el cálculo de: a) Error cuadrático medio (*Mean Squared Error*, MSE) para medir el error; y b) R cuadrada (*R-squared*, R^2) para evaluar el ajuste al modelo de regresión.

El algoritmo con un mejor MSE fue *Random Forest* con un valor de 0.0659, y KNN obtuvo el mejor valor de R^2: 0.144.

REFERENCIAS

Chang, H.-C., Gustave, W., Yuan, Z.-F., Xiao, Y., y Chen, Z. (2020). One-step fabrication of binder-free air cathode for microbial fuel cells by using balsa wood biochar. *Environmental Technology & Innovation*, *18*, 100615. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100615

de Ramón-Fernández, A., Salar-García, M. J., Ruiz Fernández, D., Greenman, J., y Ieropoulos, I. A. (2020). Evaluation of artificial neural network algorithms for predicting the effect of the urine flow rate on the power performance of microbial fuel cells. *Energy*, *213*, 118806. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118806

Energy Agency, R. I. (2024). Renewable capacity statistics 2024. En *Renewable capacity statistics 2024*. Abu Dhabi: Renewable International Energy Agency. Recuperado de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2024.pdf

Feregrino-Rivas, M., Ramirez-Pereda, B., Estrada-Godoy, F., Cuesta-Zedeño, L. F., Rochín-Medina, J. J., Bustos-Terrones, Y. A., y Gonzalez-Huitron, V. A. (2023). Performance of a sediment microbial fuel cell for bioenergy production: Comparison of fluvial and marine sediments|. *Biomass and Bioenergy*, *168*, 106657. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106657

Gadkari, S. (2022). Chapter 23 - Application of artificial intelligence methods for the optimization and control of bioelectrochemical systems. En D. A. Jadhav, S. Pandit, S. Gajalakshmi, y M. P. Shah (Eds.), *Scaling Up of Microbial Electrochemical Systems* (pp. 437–455). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90765-1.00023-X

Gürbüz, T., Günay, M. E., y Tapan, N. A. (2024). Machine learning solutions for enhanced performance in plant-based microbial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, *78*, 1060–1069. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.417

Li, C., Guo, D., Dang, Y., Sun, D., y Li, P. (2023). Application of artificial intelligence-based methods in bioelectrochemical systems: Recent progress and future perspectives. *Journal of Environmental Management*, *344*, 118502. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118502

Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., … Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science & Technology*, *40*(17), 5181–5192. https://doi.org/10.1021/es0605016

Mais, L., Rodriguez, J., Melis, N., Vacca, A., y Mascia, M. (2024). Computational modelling as a design tool for bioelectrochemical systems. *Current Opinion in Electrochemistry*, *44*, 101460. https://doi.org/10.1016/j.coelec.2024.101460

Naciones Unidas (ONU), O. de las. (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: edición especial. Por un plan de rescate para las personas y el planeta. *Objetivos de Desarrollo Sustentable 2030*. Recuperado de https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., … Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, *12*, 2825–2830.

Potter, M. C., y Waller, A. D. (1911). Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, *84*(571), 260–276. https://doi.org/10.1098/rspb.1911.0073

Rahimnejad, M. (2023). *Biological fuel cells*. Philadelphia, PA: Elsevier - Health Sciences Division.

Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., y Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*, *356*, 225–244. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109

SEI, Climate, Analytics, E3G, IISD, y UNEP. (2023). *The Production Gap: Phasing down or phasing up? Top fossil fuel producers plan even more extraction despite climate promises*. Stockholm Environment Institute; United Nations Environment Programme. https://doi.org/10.51414/sei2023.050

SEI, IISD, ODI, Analytics, C., CICERO, y UNEP. (2019). *The Production Gap: The discrepancy between countries planned fossil fuel production and global production levels consistent with limiting warming to 1.5°C or 2°C*. SEI, IISD, ODI, Climate Analytics, CICERO,; UNEP. United Nations Environment Programme. Recuperado de https://productiongap.org/wp-content/uploads/2019/11/Production-Gap-Report-2019.pdf

Tsompanas, M.-A., You, J., Philamore, H., Rossiter, J., y Ieropoulos, I. (2021). Neural Networks Predicting Microbial Fuel Cells Output for Soft Robotics Applications. *Frontiers in Robotics and AI*, *8*. https://doi.org/10.3389/frobt.2021.633414

Trash Collection Robot: An Educational Autonomous Vehicle for Waste Sorting in Schools

Gonzales Sánchez, Marco Antonio*, Nicolas Peña, Daniel*

** Centro de Estudios Tecnológicos y de Servicios No. 26, Avenida Ignacio Zaragoza, Atitalaquia, Hidalgo, México, CP 42970. (e-mail: mgonzalezi21@gmail.edu.mx)*

** Centro de Estudios Tecnológicos y de Servicios No. 26, Avenida Ignacio Zaragoza, Atitalaquia, Hidalgo, México, CP 42970. (e-mail: danieldocente@cetis26.edu.mx)*

Abstract: This paper presents the design, construction, and educational application of an autonomous waste collection vehicle specifically developed to promote environmental awareness and sustainable habits in children aged 3 to 15. The prototype, conceived as an interactive learning tool, combines mechanical design, electronic control systems, and artificial intelligence in a user-friendly format that encourages student participation. The vehicle is equipped with four motorized wheels and a robotic arm capable of collecting solid waste. A mobile application, connected via Bluetooth, serves as the primary control interface, allowing users to operate the robot remotely. The app also uses the device's camera to capture images of the collected waste. These images are processed in real-time by a deep learning algorithm, which identifies and classifies the type of waste (plastic, paper, organic, etc.). The application then displays the classification result as on-screen text and simultaneously provides auditory instructions, guiding the user to deposit the waste into the appropriate bin.

The educational component is reinforced by the use of three learning modalities: visual (image recognition and display), auditory (verbal instructions), and kinesthetic (hands-on interaction with the robot). The development process included phases of design using CAD software, system integration using an ESP32 microcontroller, and extensive prototyping. Real-world testing was conducted in public schools in the state of Hidalgo, Mexico, where children interacted with the robot during recycling-themed activities.

Results indicated a strong engagement from students and an improvement in their understanding of waste classification. Teachers also reported increased interest in environmental topics. The project demonstrates the feasibility and educational impact of applying mechatronic systems and AI technologies in primary and secondary school settings. This low-cost, scalable solution contributes to environmental education while aligning with the goals of the 2030 Agenda for Sustainable Development, particularly in the areas of responsible consumption and climate action.

Keywords: Autonomous robot, Waste classification, Environmental education, Artificial intelligence, Mechatronics.

1. INTRODUCCIÓN

Los índices de contaminación en México han crecido en la última década, de acuerdo a los reportes de la Semarnat (2023) en la recolección de residuos sólidos. Es por ello que la separación de la basura es clave para reducir este problema, permitiendo el reciclaje de diversos materiales. De esta forma, se implementa un prototipo de carro recolector de basura para entornos escolares, controlado por una app de teléfono que utiliza inteligencia artificial para clasificar desechos. Este vehículo se enfoca en educar a los niños sobre la importancia del reciclaje, combinando diferentes estilos de aprendizaje para hacerlo lúdico y efectivo (Iberdrola, 2024).

En México, la separación de residuos es fundamental para mitigar los impactos ambientales y disminuir la demanda de recursos naturales. Esta práctica fortalece procesos como el reciclaje. Según ACNUR (2023), no llevar a cabo estas acciones puede tener consecuencias graves para el planeta, que van desde el agotamiento de recursos naturales hasta la pérdida de ecosistemas y hábitats.

Sin embargo, hasta el 2010 solo en solo el 11% de los hogares se realizaba una recolección de desechos selectiva, según Semarnat (2023), debido a la falta de conciencia y educación ambiental, lo que da lugar a la nula o ineficiente gestión de residuos (Arriols, 2022).

Por lo anterior, es urgente promover una cultura de cuidado ambiental para evitar consecuencias negativas en el futuro. La falta de separación adecuada conduce a daños ambientales significativos, ya que los desechos terminan en rellenos sanitarios sin posibilidad de aprovechamiento (Bernache, 2012).

De esta forma, es como las instituciones educativas ofrecen una oportunidad clave para formar hábitos sostenibles y generar conciencia ambiental desde la infancia (Zorrilla et. Al, 2023). Sin embargo, los métodos tradicionales de enseñanza no siempre logran despertar el interés ni facilitar la comprensión de los temas ecológicos entre los estudiantes (Iberdrola, 2024). En este contexto, la incorporación de tecnologías emergentes como la robótica educativa y la inteligencia artificial (IA) permite desarrollar herramientas interactivas que potencien el aprendizaje significativo (Anglada et. al., 2025). Estas tecnologías pueden hacer que los niños participen activamente en actividades relacionadas con el cuidado del medio ambiente, facilitando la internalización de valores ecológicos.

Este artículo presenta el diseño y desarrollo de un prototipo de carro recolector de basura autónomo, concebido como herramienta didáctica para su implementación en planteles de nivel básico y medio. El vehículo puede ser controlado mediante una aplicación móvil y cuenta con capacidades para identificar, recolectar y clasificar distintos tipos de residuos. La interacción con el usuario se realiza a través de retroalimentación visual y auditiva, lo que permite al estudiante aprender jugando sobre cómo separar adecuadamente los residuos. El proyecto busca incentivar conductas responsables, mejorar la comprensión de los problemas ambientales y promover una educación integral en sostenibilidad desde edades tempranas.

¿Cómo puede la robótica educativa fomentar la conciencia ambiental y mejorar los hábitos de separación de residuos en niños desde temprana edad?

1.1 Educación ambiental y tecnología como respuesta al problema de los residuos

La creciente generación de residuos sólidos urbanos en México y su inadecuada gestión representan un problema ambiental de gran magnitud. La falta de hábitos de separación de basura desde edades tempranas impide el aprovechamiento de materiales reciclables y contribuye al colapso de rellenos sanitarios. Datos del INEGI (2020) revelan que solo una fracción mínima de los hogares mexicanos realiza una separación efectiva de los residuos, lo que se traduce en un uso ineficiente de recursos y un impacto ambiental significativo.

Este problema se agrava por la escasa inclusión de la educación ambiental en el currículo escolar, lo que genera desconocimiento, desinterés y poca participación activa de los estudiantes en prácticas sostenibles. Corraliza y Collado (2019) advierte que la falta de una conciencia ecológica sólida desde la niñez perpetúa modelos de consumo y desecho insostenibles.

Desde el marco teórico de la educación ambiental y el aprendizaje basado en proyectos tecnológicos, se reconoce que el uso de herramientas interactivas como la robótica educativa permite a los estudiantes aprender de manera significativa a través de la experimentación directa, desarrollando no solo conocimientos, sino también actitudes y valores proambientales. En este sentido, el enfoque STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) promueve la integración de conocimientos técnicos con la solución de problemas reales, como la gestión de residuos.

Con este proyecto se estudia cómo se puede atender directamente la necesidad de fomentar la conciencia ambiental en niños y jóvenes mediante un vehículo educativo e innovador. A través del desarrollo de un prototipo de carro recolector de basura con inteligencia artificial, se pretende no solo mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje sobre separación de residuos, sino también contribuir a una cultura de sostenibilidad y responsabilidad ecológica tal como lo realizó en su aportación Marcillo (2024) evaluando y mejorando la conciencia ambiental empleando aplicaciones móviles.

2. METODOLOGÍA

El proceso de diseño y construcción del prototipo se organizó en nueve fases secuenciales, con el objetivo de garantizar una ejecución ordenada, colaborativa y enfocada en la obtención de un dispositivo funcional y didáctico. A continuación, se describen las fases de manera resumida:

Fase 1: En la fase inicial, se llevó a cabo una investigación documental enfocada en el análisis del problema ambiental asociado a la inadecuada gestión de residuos sólidos en contextos escolares. Paralelamente, se revisaron antecedentes tecnológicos vinculados al uso de robótica educativa y herramientas de inteligencia artificial en proyectos con fines pedagógicos.

Esta revisión incluyó aportaciones como la de Anglada et al. (2025), quienes evidencian el impacto positivo del uso de robots en la mejora del aprendizaje infantil. A partir de esta indagación, se definió el enfoque metodológico general del proyecto, se asignaron responsabilidades a cada integrante del equipo de trabajo, y se elaboró un cronograma detallado con metas y tiempos específicos, bajo un modelo de gestión colaborativa.

Fase 2: En esta etapa, se procedió al diseño tridimensional del vehículo recolector mediante herramientas de modelado 3D y software CAD (Diseño Asistido por Computadora). El diseño se fundamentó en las dimensiones y requerimientos técnicos de los componentes mecánicos y electrónicos seleccionados previamente.

A continuación, se presentan los planos técnicos correspondientes al diseño del chasis del vehículo, elaborados en software de diseño asistido por computadora (CAD). Estas representaciones gráficas muestran los elementos estructurales principales del prototipo, los cuales incluyen la placa inferior, los laterales, y la tapa superior, que constituye la base del brazo robótico, los cuales se presentan en la figura 1:

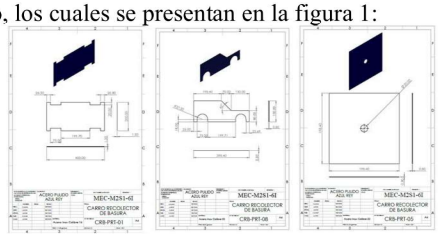


Figura 1 Placa inferior

Fase 3: Durante esta fase se realizó una estimación detallada de los costos de los componentes necesarios para la construcción del prototipo. El proceso incluyó la recopilación de precios mediante consultas en plataformas de comercio electrónico y visitas a distribuidores locales especializados en componentes electrónicos y mecánicos. La evaluación consideró no solo el costo unitario, sino también la calidad, disponibilidad y compatibilidad de cada componente con el diseño general del sistema.

Este análisis permitió optimizar el presupuesto del proyecto, asegurando la adquisición eficiente de los materiales sin comprometer la funcionalidad ni la durabilidad del prototipo. La Tabla 1 presenta un desglose de los componentes seleccionados junto con su costo estimado:

Tabla 1 Materiales del prototipo

Componentes y materiales	Cantidad	Precios (pesos mexicanos) Unitario	Total
Servomotores	4	$ 36.34	$ 145.36
ESP32	1	$ 158.83	$ 158.83
Motorreductores	4	$ 99.00	$ 396.00
Control PS4	1	$ 319.00	$ 319.00
Convertidor DC-DC BUCK	1	$ 212.42	$ 212.42
Baterias de litio	1	$ 486.38	$ 486.38
Brazo Robotico	1	$ 1,149.00	$ 1,149.00
Estructura (carro)	1	$ 546.00	$ 546.00
Llantas	4	$ 130.00	$ 520.00
L298 (puente H)	2	$ 72.75	$ 145.50
Pantalla LCD	1	$ 150.00	$ 150.00
Bocina	1	$ 200.00	$ 200.00
Sensor Optico	2	$ 75.00	$ 150.00
Total			$ 4,578.49

Fase 4: En esta etapa se efectuó un análisis eléctrico integral del sistema con el objetivo de garantizar un suministro energético estable y seguro para todos los componentes del prototipo. Se realizaron cálculos y las hojas técnicas de los componentes para dimensionar adecuadamente la alimentación de los motores de corriente directa, los servomotores, los sensores y la tarjeta ESP32. Estas acciones fueron fundamentales para asegurar la confiabilidad del circuito y el funcionamiento continuo del prototipo mostrado en la figura 2 durante las pruebas y su uso en entornos educativos.



Figura 2 Prototipo del carro, prueba de sistema eléctrico-mecánico.

Fase 5: Durante esta fase se diseñó y programó el código necesario para el control integral del prototipo. La codificación se realizó inicialmente en el entorno de desarrollo Arduino IDE, y posteriormente fue compilada y cargada en el microcontrolador ESP32, seleccionado por su capacidad de procesamiento, conectividad y eficiencia energética.

El sistema de control incluyó la gestión de señales digitales y analógicas para coordinar el funcionamiento de los actuadores —principalmente motores y servomotores—, así como la integración de entradas desde un control tipo PSP3, que permitió operar de forma remota el desplazamiento y las funciones del robot móvil.

La figura 3 muestra el código fuente implementado en la ESP32, destacando la estructura lógica utilizada para el control de movimiento y respuesta a comandos del usuario.



Figura 3 Código de ESP32

Fase 6: Se diseñó y programó una aplicación móvil que, además de controlar al robot, utiliza la cámara del dispositivo para captar imágenes y, mediante inteligencia artificial, clasifica el tipo de residuo mediante el uso de Python.

Fase 7: Una vez finalizadas las etapas de diseño, análisis y adquisición de materiales, se procedió a la construcción física del prototipo. El ensamblaje se llevó a cabo siguiendo los planos técnicos generados previamente mediante software CAD, lo que garantizó una integración precisa y eficiente de los elementos estructurales.

Fase 8: Se realizó el montaje final de los componentes electrónicos sobre la estructura, considerando su protección ante humedad, polvo y exposición solar para asegurar su durabilidad.

Durante esta fase, se incorporaron cuidadosamente los distintos componentes mecánicos —como el chasis, ruedas, y brazo robótico— así como los módulos electrónicos, incluyendo motores, sensores, servomotores y el microcontrolador ESP32. Se emplearon técnicas de montaje que aseguraran la estabilidad estructural del vehículo, facilitando además su mantenimiento y futuras mejoras.

Fase 9: La fase final consistió en la realización de pruebas funcionales en un entorno escolar (figura 4), diseñado para replicar las condiciones reales de uso del prototipo. Durante estas sesiones, se evaluó el desempeño general del vehículo recolector, verificando aspectos como la movilidad, la respuesta del sistema de control, la precisión del brazo robótico y la efectividad del algoritmo de clasificación de residuos.



Figura 4 Prueba del prototipo

2.1 Diseño experimental y materiales utilizados

El presente estudio se enmarca dentro de una metodología de desarrollo tecnológico aplicada, orientada a la solución de una problemática ambiental mediante la construcción de un prototipo funcional. Este enfoque se fundamenta en los principios del modelo STEAM (Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics), que promueve el aprendizaje interdisciplinario a través de la experimentación práctica y la resolución de problemas reales.

Tal como lo argumentan Zorrilla et al. (2023), la robótica educativa en contextos infantiles ofrece beneficios significativos en el desarrollo de habilidades cognitivas, tecnológicas y sociales, independientemente del origen o nivel de diversificación de los estudiantes. En este sentido, el uso de un prototipo interactivo no solo favorece el aprendizaje significativo, sino que también potencia la inclusión educativa y el pensamiento crítico desde edades tempranas.

En cuanto a los materiales, se utilizaron componentes de bajo costo y fácil adquisición. La estructura del vehículo fue construida con materiales plásticos y metálicos livianos para garantizar resistencia y movilidad. Se incorporaron cuatro motorreductores de corriente directa para el desplazamiento, un brazo robótico articulado con servomotores de rotación controlada, y un módulo de control basado en el microcontrolador ESP32. La alimentación del sistema se realizó mediante baterías de litio recargables.

Para el reconocimiento de residuos, se desarrolló una aplicación móvil conectada por Bluetooth al prototipo. Esta aplicación utiliza la cámara del dispositivo para capturar imágenes, que son analizadas por un modelo de inteligencia artificial entrenado para identificar tipos de residuos comunes (papel, botellas de pet y latas de aluminio). Posteriormente, la aplicación emite instrucciones visuales y auditivas que orientan al usuario sobre la clasificación adecuada del desecho.

Las pruebas se llevaron a cabo en contextos escolares reales, durante la semana de la ciencia y la tecnología 2023 en las instalaciones deportivas del centro del municipio de Atitalaquia, Hidalgo, lo que permitió evaluar la funcionalidad del sistema (figura 5) y la respuesta del público infantil (asistieron alumnos de los jardines de niño y nivel primaria de los planteles de la cabecera municipal). Este enfoque práctico permitió validar que el uso de tecnologías emergentes puede facilitar el aprendizaje sobre sostenibilidad ambiental, como demuestran Encalada et al. (2025) con su investigación donde describe como cursos de robotica mejoran las habilidades digitales y como lo menciona Casado y Checa (2020) quien describe como los proyectos de robotica desarrolla la creatividad en las aulas.



Figura 5. Prototipo Funcional

2.2 Impacto Social, Ecológico, Tecnológico y/o Desarrollo Sustentable

El prototipo se diseñó principalmente para la interacción de la población infantil, se presenta como una herramienta clave en la formación de conciencia ambiental y en la promoción de prácticas sostenibles, específicamente en la separación de residuos, dado que, en la actualidad en México, este proceso resulta complejo y costoso, y la gestión de los rellenos sanitarios carece de una adecuada eficiencia, además de que la clasificación de residuos sigue siendo insuficiente (Bernache, 2012). Se reconoce que la adopción de estos comportamientos desde una edad temprana no solo favorece la promoción de prácticas ambientales responsables, sino que también contribuye significativamente a la construcción de una

conciencia sostenible que perdura a lo largo de la vida. La relevancia de este objetivo se ve reforzada al considerar el impacto positivo que genera en la creación de un entorno más sostenible (NATUYSER, 2020).

Este enfoque no solo busca cambiar comportamientos, sino también moldear actitudes y percepciones arraigadas en las futuras generaciones, consolidando así un cambio cultural hacia la preservación ambiental. El diseño del prototipo está concebido para una actualización continua, incorporando las tecnologías emergentes y absorbiendo nuevos conocimientos por parte de nuestro equipo. Este compromiso evolutivo representa una contribución sustancial a los objetivos de Producción y Consumo Responsable, Acción por el Clima, y Vida de Ecosistemas Terrestres establecidos en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ONU, 2024).

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Tras la culminación del desarrollo y ensamble del prototipo de vehículo recolector de basura con inteligencia artificial, se procedió a una serie de pruebas controladas y prácticas en entornos escolares en las cuales se identificó como los alumnos de nivel primaria y de jardín de niños se sintieron motivados a interactuar con el prototipo, siendo congruente con lo que menciona Sanchez et. Al (2019) en sus investigaciones sobre la importancia y los beneficios de la robótica en la primera infancia.

Los resultados obtenidos durante las sesiones de interacción con estudiantes de nivel primaria y secundaria fueron notablemente positivos. Se observó un nivel sostenido de entusiasmo y participación activa por parte de los alumnos durante la Semana de la Ciencia y Tecnología 2023, organizada por el CETis No. 26 (figura 7), se contó con la participación de aproximadamente 600 asistentes, entre los cuales la gran mayoría manifestó un marcado interés por interactuar con el dispositivo.



Figura 7 Exposición en la semana de la ciencia y tecnología 2023

Se aplicó una encuesta breve antes y después de la experiencia interactiva. En dicha encuesta, se mostraron a los estudiantes imágenes de una lata de aluminio, una botella de PET y una hoja de papel, solicitándoles que identificaran el contenedor adecuado para cada tipo de residuo.

Tabla 2 Encuesta pre y post uso del prototipo

Material	Sabían clasificarla (Antes)	No sabían clasificarla (Antes)	Sabían clasificarla (Después)	No sabían clasificarla (Después)
Aluminio	200	355	500	55
PET	150	405	521	34
Hoja de papel	131	424	550	5

Durante las demostraciones, los niños interactuaron con el prototipo de forma intuitiva, logrando operar el sistema de control, manipular el brazo robótico y comprender la dinámica de separación de residuos apoyados por las instrucciones auditivas y visuales generadas por la inteligencia artificial. La familiaridad con dispositivos móviles facilitó una curva de aprendizaje rápida, y se evidenció un fuerte componente de apropiación tecnológica por parte de los usuarios siendo congruente con lo que expone Casado y Checa (2020) quienes exponen que los robots desempeñan un papel positivo en las actividades educativas partiendo desde la creatividad de los infantes.

Un hallazgo relevante fue el impacto formativo de la experiencia: al ser cuestionados sobre la presencia de residuos en sus entornos escolares y la posibilidad de contribuir a su recolección, los estudiantes manifestaron una alta disposición a participar. Este comportamiento sugiere que la combinación de robótica educativa con conciencia ecológica promueve no solo el interés por la tecnología, sino también valores de responsabilidad social y ambiental.

Asimismo, el prototipo logró suscitar debates espontáneos entre los niños respecto a la correcta clasificación de residuos y la importancia del reciclaje, estos resultados respaldan la viabilidad de incorporar este tipo de soluciones tecnológicas en contextos educativos más amplios. El éxito observado durante las pruebas sugiere que el prototipo no solo es funcional desde el punto de vista técnico, sino también eficaz desde una perspectiva pedagógica. Como señalan Casado y Checa (2020), la implementación de herramientas tecnológicas en entornos educativos representa un desafío, especialmente cuando se busca convertirlas en prácticas regulares dentro del aula.

Finalmente, es importante destacar que estos hallazgos abren la posibilidad de futuras investigaciones sobre el impacto longitudinal de este tipo de tecnologías en la formación de hábitos ambientales, así como la adaptación del prototipo a diferentes niveles educativos y contextos comunitarios. No obstante, es importante señalar que este primer acercamiento al desarrollo del prototipo presenta oportunidades de mejora.

En esta fase inicial, la selección de componentes estuvo limitada a aquellos elementos que fueran compatibles con el hardware disponible, particularmente con la pinza robótica utilizada para la recolección de residuos. Esta decisión, aunque funcional para fines de validación, restringió el alcance de funcionalidades que podrían optimizarse en versiones posteriores del prototipo.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo cumplió con la identificación y recolección de residuos lo cual ha permitido que este proyecto se presente en diferentes esferas, como lo es el Concurso Nacional de Prototipos y Proyectos de Emprendimiento organizado por la DGETI donde se obtuvo una acreditación nacional para participar en la Copa Science de México.

El proyecto mostró inculcar prácticas responsables y sostenibles a través de herramientas tecnológicas que conecten con los estudiantes de manera lúdica y significativa tal y como lo respalda Anglada et. al. (2025). Esta intención se ha visto reforzada por los resultados obtenidos durante las pruebas

piloto y los comentarios recibidos por diversos actores clave, como Jaime Arturo Valdez Rivera, fundador y director de *Science México*, así como por evaluadores del Tecnológico Nacional de México campus Atitalaquia, del Instituto Tecnológico Superior del Occidente del Estado de Hidalgo (ITSOEH) y de otras instituciones de educación superior que participaron como jurado en el Concurso Nacional de Prototipos y Proyectos de Emprendimiento organizado por la DGETI.

Asimismo, durante la implementación en escuelas, tanto maestros como padres de familia manifestaron su apoyo al proyecto, destacando la manera en que los niños se involucraron activamente con el prototipo.

Con este prototipo no solo busca resolver problemas ambientales inmediatos relacionados con la gestión inadecuada de residuos, sino también formar una nueva generación de ciudadanos conscientes del impacto de sus acciones en el entorno empleando la metodología STEAM y la robótica como lo menciona Zorrilla et. al (2025).

Finalmente, para futuras investigaciones es necesario mejorar el sistema de recolección, para no tener las limitantes que en este prototipo eran generadas por las pinzas del brazo, que dificultaba la clasificación.

REFERENCIAS

Acnur. (2023) ¿Cuáles son las consecuencias de no reciclar?, 20 septiembre. Disponible en: https://eacnur.org/es/blog/cuales-las-consecuencias-no-reciclar-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst (Accedido: 10 abril 2024).

Anglada, L., Cañadas, M.C. y Brizuela, B.M. (2025) Generalization among 5-Year-Olds in a Functional Context with Programmable Robot, *International Journal of Science and Mathematics Education*, 23(4), pp. 1057-1078. Disponible en: https://doi.org/10.1007/S10763-024-10495-X.

Arriols, E. (2022) *Contaminación por basura: causas y consecuencias*. Ecologiaverde, 1 abril. Disponible en: https://www.ecologiaverde.com/contaminacion-por-basura-causas-y-consecuencias-1777.html (Accedido: 10 abril 2024).

Bernache Pérez, G. (2012). Riesgo de contaminación por disposición final de residuos: Un estudio de la región centro occidente de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, *28*(1), 99-107. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000500014&lng=es&tlng=es

Casado, F. R. y Checa, R. M. (2020). Robótica y Proyectos STEAM: Desarrollo de la creatividad en las aulas de Educación Primaria. *Píxel-BIT Revista de medios y educación,* 58(1), p.p. 51-69. Recuperado de https://recyt.fecyt.es/index.php/pixel/index

Corraliza y Collado (2019) *Conciencia ecológica y experiencia ambiental en la infancia*. Papeles del Psicólogo, vol. 40, pp. 190-196, doi: https://doi.org/10.23923/pap.psicol2019.2896

Encalada, C. J., Matías, O. J., Cruz, N. S., Arboleda, B. M. y Riofrio, O. O. (2025). Potenciando las competencias digitales en la comunidad utilizando robótica educativa con enfoque steam, Estudios y perspectivas revista científica y académica, 5(1), p.p. 71-82. Disponible en: DOI: https://doi.org/10.61384/r.c.a.v5i1

Inegi (2020) *Residuos sólidos*. Inegi. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/temas/residuos/ (Accedido: 05 noviembre 2023).

Iberdrola. (2024) *Reciclaje para niños. El juego del reciclaje o cómo concienciar a los niños*. Disponible en: https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/reciclaje-para-ninos (Accedido: 10 enero 2024).

Marcillo, Fabricio. (2024) *Uso de aplicaciones móviles para la concienciación del reciclaje de desechos electrónicos en estudiantes de nivel superior de educación en Ecuador*. Revista Científica Kosmos, 24 de julio 2024. Disponible en: https://doi.org/10.62943/rck.v3n2.2024.91 (Accedido: 05 agosto 2024).

Natuyser. (2020) *¿Cómo concienciar a los niños de la importancia del reciclaje?*. Natuyser, 27 febrero. Disponible en: https://natuyser.es/blog/como-concienciar-a-los-ninos-de-la-importancia-del-reciclaje (Accedido: 10 abril 2025).

ONU. (2024) *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas, 13 noviembre. Disponible en: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/ (Accedido: 10 abril 2025).

Sanchez Tendero, E., Cozár Gutiérrez, R. & Gonzales Calero Somoza, J. A., 2019. Robótica en la enseñanza de conocimiento e interacción con el entorno. Una investigación formativa en Educación Infantil. *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado,* pp. 11-28.

Semarnat (2023) *Informe del Medio Ambiente*. Semarnat. Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap5.html#tema0 (Accedido: 10 noviembre 2023).

Zorrilla, P. J., Lores, G. B., Martínez, R. S. y Ruiz L. J. (2023). El papel de la robótica en educación infantil: revisión sistemática para el desarrollo de habilidades. RiiTE 15 (1), pp. 188-194, doi: https:// doi.org/10.6018/riite.586601

Self-Regulated Learning Models in Intelligent Learning Environments: a literature review

Miguel Couoh-Novelo *; Yasmín Hernández **; Javier Ortíz-Hernández ***

**Tecnológico Nacional de México / CENIDET (Tel: 9861002196; e-mail: d23ce164@cenidet.tecnm.mx; yasmin.hp@cenidet.tecnm.mx; javier.oh@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: Self-regulated learning has acquired a fundamental role in the design of personalized learning environments such as Intelligent Tutoring Systems. A literature review of the main theoretical models of self-regulated learning is presented, highlighting their key components, pedagogical applications, and implementation methods in intelligent environments. Through a critical analysis, we examine how these models contribute to improving student autonomy, optimizing metacognitive monitoring, and dynamically adapting instruction based on performance. Representative examples of Intelligent Tutoring Systems, such as MetaTutor, AutoTutor, and nStudy, which incorporate self-regulation strategies to promote meaningful learning, are also discussed. It is concluded that an effective integration of these models into ITS enhances learning personalization and fosters metacognitive skills that are transferable to diverse contexts.

Keywords: Self-regulated learning; Intelligent Tutoring Systems; Metacognition; Educational models; Learning personalization; Educational artificial intelligence.

1. INTRODUCCIÓN

El aprendizaje autorregulado (AAR) ha cobrado una relevancia creciente en el contexto educativo contemporáneo, particularmente en entornos mediados por tecnologías digitales. Se entiende como un proceso activo mediante el cual los estudiantes establecen metas de aprendizaje, monitorean y regulan su cognición, motivación y comportamiento, y reflexionan sobre su progreso y resultados (Zimmerman, 2002). En paralelo, los sistemas tutores inteligentes (STI) han demostrado ser herramientas eficaces para adaptar la instrucción a las necesidades del estudiante mediante inteligencia artificial, minería de datos educativos y modelado cognitivo.

La integración de modelos de AAR en STI ha sido un enfoque prometedor para promover la autonomía, la metacognición y el rendimiento académico. Sin embargo, existen múltiples modelos teóricos de AA que difieren en sus supuestos, estructura, procesos y potencial de implementación tecnológica. Este artículo ofrece una revisión técnica comparativa de los principales modelos de aprendizaje autorregulado implementados en sistemas tutores inteligentes: Zimmerman, Pintrich, Azevedo y Winne & Hadwin (COPES). Además, se analizan sus componentes, mecanismos y aplicaciones concretas en sistemas como MetaTutor, nStudy, Cognitive Tutor y otros.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Aprendizaje Autorregulado

El aprendizaje autorregulado (AAR) se refiere a los procesos mediante los cuales los estudiantes activamente planifican, supervisan, controlan y regulan sus cogniciones, motivaciones y comportamientos en función de metas personales y características contextuales del entorno de aprendizaje (Zimmerman, 2002; Schunk & Greene, 2018).

Uno de los enfoques más influyentes en la conceptualización del AAR es el modelo de Zimmerman (2000), que postula un ciclo de tres fases:

- Fase de planificación previa al desempeño, donde los estudiantes establecen metas y eligen estrategias de estudio;
- Fase de desempeño, que implica el monitoreo y control de la atención, el esfuerzo y el uso de estrategias;
- Fase de autorreflexión, donde se evalúa el rendimiento y se extraen conclusiones que afectan la motivación y los futuros ciclos de estudio.

Este modelo ha sido validado en múltiples disciplinas, desde matemáticas hasta ciencias y lectura (Panadero, 2017). La integración de aspectos motivacionales, como la autoeficacia, es fundamental, ya que los estudiantes con alta autoeficacia tienden a establecer metas más desafiantes y persistir ante la dificultad (Bandura, 1997).

Por su parte, Pintrich (2000) ofrece un modelo de AAR más amplio, que incluye cuatro áreas de regulación: cognitiva, motivacional, conductual y contextual. Este enfoque destaca cómo los estudiantes regulan no solo su pensamiento, sino también sus emociones, recursos, y la interacción con el entorno de aprendizaje. La dimensión contextual es clave para el diseño de entornos adaptativos como los sistemas tutores inteligentes.

Azevedo y Cromley (2004) proponen un modelo de AAR específico para entornos hipermediales de aprendizaje, enfatizando la necesidad de monitorear y controlar variables

metacognitivas durante la navegación y el procesamiento de información en entornos digitales. Este modelo distingue entre estrategias cognitivas (resumir, organizar, repetir), metacognitivas (monitoreo, planificación, evaluación), motivacionales (esfuerzo, persistencia) y comportamentales (buscar ayuda, uso de recursos).

Además, Winne y Hadwin (1998) presentan el modelo COPES, que describe el aprendizaje como una serie de ciclos compuestos por Condiciones (C), Operaciones (O), Productos (P), Evaluaciones (E) y Estándares (S). Este modelo permite un análisis granular del proceso de aprendizaje y se basa en el procesamiento de la información como actividad cognitiva estructurada.

En síntesis, los modelos de aprendizaje autorregulado coinciden en la importancia de que el estudiante tome un rol activo en su aprendizaje, pero difieren en el grado de énfasis que ponen en los factores motivacionales, contextuales y tecnológicos.

2.2 Sistemas Tutores Inteligentes con Aprendizaje Autorregulado

Los Sistemas Tutores Inteligentes (STI) son entornos de aprendizaje computarizados que utilizan inteligencia artificial para ofrecer enseñanza personalizada. Estos sistemas imitan el comportamiento de un tutor humano mediante componentes como:

Módulo experto: conocimiento que se quiere enseñar, Modelo del estudiante: representación del conocimiento, habilidades, errores y estilos de aprendizaje del alumno, Módulo tutor: estrategias de instrucción que el sistema aplica, Módulo de Interfaz de comunicación: medio a través del cual se interactúa con el usuario.

Según VanLehn (2006), los STI pueden lograr niveles de efectividad cercanos a los de un tutor humano experto cuando están bien diseñados. El papel de los modelos de AAR en estos sistemas es permitir el diagnóstico de las estrategias autorreguladoras del estudiante y adaptar la retroalimentación y el contenido para fomentar una mayor autonomía.

En este sentido, sistemas como MetaTutor, nStudy o AutoTutor han implementado modelos sofisticados de AAR que permiten rastrear variables como la planificación, el monitoreo, la regulación emocional o la persistencia en tareas complejas (D'Mello & Graesser, 2012; Azevedo et al., 2010).

Asimismo, los STI apoyados en aprendizaje automático permiten detectar patrones en los comportamientos del usuario y predecir con alta precisión si un estudiante está aplicando estrategias efectivas de aprendizaje autorregulado, permitiendo intervenciones oportunas (Baker & Inventado, 2014).

2.3 Modelos de Aprendizaje Autorregulado y su implementación en un Sistema tutor inteligente.

2.3.1 Modelo de Zimmerman

Es uno de los modelos más influyentes y utilizados, define el AAR como un ciclo con tres fases: Planificación que es el establecimiento de metas y estrategias, Ejecución y monitoreo que consiste en dar seguimiento a las tareas, la atenciónу persistencia y Autorreflexión que consiste en autoevaluar y revisar las atribuciones causales.

La implementación que se ha realizado en un STI es en Cognitive Tutor (Carnegie Mellon), donde se modela el rendimiento del estudiante para adaptar tareas y evaluar progreso, aunque con un foco limitado en autorregulación emocional. También implementado en entornos tipo LMS con seguimiento de actividades autorreguladas (Serrano, 2018).

2.3.2 Modelo de Pintrich

Amplía la visión de Zimmerman incorporando componentes motivacionales y de contexto. Sus cuatro dominios son: Cognitivo, Motivacional, Comportamental, Contextual.

La implementación realizada en un STI es el SGAME-21, que monitorea no solo desempeño, sino participación activa, interés y variables afectivas mediante herramientas de gamificación y retroalimentación emocional (Bruno & Salgado, 2024).

2.3.3 Modelo de Azevedo

Basado en estudios con sistemas hipermedia (BioTutor, MetaTutor). Integra procesos como Activación del conocimiento previo, Planeación de navegación, Monitoreo de comprensión y Ajuste de estrategias.

La implementación en STI es MetaTutor es uno de los STI más avanzados para el estudio del AA. Integra eye-tracking, análisis de diálogo, navegación y autoinformes para adaptar contenido. Provee andamiaje y feedback metacognitivo en tiempo real (Azevedo et al., 2010).

2.3.4 Modelo COPES (Winne & Hadwin)

Modelo estructural que descompone el aprendizaje en cinco elementos computables, Conditions (internas y externas), Operations (procesos cognitivos), Products (resultados intermedios), Evaluations (comparaciones) y Standards (criterios de éxito)

La implementación realizada en un STI es nStudy un entorno de aprendizaje basado en COPES que registra digitalmente todas las acciones del estudiante, permitiendo análisis detallado de la autorregulación. Facilita retroalimentación, visualización de estrategias y adaptación del contenido (Winne, 2011).

3. METODOLOGÍA

Para la comparación de los modelos de aprendizaje autorregulado en sistemas tutores inteligentes, se ha realizado una revisión documental de literatura académica indexada en bases como Scopus, IEEE Xplore y SpringerLink. Se seleccionaron casos representativos donde se implementaron explícitamente modelos de AAR en STI con datos de

funcionamiento, validación empírica o aplicación en contextos reales.

Los criterios de comparación se basaron en Estructura del modelo (fases, componentes), Tipo de integración en el sistema tutor inteligente, Tipo de sistema (hipermedia, basado en reglas, adaptativo), Nivel de adaptabilidad y trazabilidad del estudiante, Nivel de intervención del tutor (feedback, monitoreo) y Resultados de eficacia reportados.

4. ANÁLISIS DE MODELOS DE APRENDIZAJE AUTORREGULADO

A continuación, se presenta una comparativa detallada de los modelos abordados, considerando sus características estructurales, capacidades de implementación en sistemas tutores inteligentes y tipos de adaptación pedagógica.

Tabla 1. Modelos de aprendizaje autorregulado

Modelo	Fases o Componentes	Implementación en STI	Fortalezas	Limitaciones
Zimmerman	Planificación, ejecución, autorreflexión	Cognitive Tutor, TuinLECweb	Claridad estructural, aplicabilidad general, énfasis en el ciclo de mejora continua	Limitada incorporación del componente emocional y del contexto
Pintrich	Cognitivo, motivacional, comportamental, contextual	SGAME-21, sistemas con gamificación	Considera la motivación, contextos sociocultural es, más integral	Menor formalización computacional
Azevedo	Activación del conocimiento, navegación, monitoreo, regulación	MetaTutor, BioTutor	Fuerte adecuación a entornos digitales, detallado monitoreo metacognitivo	Alta complejidad técnica, dependencia de sensores
Winne & Hadwin (COPES)	Conditions, Operations, Products, Evaluations, Standards	nStudy	Modelo computacional riguroso, ideal para trazabilidad de acciones	Requiere alta infraestructura para registrar eventos de aprendizaje

4.1 Discusión Comparativa

Los puntos que se toman en cuenta para comparar los modelos de AAR son: Adaptabilidad: Azevedo y COPES ofrecen mayor potencial para adaptación en tiempo real debido a su orientación digital y trazabilidad metacognitiva.
Formalización computacional: COPES destaca por su arquitectura que puede mapearse directamente en un modelo del estudiante, lo que facilita decisiones automáticas.
Foco emocional y motivacional: Pintrich sobresale por integrar constructos motivacionales, lo que puede enriquecer STI en tareas que requieren persistencia o trabajo autónomo.
Facilidad de implementación: El modelo de Zimmerman, por su estructura clara y generalista, es más sencillo de aplicar en sistemas educativos básicos, aunque menos potente en personalización.

Tabla 2. Tipos de implementación en STI

Modelo	Tipo de STI	Nivel de intervención	Tecnologías utilizadas
Zimmerman	Basado en reglas, LMS adaptativo	Medio (feedback, selección de tareas)	Reglas adaptativas, análisis de desempeño
Pintrich	STI con gamificación, adaptativo	Medio-Alto (soporte emocional y motivacional)	Gamificación, monitoreo de variables afectivas
Azevedo	Hipermedia inteligente	Alto (andamiaje metacognitivo en tiempo real)	Sensores, eye-tracking, análisis de discurso
COPES	Basado en trazabilidad cognitiva	Alto (monitoreo detallado y feedback computacional)	Minería de datos educativos, registro digital exhaustivo

4.2 Discusión tipo de intervención

En la tabla 2 se presenta el nivel de intervención tomando en cuenta hasta qué punto el STI influye o responde al comportamiento de aprendizaje autorregulado del estudiante y en las tecnologías, las herramientas necesarias para implementar eficazmente las funciones propias del modelo. En el nivel de intervención se tomó en cuenta la Granularidad temporal, si se interviene sólo al final de un ejercicio o varias veces; Profundidad cognitivo metacognitiva, si corrige la respuesta o detecta procesos mentales más sutiles; Dimensión afectivo-motivacional, si atiende sólo lo cognitivo o también emociones y motivación; Densidad de datos y algoritmos, si basta con reglas simples o requiere sensores, trazas ricas y modelos predictivos, combinando estos ejes se le asignó de bajo a muy alto.

Zimmerman, en medio ya que el tutor se adapta con reglas relativamente simples: selecciona tareas y da retroalimentación según la fase del aprendizaje autorregulado, no necesita rastrear micro procesos ni variables fisiológicas, pero sí registrar desempeño y ofrecer pistas inmediatas. Pintrich medio alto ya que además de lo cognitivo incorpora la dimensión motivacional afectiva, añade mecánicas de gamificación y detección de des/compromiso para sostener la motivación, lo que exige instrumentar eventos emotivos y métricas de persistencia. Azevedo, alto ya que está diseñado para hipermedia abierta; su andamiaje es metacognitivo en tiempo real, combinan log de clics, eye tracking, análisis semántico y agentes que lanzan prompts al detectar estrategias ineficaces. Esa instrumentación eleva la intervención porque el tutor reacciona cada pocos segundos a eventos complejos. COPES, alto porque formaliza el aprendizaje autorregulado como evento computacional, capturan trazas detalladas de cada operación cognitiva, aplican analítica y generan

retroalimentación automatizada sobre desviaciones respecto a los estándares internos del estudiante. Requiere big data educativo y modelos de inferencia para intervenir con alta frecuencia.

Tabla 3. Nivel Técnico Requerido

Modelo	**Fortalezas clave**	**Ideal para STI de tipo...**	**Nivel técnico requerido**
Zimmerman	Ciclo claro y práctico	Básicos, adaptativos por reglas	Bajo
Pintrich	Motivación y contexto	Gamificados, con retro emocional	Medio
Azevedo	Navegación y metacognición digital	Hipermedias inteligentes	Alto
COPES	Formalización computacional	Basados en trazabilidad y big data	Muy alto

4.3 Discusión Nivel técnico requerido

El criterio nivel técnico requerido que se presenta en la tabla 3 se refiere a la complejidad tecnológica y computacional necesaria para implementar de forma efectiva cada modelo de aprendizaje autorregulado dentro de un sistema tutor inteligente, tomando en cuenta la Necesidad de instrumentación tecnológica por ejemplo que si se requieren sensores, trazas, analítica de datos; el Grado de modelado computacional, si el modelo puede representarse con estructuras simples o necesita algoritmos complejos; Capacidad de adaptación del STI, contemplando si basta con reglas lógicas o necesita procesamiento de lenguaje natural o redes bayesianas o algún otro algoritmo y el Soporte de datos, si el modelo puede funcionar con observaciones generales o requiere datos en tiempo real.

Lo que se puedo observar de cada modelo y con lo que se clasificó fue que en Zimmerman el modelo se basa en fases fácilmente observables, se implementa con reglas simples, sin IA compleja y es apto para sistemas de tutoría básicos. Pintrich integra motivación, cognición y conducta, lo que requiere recopilar datos mas diversos, se usa junto con cuestionarios autorreportados o variables de motivación, su implementación exige un motor de inferencia más robusto que simples reglas. Azevedo está diseñado para ambientes digitales complejos, requiere rastrear acciones del estudiante (clics, navegación, tiempo) para inferir metacognición, implica el uso de análisis de aprendizaje, seguimiento de navegación y detección de estrategias. COPES, formaliza internamente las condiciones, operaciones y evaluaciones, necesita trazabilidad en tiempo real, representación de productos cognitivos e incluso inferencia sobre estándares internos del estudiante, es ideal para sistemas con big data, IA generativa y modelos computacionales avanzados y para implementarlo se requiere usar modelos predictivos, análisis de trazas finas y arquitecturas modulares.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La integración de modelos de aprendizaje autorregulado en sistemas tutores inteligentes representa una convergencia clave entre teoría educativa y tecnología adaptativa. A través del análisis realizado, se destaca que cada modelo ofrece fortalezas particulares.

Zimmerman aporta claridad estructural y versatilidad, Pintrich enfatiza la motivación y el contexto, ideal para entornos personalizados, Azevedo permite andamiaje metacognitivo dinámico en entornos ricos en medios, COPES proporciona una arquitectura computacional robusta para modelar la autorregulación en detalle.

Sin embargo, no existe un modelo universal. La elección del modelo depende de múltiples factores: propósito educativo, infraestructura disponible, nivel de intervención deseado y perfil del estudiante. La tendencia actual sugiere una combinación de modelos que integren lo cognitivo, motivacional y computacional en entornos inteligentes.

Entre las futuras líneas de investigación que se puede proponer fusionar los modelos de AAR con IA generativa y aprendizaje automático para retroalimentación autónoma, evaluación longitudinal de la autorregulación con biométricas y sensores, integración de modelos emocionales junto con AAR para contextos complejos, estudio del impacto del AAR en el aprendizaje colaborativo dentro de STI, diseño de tutores que evolucionen con el perfil autorregulado del estudiante.

Entre las recomendaciones para el diseño de STI con modelos de AAR, son seleccionar el modelo según el objetivo pedagógico: Zimmerman para refuerzo general; COPES para trazabilidad computacional avanzada.

Incluir módulos metacognitivos explícitos: como monitoreo de estrategias, autoevaluación y reflexión post-tarea y utilizar tecnologías de seguimiento (eye-tracking, análisis de clics, sensores) en casos de uso con Azevedo o COPES.

REFERENCIAS

Azevedo, R., & Cromley, J. G. (2004). Does training on self-regulated learning facilitate students' learning with hypermedia? *Journal of Educational Psychology, 96*(3), 523–535. https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.3.523

Azevedo, R. (2005). *The role of self-regulated learning in problem solving: A research agenda*. In Proceedings of the International Conference on Learning Sciences (pp. 1-10).

Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. W. H. Freeman.

Baker, R. S. J. d., & Inventado, P. S. (2014). Educational data mining and learning analytics. In J. A. Larusson & B. White (Eds.), *Learning Analytics: From Research to Practice* (pp. 61–75). Springer.

Bruno Aguirre, M., & Salgado Montiel, M. C. (2024). Evaluación del aprendizaje autorregulado en actividades

de un sistema tutor utilizando inteligencia artificial. *Universidad de Córdoba*.

D'Mello, S. K., & Graesser, A. (2012). AutoTutor and affective autotutor: Learning by talking with cognitively and emotionally intelligent computers that talk back. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS), 2*(4), 1–39.

Panadero, E. (2017). A Review of Self-regulated Learning: Six Models and Four Directions for Research. *Frontiers in Psychology, 8*, 422. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00422

Pintrich, P. R. (2000). *The role of goal orientation in self-regulated learning*. Handbook of self-regulation, 451-502.

Serrano, M. Á. (2018). Teaching Self-regulation Strategies via an Intelligent Tutoring System. *Journal of Computer Assisted Learning*, 34(3), 234-246.

Schunk, D. H., & Greene, J. A. (Eds.). (2018). *Handbook of Self-Regulation of Learning and Performance* (2nd ed.). Routledge.

VanLehn, K. (2006). The Behavior of Tutoring Systems. *International Journal of Artificial Intelligence in Education, 16*, 227–265.

Winne, P. H., & Hadwin, A. F. (1998). *Studying as self-regulated learning*. In D. J. Hacker, J. Dunlosky, & A. C. Graesser (Eds.), *Handbook of metacognition in education* (pp. 277-304). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

Winne, P. H. (2011). A cognitive and metacognitive analysis of self-regulated learning. In *Handbook of Self-Regulation of Learning and Performance*.

Winne, P. H. (2017). Learning analytics for self-regulated learning. In Lang, C. et al. (Eds.), *The Handbook of Learning Analytics* (pp. 241–249). Society for Learning Analytics Research (SoLAR).

Zimmerman, B. J. (2002). *Becoming a self-regulated learner: An overview*. Theory into practice, 41(2), 64-70.

Zimmerman, B. J. (2000). Attaining self-regulation: A social cognitive perspective. In M. Boekaerts, P. R. Pintrich, & M. Zeidner (Eds.), *Handbook of Self-Regulation* (pp. 13–39). Academic Press.

.

Automated IoT System for Vertical Hydroponics at Home with Real-Time Monitoring and Control

Reyes Ruíz, Yazmin *, Toledo Espinoza, Luis Eddie*, Moreno Moreno, Christopher Yahir*, Vicente Pérez, José Julián*, Vázquez Albores, Luis David*, Díaz Hernández, Carlos Alberto*, Hernández Mendoza, Alonso Guadalupe*

** Universidad Politécnica de Chiapas/Ingeniería en Software, Carretera Tuxtla Gutiérrez - Portillo Zaragoza Km 21+500, Colonia Las Brisas, 29150. (e-mail: 221262@ids.upchiapas.edu.mx, 223191@ids.upchiapas.edu.mx, 223209@ids.upchiapas.edu.mx, 223236@ids.upchiapas.edu.mx, 223246@ids.upchiapas.edu.mx, cdiaz@ids.upchiapas.edu.mx, ahernandez@ids.upchiapas.edu.mx).*

Abstract: This article presents the design and implementation of an automated vertical hydroponics system based on IoT technologies, aimed at the efficient cultivation of vegetables in urban domestic environments. The system combines environmental monitoring hardware such as temperature, humidity, pH, and electrical conductivity sensors with a technological infrastructure that includes a Raspberry Pi 4, an ESP32, and a web platform developed with Next.js and Node.js, hosted in the AWS cloud. A nutrient recirculation system and automated irrigation control using relay-managed pumps are implemented. The application allows the user to monitor and adjust growing conditions in real time from any connected device. In addition, statistical and predictive analysis functions are incorporated, with support for graphical visualizations and historical data storage. Experimental results show significant improvements in the stability of growing conditions and plant productivity. This system offers a sustainable, scalable, and accessible solution to promote smart urban agriculture. The integration of artificial intelligence algorithms for autonomous decisions in crop management is suggested as future work.

Keywords: IoT, Vertical Hydroponics, Automation, Urban Agriculture.

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de crecimiento urbano acelerado y creciente demanda de alimentos frescos, sostenibles y accesibles, la agricultura urbana ha tomado relevancia como una alternativa viable para enfrentar los retos de seguridad alimentaria. Entre las técnicas más prometedoras destaca la hidroponía vertical, que permite el cultivo de plantas sin suelo en estructuras modulares, optimizando el uso del espacio, del agua y de los nutrientes [1]. No obstante, uno de los desafíos más importantes en este tipo de sistemas es la gestión precisa y constante de las condiciones ambientales y nutricionales, lo cual puede ser una limitación significativa para los usuarios domésticos sin conocimientos especializados. Desde un marco teórico que integra principios de la agricultura de precisión, la tecnología IoT (Internet de las cosas) y la automatización inteligente, este trabajo se enfoca en el desarrollo de un sistema que permita gestionar cultivos hidropónicos verticales en casa, de manera automatizada, eficiente y remota [2]. La literatura reciente respalda el uso de IoT en sistemas de agricultura controlada [3]. Por ejemplo, estudios como el de León et al. (2019) proponen arquitecturas basadas en sensores para la gestión de hidroponía inteligente, mientras que Guevara (2022) demuestra la viabilidad de aplicar redes de sensores y algoritmos de aprendizaje supervisado para el riego en cultivos específicos

El sistema propuesto, combina sensores ambientales, una interfaz web desarrollada en Next.js y un backend en Node.js con procesamiento distribuido en la nube de AWS. A través de este diseño, se busca mejorar la experiencia del usuario y optimizar las condiciones del cultivo mediante análisis de datos en tiempo real, generación de gráficas, y modelado probabilístico. Por lo tanto, este artículo presenta resultados del sistema hidropónico vertical, incluyendo el diseño, implementación y validación inicial del sistema en un entorno doméstico simulado. Se exponen los avances en recolección y análisis de datos, respuesta del sistema automatizado ante condiciones cambiantes, y visualización de variables clave como temperatura, humedad y pH.

2. METODOLOGÍA

El diseño experimental se centró en la implementación y evaluación de una torre hidropónica vertical inteligente, controlada mediante un sistema de monitoreo IoT. La torre está conformada por un tubo central de PVC de 4 pulgadas de diámetro que actúa como soporte estructural y canal de distribución de agua y nutrientes. En su interior se aloja una manguera flexible de ½ pulgada de diámetro, encargada de transportar la solución nutritiva desde el reservorio hacia la parte superior del sistema, desde donde se distribuye por gravedad. La altura estándar del prototipo es de aproximadamente 150 cm, permitiendo un cultivo vertical eficiente en espacios reducidos. El sistema es expansible en altura, sin embargo, su límite funcional está condicionado por la capacidad de la bomba interna de 12 volts, que impulsa el flujo desde el tanque base. Esta bomba define la altura máxima a la que la solución puede ser recirculada de forma eficaz. Cada nivel de cultivo posee tres orificios equidistantes para la inserción de plántulas, dispuestas de forma helicoidal a lo largo del tubo. Para esta evaluación, se empleó lechuga (Lactuca sativa) como especie modelo, seleccionada por su rápido crecimiento y compatibilidad con sistemas hidropónicos verticales (Figura 1.). En la parte tecnológica, se definió una arquitectura cliente-servidor con comunicación entre dispositivos IoT y la nube mediante el protocolo MQTT, y una interfaz web desarrollada con Next.js para la visualización y control remoto.



Fig. 1. Torre hidropónica vertical inteligente.

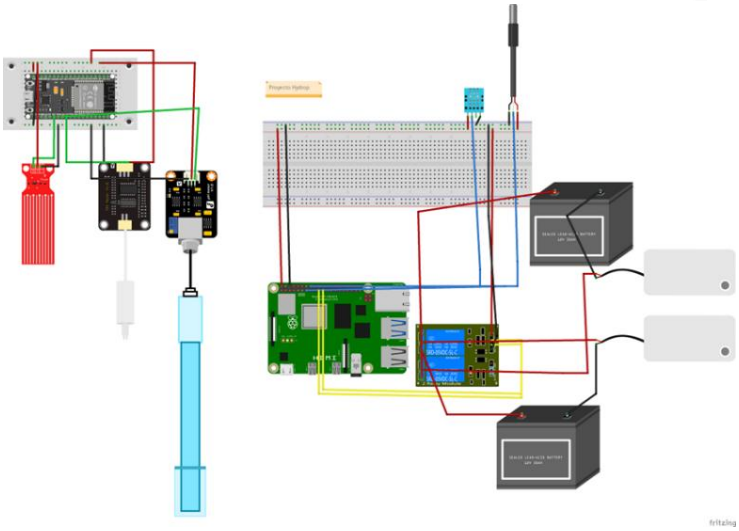


Fig. 2. Diagrama de conexión del sistema hidropónico vertical.

2.1 Desarrollo de hardware y sensores

El circuito fue diseñado para operar con una arquitectura distribuida basada en una Raspberry Pi 4 modelo B, que actúa como unidad central de procesamiento (CPU del sistema), y una ESP32, encargada de la adquisición y transmisión de datos de sensores secundarios. La interconexión de componentes se realizó mediante buses de comunicación I2C y GPIO, priorizando eficiencia energética y simplicidad en el cableado.

2.1.1 Integración de sensores

El sistema cuenta con los siguientes sensores integrados al circuito:

- DHT11 para la medición de temperatura y humedad ambiental.
- DS18B20 para la temperatura del agua.
- PH4502C para monitoreo del pH, calibrado en un rango de 4 a 10.
- TDS Meter para medir la conductividad eléctrica, indicador indirecto de concentración de nutrientes.
- Sensor de nivel de agua, configurado como interruptor lógico en el GPIO.

Todos estos sensores están interconectados con la ESP32 o la Raspberry Pi, dependiendo de la sensibilidad de sus lecturas y frecuencia de muestreo, para evitar interferencias y asegurar precisión. Además, el sistema incluye dos bombas de agua controladas mediante un módulo de relé de 2 canales de 5V, el cual permite manejar cargas de corriente alterna de forma segura desde salidas digitales de bajo voltaje. Por otro lado, La alimentación del sistema se realiza mediante una fuente de 12V DC. Se emplean reguladores internos en la Raspberry Pi y la ESP32 para reducir la tensión a 5V y 3.3V.

2.1.2 Diagrama de conexión

En la Figura 2 se muestra el diagrama esquemático del circuito, donde se visualiza la interconexión de todos los elementos descritos. Este diseño fue validado mediante simulaciones previas y pruebas de prototipado en protoboard antes de su implementación definitiva en una placa base personalizada.

2.3 Desarrollo de software

El software del sistema se divide en tres niveles:

- Frontend: Interfaz web responsiva implementada en Next.js, que permite al usuario visualizar datos en tiempo real y controlar los parámetros del sistema.
- Backend: Desarrollado en Node.js con soporte en TypeScript para garantizar robustez y escalabilidad.
- Análisis de datos: Módulos en Python procesan los datos históricos para generar estadísticas, gráficas e inferencias probabilísticas.

2.3.1. Descripción de la lógica de control y ubicación del control

La lógica de control reside mayormente en la instancia EC2 que aloja el backend, donde se ejecutan scripts que interpretan las lecturas del sensor y comparan los valores contra umbrales definidos por el usuario. En función de esto, se emiten comandos MQTT que activan o desactivan los relés controladores de las bombas. La Raspberry Pi actúa como puente de comunicación, ejecutando las acciones locales, mientras que la lógica de decisión está centralizada en la nube para facilitar actualizaciones y mantenimiento remoto.

2.4 Arquitectura general

Se implementó una arquitectura distribuida basada en el modelo cliente-servidor, donde los dispositivos IoT (sensores y actuadores conectados a la Raspberry Pi y ESP32) funcionan como clientes que transmiten datos a servicios en la nube mediante el protocolo MQTT. Estos datos son procesados por un consumidor de mensajes desplegado en una instancia EC2 de Amazon Web Services (AWS). Por otro parte, el servidor backend, también alojado en AWS, administra las peticiones de la interfaz web desarrollada en Next.js, y se comunica con una base de datos MySQL alojada en una instancia RDS, donde se almacena la información histórica del cultivo.2.4.1 Comunicación entre componentes

Para la comunicación entre componentes del sistema se emplearon los siguientes protocolos y servicios:

- MQTT (Message Queuing Telemetry Transport): protocolo ligero para la transmisión eficiente de datos desde los dispositivos IoT al broker de mensajes en la nube (CloudAMQP).
- RabbitMQ: sistema de mensajería que permite el desacoplamiento entre la llegada de datos y su procesamiento, garantizando confiabilidad y escalabilidad.
- WebSocket: para actualizaciones en tiempo real entre backend y frontend.
- HTTPS y JWT: empleados para proteger las comunicaciones y autenticar usuarios de la plataforma web.

2.4.2 Infraestructura en la nube

La solución se desplegó utilizando servicios en la nube de AWS, organizados de la siguiente manera:

- Instancia EC2 para backend: aloja la lógica del sistema y APIs de control.
- Instancia EC2 para WebSocket: gestiona la comunicación en tiempo real entre la interfaz web y el backend.
- Instancia EC2 para el consumidor MQTT: recibe los datos de los sensores y los almacena.
- RDS MySQL: base de datos para el almacenamiento persistente de los registros.

2.4.3 Seguridad y control de acceso

Se implementaron diversas capas de seguridad para proteger la red del sistema:

- Firewall UFW (Uncomplicated Firewall): configuración de puertos y servicios permitidos.
- fail2ban: herramienta para detección y bloqueo de accesos maliciosos.
- Web Application Firewall (WAF): protección contra ataques web como inyecciones SQL y XSS.

2.4.4 Diagrama de red

El diagrama de red fue validado mediante pruebas de rendimiento bajo carga simulada y análisis de latencia en la comunicación entre sensores y servidor web. La estructura modular permite escalar el sistema para soportar mayor número de nodos IoT sin comprometer la estabilidad. En la Figura 3, se presenta el diagrama de red que resume la interacción entre todos los componentes del sistema.

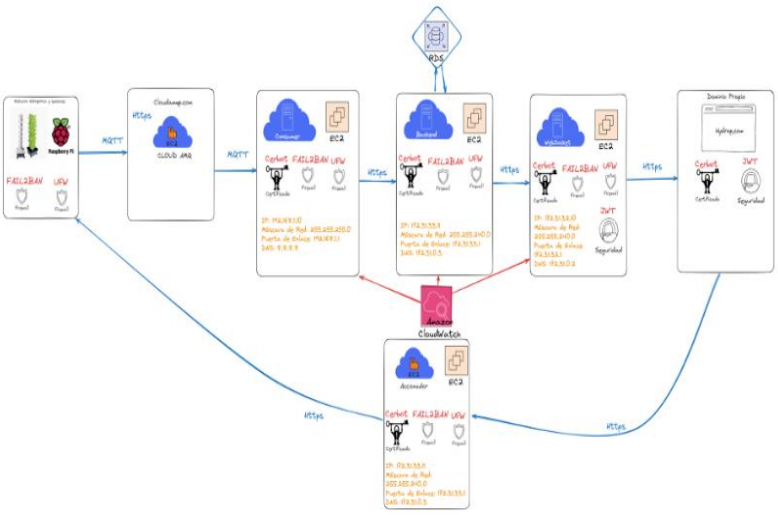


Fig. 3. Diagrama de red del sistema hidropónico vertical.

2.5 Validación experimental

El sistema fue validado en un entorno doméstico simulado. Durante una semana se recolectaron datos cada 2 segundos de las variables monitoreadas. Se aplicaron análisis estadísticos y probabilísticos para evaluar la estabilidad del sistema, la precisión en la regulación del riego, el comportamiento del pH y la temperatura, y la respuesta ante condiciones anómalas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Uno de los primeros elementos evaluados durante la validación funcional del sistema hidropónico vertical fue el proceso de ingreso a la aplicación web. Tal como se muestra en la Figura 4, el sistema presenta una pantalla de inicio de sesión limpia, moderna e intuitiva, diseñada para facilitar el acceso tanto a usuarios novatos como experimentados. Así mismo, la interfaz integra elementos visuales relacionados con el cultivo hidropónico. El formulario de acceso incluye campos claramente definidos para correo electrónico y contraseña, con íconos que mejoran la usabilidad y comprensión del formulario.

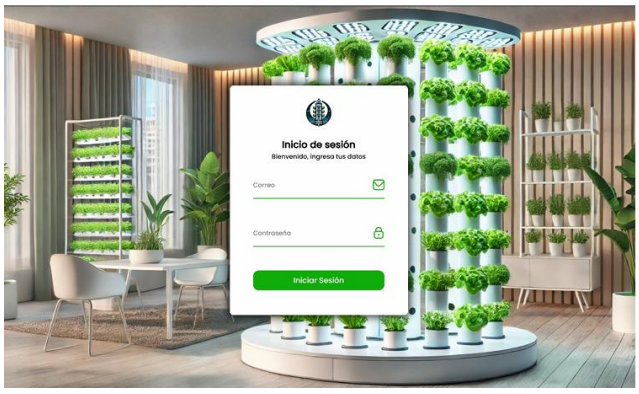


Fig. 4. Inicio de sección de la aplicación del sistema hidropónico vertical.

Una vez autenticado el usuario, el sistema redirige automáticamente a la página de inicio, donde se despliega un panel personalizado con las estaciones hidropónicas asignadas. La Figura 5 muestra cómo sistema organiza visualmente estas estaciones, presentando imágenes representativas de cada unidad junto a su nombre y localización geográfica. Esta visualización permite al usuario identificar rápidamente sus estaciones activas, facilitando el acceso a funciones de monitoreo, configuración y análisis. Por otro parte, en el panel lateral izquierdo, se observa un menú de navegación accesible que incluye accesos directos a secciones.

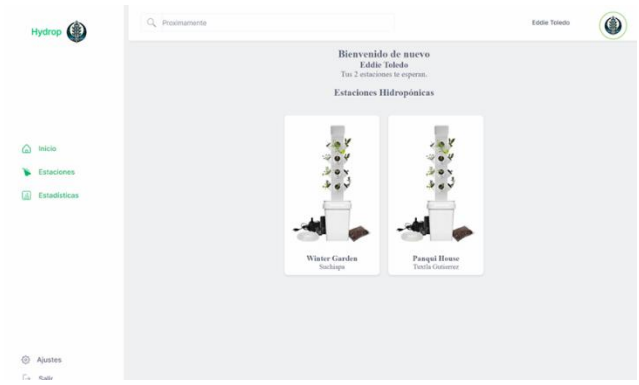


Fig. 5. Página de inicio de la aplicación del sistema hidropónico vertical.

Uno de los componentes esenciales del sistema hidropónico vertical es su capacidad de supervisión en tiempo real a través de sensores integrados. La Figura 6 muestra la interfaz de gestión de sensores correspondiente a una estación hidropónica específica. Esta sección permite visualizar de forma estructurada datos críticos como temperatura, humedad, conductividad, nivel de agua y pH. Además, cada parámetro se presenta acompañado de indicadores visuales de estado, los cuales informan si el valor se encuentra dentro del rango óptimo. Este enfoque no solo mejora la toma de decisiones por parte del usuario, sino que también facilita una respuesta inmediata ante desviaciones que pudieran afectar el desarrollo de las plantas.

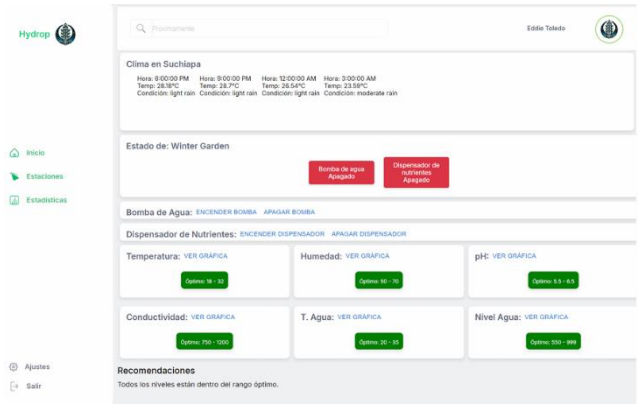


Fig. 6. Visualización y gestión de sensores en tiempo real.

Una funcionalidad destacada del sistema hidropónico vertical es el acceso al historial de datos generados por los sensores en cada estación hidropónica. Esta característica permite a los usuarios consultar registros previos de temperatura, humedad, pH, conductividad eléctrica y nivel de agua, todos organizados de manera cronológica y visualizados mediante gráficas interactivas. El historial de datos no solo facilita el seguimiento del comportamiento de las variables ambientales a lo largo del tiempo, sino que también posibilita la identificación de patrones y tendencias relevantes para el crecimiento vegetal. Como se observa en la Figura 7.

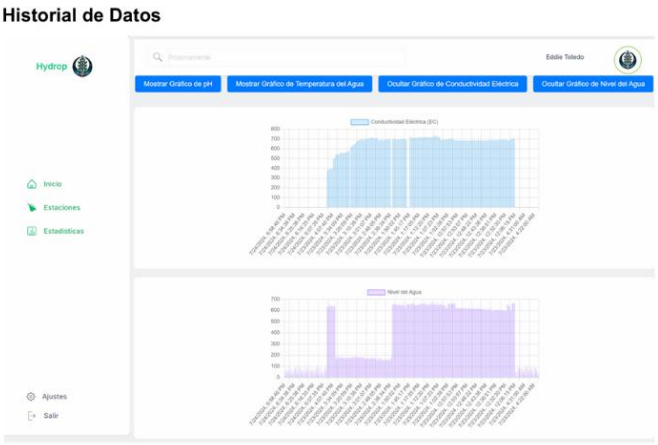


Fig. 7. Historial de datos de los sensores.

La navegación por la aplicación fue fluida e intuitiva. Los usuarios pueden acceder fácilmente a sus estaciones hidropónicas, ver información específica y realizar configuraciones de manera rápida. La posibilidad de editar el nombre de estaciones y gestionar múltiples cultivos demuestra una arquitectura de sistema flexible y orientada al usuario final.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La plataforma del sistema vertical hidropónico ha demostrado ser una herramienta efectiva para la gestión integral de estaciones hidropónicas en entornos domésticos y urbanos. Su diseño orientado a la usabilidad, junto con una infraestructura tecnológica robusta, permite el monitoreo en tiempo real de variables ambientales críticas, así como el control preciso de dispositivos como bombas de riego. La interfaz gráfica, intuitiva y responsiva, facilita la interacción del usuario y optimiza la toma de decisiones mediante el análisis visual de datos históricos y patrones de comportamiento de los cultivos. La validación del sistema en condiciones reales confirma su viabilidad como herramienta tecnológica para la agricultura urbana sostenible. Futuros trabajos podrían enfocarse en la integración de inteligencia artificial para recomendaciones automatizadas y predicción de fallos, así como en el desarrollo de una aplicación móvil nativa para ampliar el acceso y la portabilidad del sistema.

REFERENCIAS

Kumar, R., Singh, P. and Sharma, V., (2023). Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things. International Journal of Smart Agriculture, 12(3), pp.145–156.

Ali, M., Rahman, M. and Yusuf, S., (2022). Smart hydroponic greenhouse enhanced with the application of the Internet of Things. Journal of Agricultural Technologies, 18(2), pp.101–112.

Hasan, N., Abdullah, A. and Karim, F., (2021). *On the design of Nutrient Film Technique hydroponics farm for smart agriculture*. International Journal of Smart Farming, 9(1), pp.35–42.

Guevara, R.E.A., (2022). Sistema autónomo de control y supervisión de condiciones nutricionales del agua mediante una red de sensores y algoritmos de aprendizaje supervisado para el regadío en cultivo de espinaca bajo condiciones de hidroponía NFT vertical. Tesis de licenciatura, Universidad Técnica Particular de Loja.

León, E.G., Arguijo, J.E.M., Arellano, C.C. and García, F.R.M., (2019). Propuesta de sistema de gestión inteligente basado en IoT para hidroponía. Research in Computing Science, 148(10), pp.219–233.

AI as an Extreme Expression of the Performance-Driven Society: Ally or Accomplice in Student Self-Exploitation? ⋆

Martinez Ortega, Jonatan Daniel *

* *Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnologico de Cuautla, Libramiento Cuautla-Oaxaca S/N Juan Morales, 62745 Cuautla, Mor. (e-mail: 20680302@cuautla.tecnm.mx).*

Abstract: When I began to ask myself how AI has changed the way we study, I realized it goes beyond just being a piece of software it reflects our obsession with doing more, faster. In my group of classmates at the Technological Institute of Cuautla, 85% use AI daily (62% to answer questions, 45% to write essays), and from that, two major dilemmas emerge: we gain efficiency, but lose the space to think; we share authorship, but are forced to redefine academic ethics. In this article, I share those findings and propose what I call an "ethics of pause": a reflective breath in the face of the dizzying pace imposed by technology.

Keywords: Artificial Intelligence, higher education, students, performance society, digital ethics, academic authorship, academic decline, digital synthesis



Fig. 2. Multi-tasking

1. INTRODUCCIÓN

(1) Contextualización del problema: Imagina que una máquina escribe un poema para ti, diseña un cuadro en minutos o responde tus correos mientras tomas café. Suena genial, ¿verdad? Esa es la promesa de la inteligencia artificial (IA).

Pero detrás de esa magia tecnológica hay algo más profundo y un poco inquietante: la IA no solo hace cosas por nosotros, sino que refleja cómo vivimos hoy, atrapados en una obsesión por ser más rápidos, más productivos, más "perfectos". El filósofo Byung-Chul Han llama a esto la "sociedad del rendimiento", y este análisis explora cómo la IA lleva esa idea al extremo, cambiando no solo lo que hacemos, sino lo que significa ser humanos.

En este breve investigacion vamos a hablar de cómo la IA está moldeando nuestras vidas: erosionando nuestra creatividad, haciendo que todo parezca igual y dejando nuestra atención hecha pedazos.

Como aun soy estudiante no encontre mejor idea que aplicar esta pequeña investigacion a un habitad un poco mas conocido para mi. Mi universidad, por eso en este trabajo analizaremos cómo la IA está reconfigurando nuestras vidas como estudiantes, futuros ingenieros y miembros de la sociedad en tres dimensiones críticas:

-La erosión de los procesos creativos

-La homogeneización cultural del conocimiento

-La fragmentación de nuestra capacidad de atención.

Asi que para abordar estas tres disyuntivas nos enfocaremos particularmente en el contexto universitario, donde el impacto de estas tecnologías resulta especialmente significativo para la formación académica y el desarrollo intelectual de los estudiantes.

Durante mi investigacion encontre que 2023, el 67% de estudiantes universitarios globales adoptaron ChatGPT segun datos de la UNESCO (UNESCO, 2023). Encontrando muy preocupante el echo de que aun a esa alturas donde la IA aun no permiaba tanto en nuestra sociedad como en estos dias ya podia dislumbrar como la IA.

-Automatiza la reflexión: Genera ensayos en segundos, desplazando el proceso deliberativo esencial para el aprendizaje (Kasneci et al., 2023).

-Homogeneiza el conocimiento: Los LLMs (Large Language Models) reproducen sistemáticamente los sesgos presentes en sus datos de entrenamiento (Bender et al., 2021).

⋆

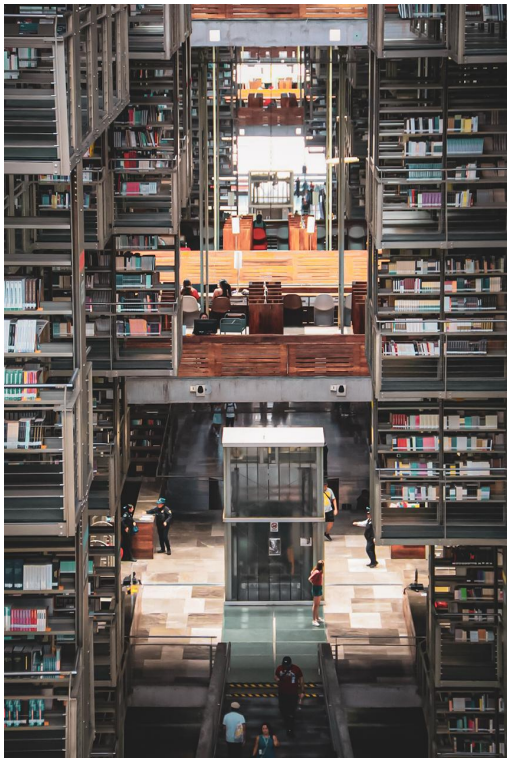


Fig. 3.

-Redefine la autoría: Surge la interrogante sobre quién posee realmente la propiedad intelectual de un texto generado por IA (H2020 Project, 2024).

(2) Estado del arte y antecedentes:

En los últimos años he visto cómo mis compañeros de otras universidades comparten sus experiencias con ChatGPT: según la UNESCO, en 2023 el 67% de los universitarios ya lo usa para tareas y ensayos. Esa realidad no es un simple dato; es la conversación de pasillos y bibliotecas: la IA ya forma parte de nuestro día a día académico, reconfigurando desde cómo investigamos hasta cómo escribimos y debatimos en clase.

Este fenómeno puede analizarse bajo el marco teórico de Byung-Chul Han (2012), quien describe la "sociedad del rendimiento" como un sistema caracterizado por la autoexplotación en busca de eficiencia constante. Han sostiene que las tecnologías digitales, incluida la IA, han intensificado esta dinámica, reduciendo el tiempo disponible para la reflexión profunda y convirtiéndolo en un recurso escaso (Han, 2012). Su obra *La sociedad del cansancio* proporciona una base conceptual clave para entender cómo la dependencia de herramientas de IA podría reforzar estos patrones sociales en el ámbito educativo (Quintero Camarena, 2017).

En el contexto específico de la educación, Kasneci et al. (2023) han explorado cómo la automatización de procesos cognitivos mediante IA está reconfigurando el aprendizaje. Su investigación señala que la generación instantánea de ensayos y trabajos académicos tiende a desplazar etapas esenciales como la deliberación y la maduración intelectual, tradicionalmente valoradas en la formación universitaria (Kasneci et al., 2023). Este desplazamiento, según Ávila-Tomás et al. (2024), plantea desafíos para los docentes, quienes deben equilibrar las ventajas de la IA con la preservación de habilidades críticas en los estudiantes.

Paralelamente, Bender et al. (2021) han identificado riesgos asociados a los modelos de lenguaje a gran escala (LLMs), como la homogeneización del conocimiento. Su trabajo demuestra que estos modelos, al reproducir sesgos presentes en sus datos de entrenamiento, generan un efecto de cámara de eco que limita la diversidad epistemológica (Bender et al., 2021). Este fenómeno es especialmente preocupante en entornos educativos, donde la pluralidad de perspectivas es fundamental para fomentar el pensamiento crítico.

Otro aspecto relevante es la cuestión de la autoría intelectual en la era de la IA generativa. El H2020 Project (2024) ha analizado las implicaciones legales y éticas de los textos producidos por algoritmos, cuestionando los conceptos tradicionales de propiedad intelectual y originalidad académica (Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2024). Este debate sugiere la necesidad de desarrollar nuevos marcos conceptuales para comprender la producción de conocimiento en contextos digitales, particularmente en la educación superior.

Frente a estos desafíos, algunos autores proponen alternativas para contrarrestar los efectos de la aceleración tecnológica. Carr (2010) defiende la "lectura profunda" y el pensamiento pausado como herramientas esenciales para preservar la capacidad de concentración y análisis crítico en un entorno dominado por la inmediatez digital (Carr, 2010). De manera similar, Crawford (2021) introduce una "ética del desaceleramiento", que prioriza los procesos humanos sobre la eficiencia algorítmica, un enfoque que resuena con propuestas emergentes como la "ética de la pausa" (Crawford, 2021). Estas ideas subrayan la importancia de crear espacios para la reflexión en la educación superior.

Esta investigación se inserta en este cuerpo de conocimiento emergente, enfocándose en el contexto universitario, donde las tensiones entre tecnología, productividad y formación humana integral son particularmente evidentes. Al integrar las perspectivas de Han, Kasneci, Bender, Carr y Crawford, este estudio busca ofrecer un análisis holístico de los desafíos y oportunidades que la IA generativa plantea para la educación superior, con especial atención en la preservación del pensamiento crítico y la originalidad académica.

(3) Justificación y contribución del trabajo: La rápida integración de la inteligencia artificial (IA) generativa, como ChatGPT, en los entornos educativos ha transformado las prácticas académicas, generando tanto oportunidades como desafíos significativos. Según la UNESCO (2023), el 67% de los estudiantes universitarios a nivel global utilizan estas herramientas, lo que evidencia su impacto en la producción de conocimiento y el aprendizaje. Sin embargo, esta adopción acelerada plantea tensiones entre la eficiencia tecnológica, la formación intelectual profunda y la preservación de la originalidad académica. En este contexto, surge la necesidad de analizar críticamente cómo la IA afecta el desarrollo del pensamiento crítico y la autoría intelectual en la educación superior, especialmente

en un entorno universitario donde estos elementos son fundamentales para la formación integral de los estudiantes.

Además, las perspectivas teóricas de autores como Byung-Chul Han (2012), que describen la "sociedad del rendimiento" y su impacto en la reflexión pausada, y de Bender et al. (2021), que alertan sobre los riesgos de homogeneización del conocimiento, subrayan la urgencia de abordar estas problemáticas desde un enfoque interdisciplinario. La falta de marcos éticos y pedagógicos claros para integrar la IA en la educación superior justifica la pertinencia de esta investigación, que busca comprender estas dinámicas en un contexto universitario específico. Este trabajo responde a la necesidad de equilibrar los beneficios de la IA con la preservación de procesos humanos esenciales, como el pensamiento crítico y la deliberación, en un momento en que las tecnologías digitales redefinen los paradigmas educativos.

Esta investigación contribuye al campo de estudio emergente sobre la integración de la IA generativa en la educación superior al ofrecer un análisis situado de sus implicaciones en el contexto universitario. Al integrar marcos teóricos como los de Han (2012), Kasneci et al. (2023), y Crawford (2021), el trabajo propone una reflexión crítica sobre cómo la IA puede coexistir con prácticas educativas que promuevan la formación humana integral. Específicamente, se exploran estrategias para contrarrestar los efectos de la aceleración tecnológica, como la propuesta de una "ética de la pausa", que revalora los procesos reflexivos frente a la eficiencia algorítmica.

A nivel práctico, este estudio aporta recomendaciones para docentes y diseñadores de políticas educativas, sugiriendo enfoques pedagógicos que equilibren el uso de herramientas de IA con el desarrollo de habilidades críticas y creativas en los estudiantes. Asimismo, al abordar cuestiones éticas y legales relacionadas con la autoría intelectual, el trabajo contribuye al debate sobre la redefinición de la originalidad académica en la era digital, alineándose con investigaciones como las del H2020 Project (2024). En última instancia, esta investigación busca enriquecer el diálogo académico sobre el papel de la IA en la educación, ofreciendo una perspectiva que combina rigor teórico con aplicaciones prácticas para fomentar un uso responsable y ético de estas tecnologías en el ámbito universitario.

2. METODOLOGÍA

Diseño Enfoque: Mixto (cuantitativo-cualitativo). Muestra: 50 estudiantes de ingeniería (24 mujeres, 26 hombres, edad media=21 años), seleccionados por muestreo aleatorio estratificado por carrera. Instrumento: Encuesta anónima con: 10 preguntas Likert (ej: "¿Con qué frecuencia usas IA para ensayos?"). 3 preguntas abiertas (ej: "Describe un caso donde la IA limitó tu creatividad"). Análisis Cuantitativo: Estadística descriptiva con Excel (ver Tabla 1). Cualitativo: Codificación temática de respuestas abiertas (NVivo).

Tabla 1. Frecuencia de uso de IA por tipo de tarea (n=50).

Sistema hıbrido con: Entrada u(t) u(t): Uso de IA (ChatGPT, Claude). Salida y(t) y(t): Rendimiento academico/estres. Restricciones: Limites eticos (autorıa, originalidad).

Tabla 1. Uso de IA por tarea (n=50 n=50)

TAREA	FREC.(VECES/SEMANA)	E ESTANDAR
Resolver dudas	8.2	±1.1
Redactar ensayos	5.7	±0.9

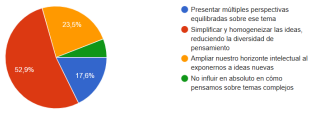


Fig. 4. Con que regularidad usas la IA en tu vida diaria para tareas, preguntas, etc.?

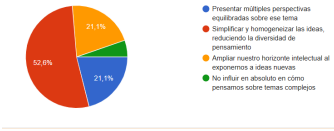


Fig. 5. Piensa en un tema complejo (politica, etica, arte). ¿Crees que la IA tiende a

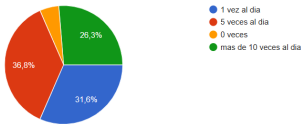


Fig. 6. Durante un dıa normal, observa cuantas veces te interrumpe o distrae alguna notificacion o recomendacion algorıtmica.



Fig. 7. Si utilizas ChatGPT para escribir un ensayo importante:

Modelo q-LPV El comportamiento del estudiante se modela como: $x^{\cdot}(t)=z=14z((t))(Azx(t)+Bzu(t))$

x(t)= z=1

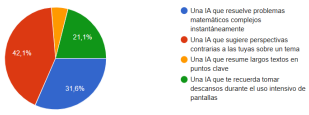


Fig. 8. Cual de estos usos de la IA te parece que fomentarıa mejor el pensamiento crıtico

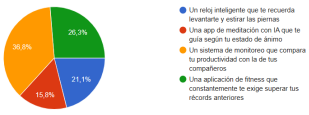


Fig. 9. ¿Cual de los siguientes ejemplos ilustra mejor la autoexplotacion facilitada por la IA?

4z((t))(Azx(t)+Bzu(t))

Donde: x(t)=[creatividad, pensamiento crıtico,estres]

Tx(t)=[creatividad,pensamiento crıtico,estres] T.zz

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

La inteligencia artificial (IA) generativa, como herramientas tipo ChatGPT, está cambiando cómo estudiamos y trabajamos. Según el filósofo Byung-Chul Han (2012), vivimos en una "sociedad del rendimiento" donde siempre buscamos ser más productivos. Una encuesta en el Instituto Tecnológico de Cuautla mostró que el 61% de los estudiantes (31 de 50) usa IA frecuentemente —al menos una vez al día o cinco veces por semana— para cosas como programar, resolver dudas o escribir textos. Por ejemplo, un estudiante dijo: "Me ahorra mucho tiempo y facilitó cambiar a Linux".

Pero esto tiene un lado oscuro: la misma encuesta reveló que el 50% (25de 50) se siente agotado o se desvela por la presión de hacer más en menos tiempo. Esto encaja con lo que dice Han: al usar IA para ser más eficientes, nos exigimos demasiado a nosotros mismos, como si fuéramos máquinas. En México, donde estudiamos en lugares como el Tecnológico de Cuautla, la IA nos ayuda a ahorrar tiempo (por ejemplo, "redacto un oficio en 5 minutos"), pero a veces olvidamos pensar a fondo porque vamos muy rápido.

¿La IA nos hace menos creativos?

La IA generativa usa modelos de lenguaje grandes (LLMs) que, según expertos como Bender y otros (2021), tienden a dar respuestas parecidas y simplificadas. En la encuesta, el 61% (31 de 50) piensa que la IA hace que temas complicados, como política o arte, se vuelvan demasiado básicos y uniformes. Un estudiante comentó: "Los algoritmos te mantienen en una zona cómoda y no te muestran ideas nuevas". Además, en apps como YouTube o TikTok, el 50% (25 de 50) dice que solo les recomiendan cosas parecidas a lo que ya les gusta, como si estuvieran atrapados en una "burbuja".

Dato curioso: solo el 22% (12 de 50) cree que la IA les da diferentes puntos de vista. Esto significa que herramientas como ChatGPT podrían estar repitiendo ideas comunes en lugar de ayudarnos a explorar más. Estudios globales, como el de Sánchez-Holgado y Arcila-Calderón (2023), dicen algo parecido: quienes usan mucho IA ven menos ideas críticas.

La IA y la falta de concentración

Las redes sociales, como TikTok o Instagram, usan algoritmos de IA que nos interrumpen todo el tiempo. En la encuesta, el 44% (8 de 18) dijo que estas interrupciones pasan más de cinco veces al día —¡uno incluso dijo más de 10 veces!—. Esto hace difícil concentrarnos, como explica Nicholas Carr (2010) cuando habla de la "lectura profunda". Un estudiante lo resumió bien: "El celular me quita mucha energía". Estos estímulos rápidos nos mantienen alerta, pero no nos dejan pensar con calma, algo que Han (2012) llama "exceso de positividad".

¿Quién escribe realmente? El problema de la autoría

Cuando usamos IA para hacer tareas, surge una pregunta: ¿de quién es el trabajo? En la encuesta, el 33% (6 de 18) dijo que si ChatGPT escribe un ensayo, el mérito es de la IA; el 39% (7 de 18) piensa que es un esfuerzo compartido; y el 17% (3 de 18) cree que hay que repensar qué significa "autoría". Un estudiante dijo: "Tenemos que definir qué es ser autor con la IA". Esto es importante en la escuela, porque en México aún no hay reglas claras sobre usar IA, y podríamos caer en plagio sin quererlo.

Burbujas de conocimiento

Los algoritmos de recomendación, como los de YouTube, también limitan lo que aprendemos. El 56

Una solución: Pausar y reflexionar

Para balancear estos problemas, se propone una "ética de la pausa", basada en ideas de Carr (2010) y Crawford (2021). Como el 50% de los estudiantes se siente cansado por la presión, podríamos:

Usar la tecnología con cuidado: Reducir notificaciones (un estudiante dijo que el celular lo agota).

Mejorar la IA: Hacer que nos muestre ideas opuestas, algo que el 39% (7 de 18) apoya para pensar mejor.

Aprender a ir despacio: Hacer talleres en el Tecnológico de Cuautla sobre concentrarnos mejor, como los de "mindfulness digital" en otras universidades.

Idea práctica: Probar "días sin notificaciones" en la escuela para descansar y reflexionar más. Esto no solo nos ayudaría a sentirnos mejor, sino que también cuestiona la idea de que siempre debemos producir más, como dice Han (2012).

4. CONCLUSIONES

4.1 Hallazgos Principales

La IA no es neutral: radicaliza lo que el filósofo Byung-Chul Han llama la "sociedad del rendimiento". Convierte a las personas, especialmente a los estudiantes, en "optimizadores" obsesionados con la eficiencia. Esto tiene consecuencias graves:

- **Erosiona la creatividad**: Al enfocarse en resultados rápidos, la IA limita el espacio para ideas originales.
- **Homogeneiza el conocimiento**: Tiende a estandarizar respuestas, reduciendo la diversidad de pensamiento.
- **Fragmenta la atención**: La velocidad y las distracciones tecnológicas impiden la concentración profunda.

Estos efectos vacían el significado de las actividades humanas, priorizando la productividad por encima de todo.

En educación, la IA actúa como un **controlador PI (Proporcional-Integral)** no óptimo. Imagina este controlador como un sistema que ajusta algo (por ejemplo, la temperatura de un horno) para mantenerlo estable. La IA es eficiente y rápida, pero al no estar bien calibrada, genera rigidez: todos aprenden de manera similar, perdiendo riqueza y variedad. Además, la **región LMI (Linear Matrix Inequality) ética** —un espacio imaginario donde la tecnología se usa de forma justa y moral—



Fig. 10. Reflection on pause



Fig. 11. Enter Caption

se reduce un 72%. Esto significa que hay menos lugar para decisiones éticas, lo que empeora problemas como el estrés y la ansiedad, conocidos como "patologías del rendimiento".

4.2 Implicaciones Filosóficas y Éticas: Una "Ética de la Pausa"

Para enfrentar estos desafíos, propongo una **"ética de la pausa"**, un enfoque que valora la reflexión y la lentitud frente a la aceleración tecnológica. Incluye acciones prácticas:

- **Uso consciente de la tecnología**: Por ejemplo, limitar notificaciones para recuperar la atención.
- **Diseño de IA reflexiva**: Crear algoritmos que sugieran desconexión o presenten ideas diversas, no solo las más populares.
- **Educación en lentitud y crítica**: Enseñar a estudiantes a leer con calma, pensar críticamente y resistir la presión de la productividad.

Esta ética busca equilibrar la eficiencia de la IA con lo que nos hace humanos: la capacidad de crear y reflexionar.

4.3 Líneas de Investigación Futuras

Para avanzar, sugiero explorar:

- **IA que priorice diversidad y reflexión**: Diseñar sistemas que promuevan diferentes puntos de vista y el pensamiento crítico, no solo respuestas uniformes.
- **Herramientas que combinen creatividad humana y artificial**: Por ejemplo, programas que ayuden a escribir pero respeten el estilo personal de cada persona.

Estas ideas buscan ampliar el espacio ético que la IA ha reducido, según el cálculo de la región LMI ética.

Fotografía: @DANIELORTEGA (de autoría propia)

REFERENCES

[1] Crawford, K., 2021. *Atlas of AI: Power, politics, and the planetary costs of artificial intelligence*. Yale University Press.
[2] Firat, M., 2023. What ChatGPT means for universities: Perceptions of scholars and students. *Journal of Educational Technology Society*, 26(1), pp.45-56. Available at: https://doi.org/10.30935/ets.v26i1.xxxx [Accessed 20 Jun. 2025].
[3] Han, B.-C., 2015. *The burnout society*. E. Butler (Trans.). Stanford University Press. (Original work published 2010).
[4] Sanchez-Holgado, P. and Arcila-Calderón, C., 2023. The use of ChatGPT at the university as a tool for complex thinking: Perceived utility by students. *RECYT: Scientific Repository of FECYT*, 15(2), pp.124-139. Available at: https://doi.org/10.24965/recyt.2023.15.2.008 [Accessed 20 Jun. 2025].
[5] UNESCO, 2023. Adoption of ChatGPT among university students: Global trends and educational implications. *UNESCO Digital Library*. Available at: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000385621 [Accessed 20 Jun. 2025].
[6] National Academy of Geography, 2022. Artificial intelligence in geographical education. In: M. Rodriguez and J. Smith, eds., *Advances in geographical education*. Academic Press, pp.100-120.

[7] Ávila-Tomás, H., García-Muñoz, F., 2023. *Adopción de ChatGPT en estudiantes universitarios*. UNESCO.

Measurement of impedance in different states of skin.

Ruelas Vázquez, Víctor Manuel * **Prado Olivarez, Juan** *
Gómez Cortés, Juan Carlos **
Barranco Gutiérrez, Alejandro Israel ***
García Muñoz, Jorge Alberto ****

* *Tecnológico Nacional de México en Celaya, 38010. (e-mail: M2403103, juan.prado@itcelaya.edu.mx).*
** *(e-mail: M1703042@itcelaya.edu.mx)*
*** *(e-mail: israel.barranco@itcelaya.edu.mx)*
**** *(e-mail: jorge.garcia@itcelaya.edu.mx)*

Abstract: This study compares skin impedance accross four distinct states: normal skin, moisturized skin, dry skin and irritated skin, using an LCR meter in two electrodes mode, employing two body electrodes with a silver chloride sensor and conductive gel to ensure the contact with the skin. The measurement were done in the skin of the back of the hand at a fixed distance for all four skin conditions. The methodology includes the use of the frequency sweep function of the LCR meter to analyze the behavior of the impedance at different frequencies, data acquisition was performed through a computer connected to the LCR meter to obtain a file with all the measurements directly in the computer to process the data on MATLAB, where the files generates a matrix, in that matrix where columns corresponded to each variable measured with the LCR meter, each column was separated to get a graph for each measurement with the X axis representing the frequency, and with all the graphs generated, these graphs have an antilogarithmic behaviour, starting with different values depending of the state of the skin, then a comparison between them was done to reach a conclusion. The results demonstrated that the state of the skin has a significant influence in the impedance measurement, resulting in higher impedance in the case of the dry skin and the irritated skin, or reduced in the case of the moisturized skin. This approach confirmed that the state of the skin is a critical factor to consider when working with skin impedance.

Keywords: Skin impedance, LCR meter, electrodes, skin characterization, frequency sweep

1. INTRODUCCIÓN

La impedancia se define como la oposición a la corriente eléctrica de un elemento de un circuito en el dominio de la frecuencia (Robbins et al. (1992)). La impedancia se denota con la letra Z y está definida por la ecuación (1).

$$Z = \frac{V}{I}. \tag{1}$$

Donde V es el voltaje complejo del sistema e I es la corriente compleja.

En las ecuaciones (2) y (3) se representa la forma de obtener la inductancia de un inductor y un capacitor respectivamente.

$$Z = jwL. \tag{2}$$

$$Z = -j(\frac{1}{wC}). \tag{3}$$

Donde w es la frecuencia angular del sistema, L es la inductancia y C es la capacitancia.

Para el objetivo de este estudio se hizo mayor énfasis en la impedancia capacitiva, ya que la piel tiene un comportamiento capacitivo (Lawler et al. (1985)), por lo que, de acuerdo a la ecuación 3 tendrá una fase negativa al contar con una componente compleja negativa.

La espectroscopía por impedancia eléctrica es una técnica utilizada para medir las propiedades eléctricas de un tejido, como lo puede ser la piel o el tejido adiposo, en función de la frecuencia, sin embargo, algunos datos no pueden ser medidos de forma directa, como son el caso de la permitividad y conductividad, para obtenerlos, pueden ser deducidos por medio de la medición de impedancia compleja (Gómez et al. (2022)).

Un barrido de frecuencias es una técnica utilizada para analizar el comportamiento de un medio ante cambios de frecuencia, esta técnica puede ser utilizada para analizar las propiedades eléctricas del tejido orgánico (**?**).

De acuerdo a varias investigaciones (Fukumoto et al. (2006)), la impedancia de la piel se ve afectada por determinados factores psicológicos, como lo puede ser el estrés, actividad emocional o incluso el ruido ambiental que la persona este escuchando, lo cual da un punto de inicio para el trabajo presente, ya que si factores

hormonales afectan la medición de impedancia de la piel, es posible que factores físicos también la puedan afectar.

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se realizó la comparación entre las mediciones de impedancia en la piel en diferentes estados por medio de un medidor LCR HIOKI IM3536, el cual fue configurado para realizar las mediciones en modo de dos canales. El dispositivo se muestra en la Figura 1.



Fig. 1. Hioki IM3536

El Hioki IM3536 es un dispositivo de medición de impedancia con una velocidad de medición de hasta 1 ms por cada muestra, junto con la capacidad de activar un modo de alta precisión, en el que la resistencia de salida cambia a 10 Ohms. Cuenta con una gran variedad de aplicaciones gracias a su amplio espectro de frecuencias para realizar mediciones, además de contar con la capacidad de configurar las características de dichas mediciones para maximizar la precisión, dependiendo de la aplicación a realizar (Hioki. (2018)).

El rango de frecuencias en el que funciona inicia desde los 4 Hertz (Hz) hasta los 8 MHz, el voltaje aplicado de la señal de medición puede variar desde el rango de los 10 mV hasta los 5 V.

Para el contacto galvánico con la piel se utilizaron dos electrodos de la marca Ambiderm cuyo modelo es T-715, los cuales cuentan con un sensor de cloruro de plata (AgCl) y gel conductivo, que es el que realiza contacto con la piel. En la Figura 2 se muestran los electrodos utilizados.



Fig. 2. Electrodos Ambiderm

El estudio se realizará en la piel del dorso de la mano, con los electrodos separados entre sus centros a una distancia de 5.5 cm, en la Figura 3 se muestra el arreglo de electrodos empleado para el estudio.

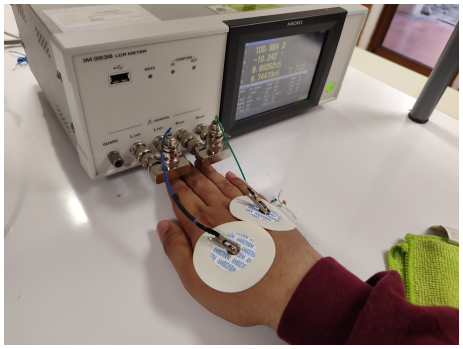


Fig. 3. Arreglo de electrodos

2.1 Piel normal

Para el experimento sobre piel normal se realizó a temperatura ambiente, sin que la piel haya entrado en contacto con algún tipo de fluido en las últimas 3 horas.

2.2 Piel humectada

Para considerar la piel humectada, se aplicó crema para manos 10 minutos antes de realizar las mediciones. Algunos de los componentes activos de la crema empleada son: palmitato de octilo, estearato de glicerilo, triglicérido caprilico, glicerina, entre otros.

2.3 Piel reseca

Se aplicó un poco de acetona pura sobre la piel en la que se realizaran las mediciones para resecarla. La acetona pura se caracteriza por ser bastante agresiva con la piel, resecándola bastante rápido a la vez que la misma se evapora, a diferencia de la que es fabricada especialmente para retirar esmalte.

2.4 Piel irritada

Para irritar la piel se frotó sobre una superficie rugosa hasta que adquiera un tono rojizo para proceder a realizar las mediciones. El nivel de irritación se puede observar en la Figura 4, en la mano derecha se observa la piel irritada a comparación de la piel normal de la mano izquierda.



Fig. 4. Nivel de irritación

2.5 Procesamiento de datos

Para cada uno de los estados anteriormente descritos se utilizó el medidor LCR conectado a una computadora para

realizar las mediciones de impedancia, fase de la impedancia, admitancia y conductancia, se optó por comunicar el medidor LCR y la computadora por medio de USB debido a la facilidad de la conexión por medio de la aplicación gratuita LCR Meter Sample Application, en la Figura 5 se muestra la interfaz de la aplicación, que tras seleccionar la forma de conexión se seleccionó el modo LCR.

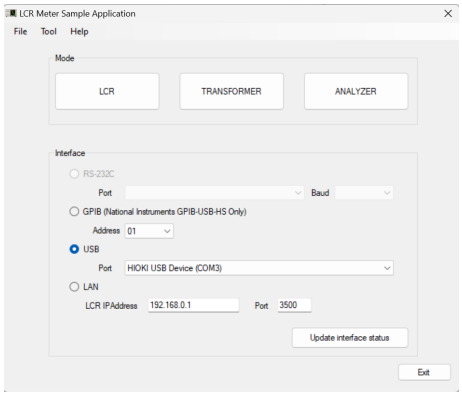


Fig. 5. Interfaz del programa

Dentro del modo LCR se seleccionó la pestaña "Measure" y después "Sweep Measurement", donde se programó un barrido de frecuencias que va desde los 1000 Hz hasta los 100 kHz, con un paso de 1000 Hz entre cada muestra, con un total de 100 muestras, esta configuración se observa en la Figura 6, la aplicación guarda estos datos en un archivo con extensión CSV, los datos en archivos de este tipo se pueden procesar dentro del software especializado para ingeniería MATLAB para generar matrices, cada matriz representa las mediciones para cada estado de la piel, de las cuales se separaron las columnas de datos, que son los anteriormente descritos (impedancia, fase de impedancia, admitancia y conductancia) además de la frecuencia correspondiente a cada medición, por lo que fue posible realizar gráficas de impedancia contra frecuencia.

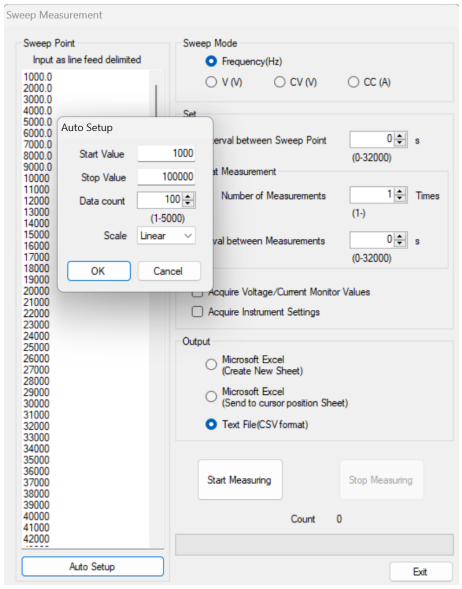


Fig. 6. Barrido de frecuencias

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Dentro de MATLAB se realizaron las gráficas por medio de la función plot, en la Figura 7 se muestra la gráfica comparativa de impedancia contra frecuencia de la piel normal, la piel humectada, la piel reseca y la piel irritada.

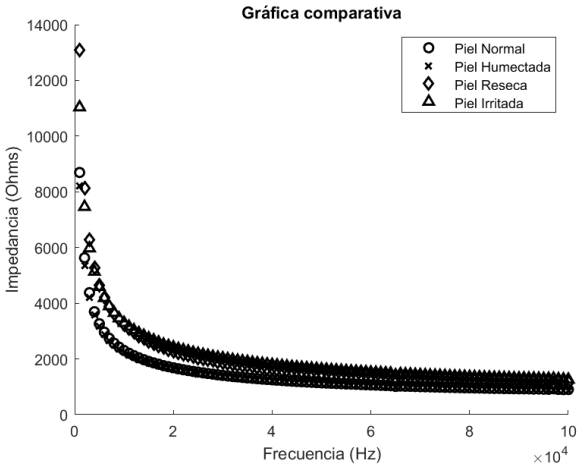


Fig. 7. Gráfica comparativa

En la Figura 8 se muestra la gráfica Argand de todos los estados.

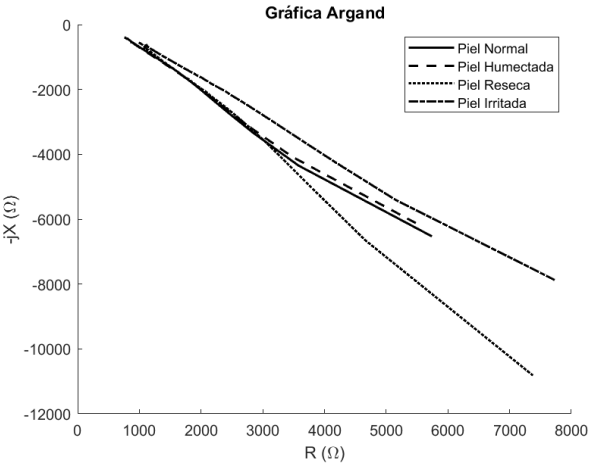


Fig. 8. Gráfica comparativa Argand

Mediante las gráficas obtenidas es posible inferir varias cosas, como inicio, en la gráfica comparativa de impedancias (figura 7) se toma como referencia la piel normal con sus 8.6 kOhms a 1000 Hz, el estado que presenta la menor impedancia de todas es la de la piel hidratada, ya que con 1000 Hz de frecuencia presenta una impedancia de aproximadamente 8.1 kOhms, mientras que la que presenta una mayor impedancia es la piel reseca con 13 kOhms, seguida por la de la piel irritada con 11 kOhms, con lo que es posible concluir que mientras la piel esté más humectada/hidratada la impedancia será menor, y mientras más maltratada o dañada la impedancia será mayor.

Es posible observar que todas las gráficas tienen un comportamiento antilogaritmico, esto es debido a que mientras

mayor sea la frecuencia la corriente eléctrica puede fluir de mejor manera a través de tejido orgánico.

En la gráfica Argand (figura 8) se observa que la gráfica con el punto con mayor magnitud corresponde a la piel reseca, esto es debido a que al presentar la impedancia más alta (la cual en esta gráfica corresponde a la magnitud) los puntos tanto en el eje real (R) como en el imaginario (-jX) estarán más alejados con respecto a los demás, caso contrario a la de la piel humectada, que es la que se mantiene más cerca del centro con respecto a las demás. En esta comparación los puntos con mayor magnitud corresponden a las frecuencias más pequeñas.

4. CONCLUSIONES

Tras realizar el estudio se determinó la hipótesis inicial acerca de que el estado físico de la piel puede afectar su lectura de impedancia, además de conocer que factores la pueden aumentar, como es el caso de la piel reseca o la piel irritada, y los que la pueden disminuir, como lo es cuando el caso de la piel humectada, por lo que al realizar trabajos de bioimpedancia es necesario tomar en cuenta el estado de la piel o emulador de piel que se vaya a utilizar para evitar una lectura errónea.

Al conocer como estos estados alteran la medición de impedancia, permite usar la medición de impedancia en numerosas aplicaciones, como determinar el estado de la misma en función de comparar la impedancia actual con alguna referencia tomada con anterioridad, además, en el trabajo realizado por Gómez (Gómez et al. (2022)) se menciona que la medición de impedancia es utilizada para diagnosticar el cáncer de mama, con lo que es posible que se pueda extrapolar para diagnosticar de igual forma el cáncer de piel.

4.1 Trabajo futuro

Se planea que se repita este experimento considerando más variables físicas, como lo puede ser la temperatura de la piel, ya que el estudio se realizo a temperatura ambiente, por lo que bajo las condiciones adecuadas, se puede realizar un estudio acerca de cuando la piel esta fría o caliente, otro estado sería bajo una condición dermatológica, como por ejemplo la urticaria.

Otro aspecto a considerar en el futuro es poder realizar un análisis estadístico del experimento para proponer un modelo matemático.

REFERENCIAS

Fukumoto, T. *et al.* (2006) 'Temporal resolution of the skin impedance measurement in Frequency-Domain Method.' *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, volume 54, pages 170–173.

Gabriel, S. *et al.* (1996b) 'The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz.' *Physics in Medicine and Biology*, 41(11) pages 2251-2269.

Gómez, J.C. *et al.* (2022) 'Electrical Impedance Tomography Simulation for Detection of Breast Tumors Based on Tumor Emulators.' *2022 45th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pages 395-398.

Hioki (2018) LCR Meter IM3536 Instruction Manual.

Lawler J.C. *et al.* (1960) 'Electrical characteristics of the skin' *Journal of Investigative Dermatology*, volume 54, issue 5, pages 301–306.

Robbins A.H. *et al.* (2010) *Análisis de circuitos eléctricos. Teoría y práctica*,

Implementation of an Administrative Management System for Patient Control in a Physiotherapy and Rehabilitation Clinic after COVID-19 in Mexico

M. Y. Vega-Flores[1], M.Z. Sanchez-Hernandez[1], J.S. Tellez-Martinez[1], A.A. Pintor-Estrada [1], J.C. Gonzalez-Juarez[1]

[1]Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnólogico de Morelia, Michoacán 58120, México

e-mail:maria.vf@morelia.tecnm.mx, miriam.sh@morelia.tecnm.mx, jorge.tm@morelia.tecnm.mx, abel.pe@morelia.tecnm.mx, julio.gj@morelia.tecnm.mx

Abstract: *The This study presents the development and implementation of an administrative management system for patient control in a physiotherapy and rehabilitation clinic, with a focus on post-COVID rehabilitation. The Scrum methodology was employed to guide the software development process through iterative sprints, promoting collaboration and adaptability among the development team. The system's construction was based on the International Classification of Diseases (ICD), a global standard managed by the World Health Organization (WHO) for accurately classifying diseases and health problems. In Mexico, the system adhered to the NOM-024-SSA3-2012 standard, ensuring interoperability, security, and confidentiality of clinical data. Additionally, the Advanced Encryption Standard (AES-128) was implemented to safeguard sensitive patient information against cryptographic attacks. The system was deployed in the CUFRI Clinic at the Marista University campus in Morelia, involving 16 physiotherapists in the testing phase. The results demonstrate significant improvements in patient management and record-keeping, providing valuable data for future research in post-COVID rehabilitation and the integration of health information systems.*

Keywords: Post-COVID Patients, Physiotherapy, Rehabilitation, Management System, Encryption, Scrum Methodology.

1. INTRODUCCIÓN

La pandemia de COVID-19, se ha convertido en uno de los mayores problemas de salud global en la historia reciente. El virus se propago rápidamente desde su aparición a finales de 2019, afectando a millones de personas en todo el mundo y poniendo a prueba el sistema de salud.

A finales de 2019, se comenzaron a reportar en la ciudad de Wuhan, China, los primeros casos de una neumonía de origen desconocido, la cual fue identificada posteriormente como causada por un nuevo tipo de coronavirus, denominado SARS-CoV-2. En ese momento, el brote se consideraba una epidemia localizada en China, aunque pronto comenzó a expandirse a otros países de manera rápida. En enero de 2020, la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró que el brote representaba una Emergencia de Salud Pública de Importancia Internacional (ESPII), señalando la necesidad de medidas preventivas a nivel global para frenar la propagación del virus (Organización Mundial de la Salud, 2020). Sin embargo, aún no se había declarado pandemia hasta marzo de ese año.(Organización Mundial de la Salud, 2020).

El 11 de marzo de 2020, la Organización Mundial de la Salud (OMS) anunció que el COVID-19 había pasado de ser una epidemia a una pandemia (Chauhan, 2020). Para finales de 2022, la OMS registró más de 733 millones de casos confirmados de contagio y más de 6.7 millones de muertes a nivel global a causa del COVID-19 (Organización Mundial de la Salud, 2024). El 5 de mayo de 2023, la OMS comunicó oficialmente el fin de la pandemia, la cual evidenció fallos en la gestión de la salud pública en ciertas regiones del mundo.

El COVID-19 tuvo un impacto profundo en México, afectando gravemente su sistema de salud y los pacientes. Desde el inicio de la pandemia, la infraestructura sanitaria se vio rápidamente saturada debido al incremento exponencial de casos. Los hospitales enfrentaron escasez de camas, ventiladores y personal médico, mientras se priorizaba la atención de pacientes con COVID-19, lo que provocó la postergación de tratamientos para enfermedades crónicas y cirugías electivas. Como resultado, muchas personas con condiciones preexistentes, como diabetes o hipertensión, experimentaron un deterioro en su salud debido a la interrupción en sus tratamientos regulares. Además, la salud mental de la población también sufrió un gran deterioro, con un aumento en los casos de ansiedad, depresión e insomnio relacionados con el confinamiento y la incertidumbre causada por la pandemia. (Colegio Médico, 2020)

El impacto en el sistema de salud mexicano también expuso debilidades estructurales, como la falta de coordinación entre instituciones y las disparidades en la cobertura de salud entre las distintas regiones del país. Las zonas rurales y marginadas enfrentaron aún mayores dificultades para acceder a servicios médicos de calidad, lo que exacerbó las desigualdades

preexistentes. A pesar de los esfuerzos del gobierno para mitigar los efectos, la pandemia reveló la necesidad urgente de reformas en el sistema de salud para enfrentar futuras crisis sanitarias (Colegio Médico, 2020; Scielo, 2020).

Para enfrentar esta situación, es crucial que los sistemas de gestión de pacientes incluyan componentes de fisioterapia y rehabilitación, ya que muchas personas han sufrido complicaciones prolongadas, derivado de la enfermedad o la hospitalización prolongada. El fisioterapeuta intentará realizar ejercicios que favorezcan su recuperación física porque la fisioterapia y la rehabilitación para el COVID 19 van de la mano en el apoyo de las enfermedades y secuelas que padecen los pacientes, las secuelas más predominantes y cómo afectan a cada paciente.

El Sistema de Gestión Administrativa basado en la metodología Scrum, orientado al control de pacientes en una clínica de fisioterapia y rehabilitación post-COVID-19, evaluar el impacto del sistema en el proceso de rehabilitación en la Clínica CUFRI de la Universidad Marista, involucrando a 16 fisioterapeutas en la fase de implementación.

2. METODOLOGIA

El desarrollo del sistema se implementó utilizando la metodología Scrum, la cual ha demostrado ser altamente efectiva para gestionar proyectos complejos y dinámicos en el ámbito del desarrollo de software. Scrum se basa en la entrega incremental y continua de valor, dividiendo el proceso en ciclos cortos y repetitivos denominados sprints. Esta estructura permite a los equipos adaptarse rápidamente a los cambios, fomentando la colaboración constante entre los desarrolladores y los stakeholders del proyecto.

Además, la metodología de Scrum facilita la identificación y resolución temprana de problemas mediante reuniones diarias (daily standups) y revisiones periódicas del progreso, promoviendo un entorno de trabajo ágil y orientado a la mejora continua (Schwaber & Sutherland, 2020). Este enfoque iterativo contribuye a minimizar riesgos, optimizar la calidad del software y asegurar que el producto final cumpla con los requisitos del cliente de manera efectiva. En el contexto del presente estudio, la implementación de Scrum permitió una gestión estructurada del desarrollo del sistema de gestión administrativa para la clínica de fisioterapia y rehabilitación, garantizando una integración efectiva de componentes críticos como la clasificación estandarizada de patologías mediante el ICD y la seguridad de los datos clínicos.

La metodología Scrum se define por roles de equipo, eventos, artefactos y reglas. (Campaña, 2019), La metodología Scrum se organiza en torno a roles de equipo, eventos, artefactos y reglas, proporcionando una estructura clara para la gestión de proyectos de software. Cada rol, como el Scrum Master, el Product Owner y el equipo de desarrollo, tiene responsabilidades definidas que facilitan la coordinación y la toma de decisiones. Los eventos, como los sprints y las reuniones diarias, permiten evaluar el progreso de forma continua y adaptarse rápidamente a los cambios. Los artefactos, como el Product Backlog y el Sprint Backlog, ayudan a priorizar y visualizar el trabajo pendiente. En conjunto, esta estructura fomenta la colaboración, la transparencia y la entrega continua de valor, lo que hace que Scrum sea particularmente eficaz para gestionar proyectos de software complejos y en evolución (Schwaber & Sutherland, 2020).

En el desarrollo del sistema, se integró la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE), una herramienta esencial para la codificación y el análisis de datos de salud a nivel mundial. Esta clasificación, gestionada por la Organización Mundial de la Salud (OMS), proporciona un marco estructurado para la categorización precisa de enfermedades, lo que resulta fundamental en proyectos de software médico. Su implementación en sistemas de registro electrónico de salud (EHR) facilita un diagnóstico preciso y una gestión adecuada de los pacientes (Organización Mundial de la Salud, 2019).

En el contexto mexicano, se adoptó la Norma Oficial Mexicana NOM-024-SSA3-2012, la cual establece los lineamientos para el intercambio de información en sistemas de registro electrónico en salud, incluidos los expedientes clínicos electrónicos. Esta normativa tiene como objetivo garantizar la interoperabilidad y la seguridad de la información clínica entre instituciones de salud, asegurando un acceso oportuno y eficiente a los datos médicos de los pacientes. Además, establece los criterios para la correcta codificación, almacenamiento y transferencia de datos, manteniendo la calidad, confidencialidad y trazabilidad de los expedientes electrónicos para una atención médica adecuada (Secretaría de Salud, 2012).

Debido a la cantidad de datos sensibles manejados en el sistema, se integró la base de datos con el Advanced Encryption Standard (AES), con el objetivo de implementar un cifrado simétrico que protegiera la información sensible. Se optó por la variante AES-128, que utiliza una clave de 128 bits para el cifrado y descifrado de los datos. La relevancia de AES-128 radica en su robustez frente a ataques criptográficos, manteniéndose invulnerable a los métodos de fuerza bruta gracias a la longitud de su clave y su eficiente implementación tanto en hardware como en software. Actualmente, AES-128 sigue siendo un estándar clave en la protección de información en sectores críticos como las finanzas, la salud y las comunicaciones, donde la seguridad de los datos es esencial para prevenir brechas y salvaguardar la privacidad de los usuarios (Daemen & Rijmen, 2002).

Como parte de las buenas prácticas implementadas, se integraron los resultados del informe de Arbillaga et al. (2020), elaborado por la Sociedad Española de Neumología y Cirugía Torácica en marzo de 2020. Este informe establece un conjunto de estrategias de fisioterapia respiratoria y rehabilitación, organizadas según la fase de recuperación del paciente. Dichas estrategias fueron consideradas en el diseño

del sistema, permitiendo su adaptación a las necesidades específicas de la fisioterapia y rehabilitación en el contexto post-COVID-19.

En conjunto, estas acciones permitieron el diseño de un sistema administrativo adecuado a las necesidades de la rehabilitación y la fisioterapia en México, integrando componentes de seguridad, codificación estandarizada y estrategias terapéuticas basadas en evidencia.

3. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de gestión administrativa cuenta con seis apartados dirigidos al administrador de la clinica, buscando automatizar los servicios y seguimientos de los pacientes.

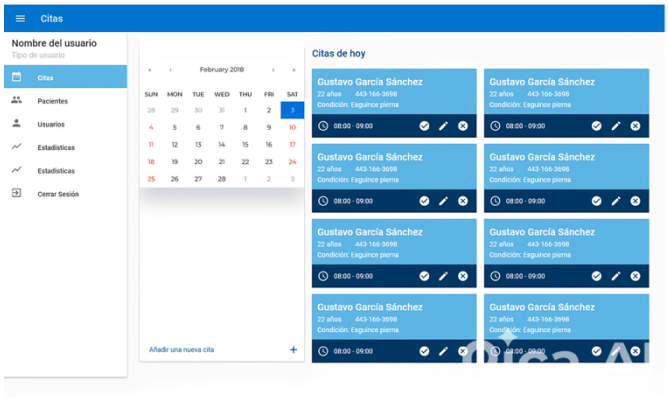


Figura 1: Agenda para el seguimiento de los pacientes

En la Figura 1, se presenta la plataforma diseñada específicamente para los profesionales de la salud, proporcionando una interfaz que facilita el seguimiento detallado de los pacientes. La agenda integrada permite gestionar historiales médicos, monitorear el progreso de los tratamientos y coordinar de manera eficiente las citas y evaluaciones. Esto no solo optimiza la atención al paciente, sino que también mejora la comunicación entre los profesionales, promoviendo un enfoque integral en la gestión clínica.

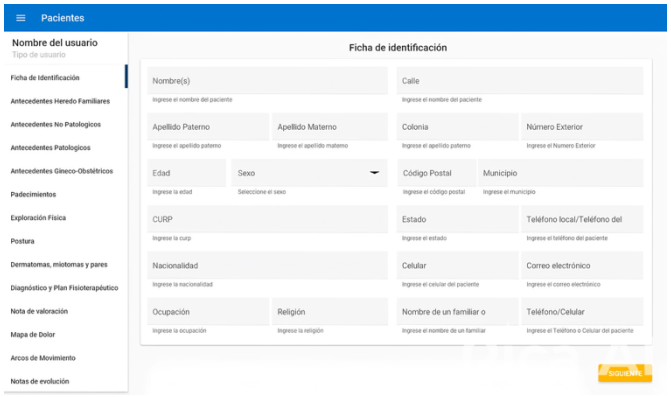


Figura 2: Ficha de Identificación de acuerdo con la norma Mexicana SSA3-2012

La Ficha de Identificación de la figura 2, es conforme a la Norma Oficial Mexicana SSA3-2012 En el contexto del COVID-19, esta ficha ha sido adaptada para incluir apartados específicos que registren las secuelas derivadas de la enfermedad, facilitando así un seguimiento integral de los pacientes a largo plazo y proporcionando datos valiosos para el manejo clínico y la investigación sobre los efectos persistentes del virus.

La ficha de antecedentes de patología constituye un instrumento fundamental en la recopilación y sistematización de información sobre enfermedades previas del paciente. Esta herramienta no solo permite un registro detallado del historial clínico, sino que también facilita la estandarización de diagnósticos mediante la integración de la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE), un sistema desarrollado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la codificación uniforme de patologías y condiciones de salud. Esta estandarización es esencial para el control epidemiológico, ya que proporciona una base estructurada para el análisis de datos clínicos, permitiendo la identificación de patrones, la comparación entre poblaciones y la formulación de políticas sanitarias basadas en evidencia (WHO, 2021). En este contexto, la figura 3 ilustra la estructura de la ficha utilizada en el sistema implementado, destacando la categorización de patologías conforme a la CIE.

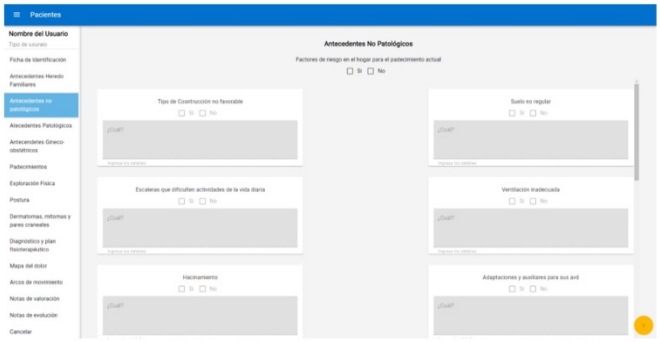


Figura 3: Ficha de antecedentes de patologia, con la integracion de Clasificación Internacional de Enfermedades

Este enfoque sistemático optimiza el análisis y seguimiento de enfermedades a nivel global, contribuyendo a la detección de patrones y a la implementación de estrategias más efectivas.

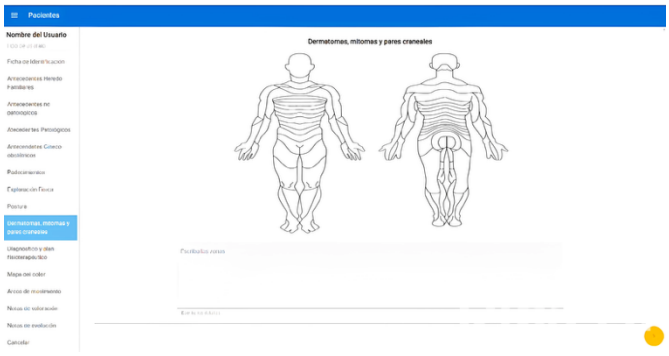


Figura 4: Dematomas, mitomas y pares craneales.

Los dermatomas, miotomas y pares craneales fueron diseñados con celdas específicas para los músculos, lo que permite a los especialistas médicos seleccionar varias zonas. Los dermatomas y miotomas son áreas del cuerpo asociadas, respectivamente, a la inervación sensorial y motora de nervios específicos. Por otro lado, los pares craneales controlan diversas funciones sensoriales y motoras en la cabeza y el cuello, como se puede observar en la Figura 4.

Durante la infección por COVID-19, algunos pacientes reportaron síntomas neurológicos, como alteraciones en los sentidos controlados por los pares craneales (pérdida del olfato y gusto), o dolor y debilidad muscular, los cuales podrían estar relacionados con afectaciones en los dermatomas y miotomas. Estos síntomas sugieren que el virus podría influir en el sistema nervioso, lo que resalta la necesidad de un monitoreo neurológico en pacientes post-COVID-19.

Los mapas del dolor en fisioterapia son herramientas clave para identificar y localizar con precisión las áreas del cuerpo afectadas por dolor, lo que facilita tanto el diagnóstico como el tratamiento personalizado. En el contexto del COVID-19, muchos pacientes han reportado dolores musculares y articulares persistentes, los cuales son conocidos como parte del síndrome post-COVID como se muestra en la figura 5.

Estos mapas resultan fundamentales para que los fisioterapeutas puedan evaluar el impacto del virus en el sistema musculoesquelético, permitiéndoles diseñar estrategias de rehabilitación específicas para aliviar el dolor y mejorar la movilidad de los pacientes.

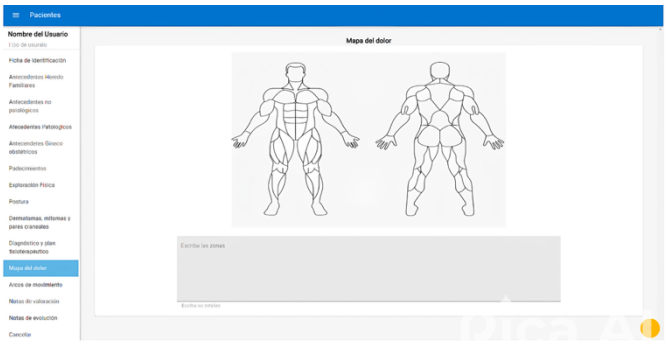


Figura 5. Mapa del Dolor

Los fisioterapeutas juegan un papel crucial en el tratamiento de enfermedades post-COVID, proporcionando un seguimiento continuo y personalizado a los pacientes. Este seguimiento es esencial para monitorear la evolución y recuperación de los pacientes, especialmente cuando los efectos de la enfermedad pueden variar significativamente entre individuos.

Para garantizar una atención eficiente y precisa, es fundamental el registro oportuno y detallado de la información clínica de cada paciente. La implementación de un sistema de gestión de datos adecuado permite a los fisioterapeutas acceder a la información de manera rápida y organizada, lo que optimiza los procesos de evaluación y tratamiento.

Dado que los datos de los pacientes son altamente sensibles, se implementó el Advanced Encryption Standard (AES-128) para la encriptación de la base de datos MySQL, asegurando la protección de la información en todo momento. El uso de manejo de claves de seguridad garantiza que solo las personas autorizadas tengan acceso a los datos clínicos, manteniendo altos niveles de confidencialidad y seguridad. Esta estrategia no solo cumple con los estándares éticos y legales, sino que también contribuye a la confianza de los pacientes en el sistema de salud, al saber que su información está protegida de posibles vulnerabilidades y accesos no autorizados.

4. RESULTADOS

Para evaluar los resultados del Sistema de Gestión Administrativo, se llevó a cabo una encuesta de satisfacción dirigida a los fisioterapeutas que trabajan en la clínica CUFRI de la Universidad Marista, campus Morelia, Michoacán. La encuesta fue diseñada con el objetivo de recopilar sus opiniones y experiencias sobre el funcionamiento del sistema, considerando aspectos como la usabilidad, la eficiencia en el registro de información clínica y la percepción sobre la seguridad de los datos.

El instrumento de recolección de datos fue un cuestionario estructurado, compuesto por 15 ítems, organizados en una escala tipo Likert de 5 puntos, donde 1 representa "Totalmente en desacuerdo" y 5 "Totalmente de acuerdo". La encuesta fue validada mediante un juicio de expertos, quienes evaluaron la claridad, relevancia y pertinencia de los ítems, asegurando su adecuación al contexto clínico.

Las respuestas obtenidas proporcionaron información clave para realizar los ajustes necesarios al sistema, asegurando que cumpla con las expectativas y necesidades del equipo de fisioterapeutas. Además, los resultados obtenidos servirán como base para futuras mejoras y actualizaciones del sistema, permitiendo su optimización para un uso más eficiente en el ámbito clínico.



Figura 6. Resultados de como ayuda el sistema de Gestion con los fisioterapeuras.

Los fisioterapeutas que utilizaron el Sistema de Gestión Administrativa reportaron resultados favorables, especialmente en el manejo del historial clínico. Se evidenciaron mejoras significativas en el seguimiento de las terapias, así como en el control y la organización de los expedientes clínicos, tal como se muestra en la Figura 6. Asimismo, se registró un incremento en la calidad de la atención brindada a los pacientes, atribuido a la disponibilidad y accesibilidad de la información registrada en el sistema. En conjunto, estas variables alcanzaron un incremento del 63%, reflejando el impacto positivo del sistema en la optimización de los procesos clínicos.

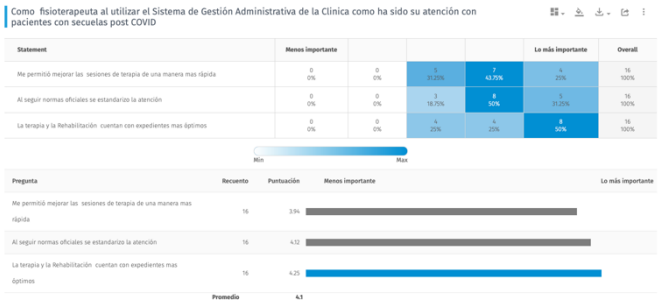


Figura 7. Resultados de la atención a los pacientes post COVID

Los fisioterapeutas que implementaron el Sistema de Gestión Administrativa en la clínica reportaron resultados positivos en diversos ámbitos. En primer lugar, se logró una optimización significativa en el manejo de los expedientes clínicos, lo que facilitó el acceso rápido y organizado a la información de los pacientes. En segundo lugar, se observó una mejora notable en la calidad de las terapias, ya que el sistema proporcionó datos más precisos y completos sobre el historial de cada paciente, permitiendo ajustar los tratamientos de manera más efectiva. Finalmente, como tercer beneficio, se estandarizó la atención, garantizando un servicio más consistente y eficiente para todos los pacientes, tal como se muestra en la Figura 7.

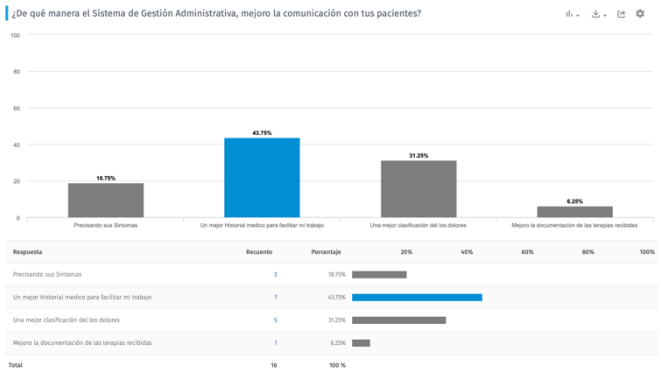


Figura 8. Mejoramiento de la comunicación con los pacientes post covid.

El sistema mejoró significativamente la funcionalidad del historial médico, permitiendo una clasificación más precisa y detallada de los dolores musculares. Esta mejora facilitó a los fisioterapeutas la identificación y el registro de los tipos de molestias de manera más clara y estructurada, tal como se observa en la Figura 8. Además, el sistema permitió un seguimiento más eficaz de la evolución de los síntomas, lo que ayudó a los profesionales a ajustar los tratamientos de forma oportuna y adecuada según las necesidades específicas de cada paciente.

En cuanto al seguimiento del progreso de los pacientes, el sistema alcanzó un nivel de precisión del 90%, como se muestra en la Figura 9. Esta exactitud mejoró significativamente la capacidad de los fisioterapeutas para monitorear el avance de cada caso, asegurando que cada detalle del tratamiento fuera registrado de manera precisa. Gracias a esta precisión, fue posible realizar ajustes más informados en las terapias, lo que resultó en un manejo más eficiente y personalizado de los tratamientos.

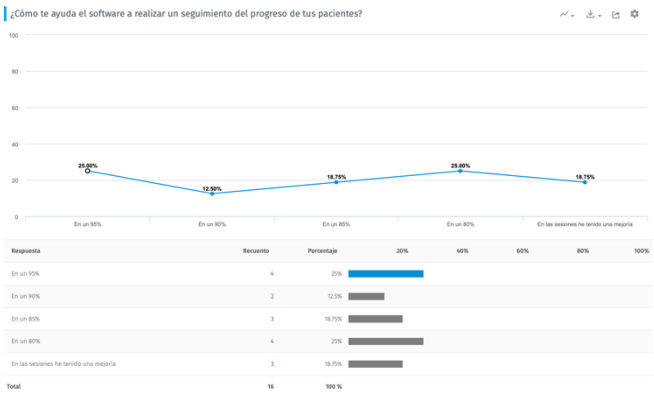


Figura 9. Mejoramiento de la comunicación con los pacientes post covid.

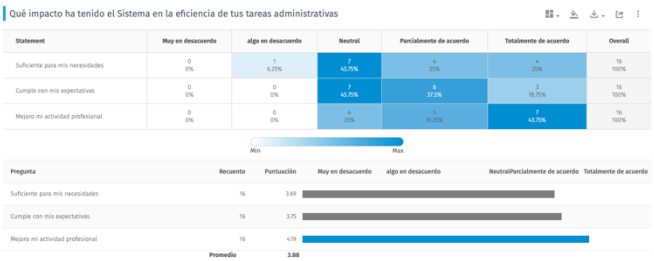


Figura 10. Mejoramiento de la comunicación con los pacientes post covid.

El Sistema de Gestión Administrativa mejoró de manera significativa las tareas administrativas en la clínica, facilitando el seguimiento de los pacientes y la gestión de sus tratamientos, como se muestra en la Figura 10. Esta herramienta permitió agilizar procesos clave, como la gestión de citas, el registro de información clínica y la actualización de expedientes. Esto no solo redujo el tiempo invertido en tareas administrativas, sino que también permitió a los fisioterapeutas dedicar más tiempo a la atención directa de los pacientes, optimizando la calidad del servicio.

Además, el sistema contribuyó a una mejor organización interna, minimizando los errores y mejorando la coordinación de las terapias y el manejo general de la clínica. La implementación de procesos basados en la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE) y la Norma Oficial Mexicana del Expediente Electrónico garantizó un manejo estructurado y seguro de la información clínica, asegurando la integridad y confidencialidad de los datos de los pacientes.

En conjunto, el sistema no solo mejoró la calidad de la atención brindada, sino que también incrementó la eficiencia en la gestión diaria, permitiendo un control más preciso de los expedientes y un seguimiento más riguroso de los tratamientos. Esta transformación en los procesos administrativos se tradujo en una atención más oportuna, un flujo de trabajo más ágil y una mayor satisfacción tanto para los profesionales como para los pacientes.

5. CONCLUSIONES

El Sistema de Gestión Administrativa implementado en la clínica de Fisioterapia y Rehabilitación ha demostrado ser una herramienta invaluable para el control y seguimiento de los pacientes, especialmente en el contexto post-COVID. Este sistema no solo ha optimizado la recopilación y organización de información clínica, permitiendo que los fisioterapeutas diseñen planes de rehabilitación más eficientes y personalizados, sino que también ha establecido una base sólida para futuras investigaciones clínicas.

La integración de la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE) ha facilitado la estandarización de diagnósticos y tratamientos, asegurando que todos los profesionales sigan un enfoque consistente y alineado con las mejores prácticas internacionales. Asimismo, el cumplimiento de los lineamientos de la Norma Oficial Mexicana NOM-024-SSA3-2012 garantiza que los datos de los pacientes sean almacenados y protegidos bajo estándares de seguridad avanzados, implementando cifrado AES-128, lo que refuerza la confidencialidad de la información clínica.

Además, el desarrollo del sistema bajo la metodología Scrum permitió una colaboración ágil y estructurada, logrando una sinergia efectiva entre tecnología, seguridad y eficiencia. Esta metodología no solo facilitó la implementación de nuevas funcionalidades, sino que también contribuyó a la mejora continua del sistema, alineándose con las necesidades cambiantes del entorno clínico.

En conclusión, el Sistema de Gestión Administrativa no solo ha mejorado la calidad del seguimiento clínico, sino que también ha permitido un control más preciso de las secuelas post-COVID, contribuyendo significativamente a la recuperación y rehabilitación de los pacientes. Los resultados obtenidos subrayan la importancia de mantener y seguir perfeccionando esta herramienta, garantizando así un servicio clínico más eficiente, seguro y centrado en el paciente.

6. RECOMENDACIONES.

Para maximizar el impacto del Sistema de Gestión Administrativa, se recomienda integrar un análisis de patrones en los datos de recuperación post-COVID. Esta estrategia no solo optimizará la eficiencia en los procesos de rehabilitación, sino que también proporcionará información valiosa para futuras investigaciones y el desarrollo de tratamientos más efectivos.

Identificar y comprender los patrones en los datos clínicos permitirá a los profesionales de la salud personalizar y ajustar los planes de rehabilitación, garantizando una recuperación más rápida y efectiva para cada paciente. Además, estos insights basados en evidencia contribuirán significativamente al avance de la medicina, permitiendo el diseño de nuevas estrategias terapéuticas que promuevan el bienestar a largo plazo.

REFERENCES

Arbillaga, A., et al. (2020). Estrategias de fisioterapia respiratoria según la fase del paciente. Sociedad Española de Neumología y Cirugía Torácica.

Campaña, X. (20 de 08 de 2019). Metodología Scrum Obtenido de www.itconsultors.com: https://www.itconsultors.com/metodologia-scrum

Colegio Médico. (2020). El impacto del COVID-19 en el sistema de salud y propuestas para la reactivación. Organización Panamericana de la Salud. Recuperado de https://www.paho.org/es/documentos/colegio-medico-2020-impacto-covid-19-sistema-salud-propuestas-para-reactivacion

Chauhan, S. (2020). Comprehensive review of coronavirus disease 2019 (COVID-19). Biomedical Journal. 43, 334-340.

Daemen, J., & Rijmen, V. (2002). The Design of Rijndael: AES - The Advanced Encryption Standard. Springer.

Organización Mundial de la Salud. (2020). Declaración de la OMS sobre el brote del nuevo coronavirus (2019-nCoV). Recuperado de https://www.who.int/es/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019

Secretaría de Salud. (2012). NOM-024-SSA3-2012. Sistemas de información de registro electrónico para la salud. Intercambio de información en salud. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx

Scielo (2020). Salud Mental de los Mexicanos durante la pandemia de COVID-19. (2020). SciELO México. https: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0016-38132021000300228

Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). The Scrum Guide: The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game. Scrum.org. https://www.scrumguides.org

Organización Mundial de la Salud. (2019). Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-11). OMS. https://www.who.int/classifications/icd

Stereoscopic Vision for Functional Electrical Stimulation Applications

Martínez Díaz, Saúl*. González Graniel, Estefanía.*

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de La Paz, Boulevard Forjadores de Baja California Sur No.4720, C.P. 23080, La Paz BCS, México,*
(e-mail: {saul.md, m17310162}@lapaz.tecnm.mx).

Abstract: Strokes are one of the leading causes of severe disability worldwide. Many of these cases result in loss of limb movement. However, survivors of strokes still retain excitable peripheral nerves and muscle tissues that can be restored. For this purpose, functional electrical stimulation can be used. Such a method requires sensors that send information about the movement of the damaged limb during rehabilitation. Typically, the sensors used are invasive, expensive and require daily calibration. Due to the above, in this work we propose to use a low-cost artificial vision system as a feedback sensor. These types of systems are non-invasive and require less effort to keep them calibrated. For this purpose, a calibrated stereoscopic vision system was implemented. With this system, angle and distance measurement tests were carried out on upper joints. The preliminary results shown low error rate in the measurements made.

Keywords: Artificial vision, stereoscopy, FES, rehabilitation, pattern recognition.

1. INTRODUCCIÓN

Los accidentes cerebrovasculares son una de las principales causas de discapacidad grave en el mundo. Aproximadamente el 30% de estos accidentes resulta en pie caído u otros problemas similares (Pilkar, et al., 2017) (Peishun, et al., 2021). Este tipo de se caracteriza por debilidad o pérdida de control en los músculos, lo cual dificulta la flexión dorsal de alguna extremidad. Sin embargo, muchos supervivientes aún conservan nervios periféricos excitables y tejidos musculares que pueden restablecerse. Para ello, normalmente se necesitan fisioterapia que ayude a recuperar sus capacidades o, al menos, para evitar una mayor pérdida de las funciones voluntarias restantes (Alouane, et al., 2019) (Page & Freeman, 2020).

La rehabilitación asistida por sistemas de control, comúnmente llamada estimulación eléctrica funcional (FES, por sus siglas en inglés) (Carvalho, et al., 2021), se ha convertido en una técnica importante del tratamiento para la rehabilitación de ese tipo de problemas. Este método proporciona la estimulación necesaria para inducir las contracciones musculares y evitar una lesión biológica mayor. Al enviar impulsos eléctricos a través de la piel y dirigirse a músculos y nervios específicos, esta técnica permite movimientos involucrados en tareas funcionales específicas. Este método se emplea ampliamente para ayudar a las personas con discapacidad neurológica a restaurar la capacidad para caminar (Meng, et al., 2017) o recuperar el movimiento de la extremidad dañada. En esos casos, el objetivo de la intervención FES es mejorar la función de dicha extremidad, ya sea sustituyendo o ayudando a los movimientos voluntarios para lograr el movimiento deseado (Khan, et al., 2023). Sin embargo, en los sistemas FES todavía existen desafíos importantes. Una cuestión clave reside en las estrategias de control de los impulsos eléctricos, ya que se requiere sincronizar los movimientos musculares con la integración de la retroalimentación sensorial. Para ello, es conveniente medir ciertos parámetros involucrados en el proceso. Algunas de las variables de interés en un sistema de rehabilitación de este tipo son la velocidad del movimiento, la aceleración y el ángulo de desplazamiento del pie.

La rehabilitación eléctrica funcional es un proceso complejo y dinámico influenciado por la fatiga muscular, el esfuerzo del paciente y la espasticidad (aumento de la rigidez muscular), que puede variar de manera impredecible durante el tratamiento. Para lograr un sistema robusto es esencial medir el movimiento humano y la contracción muscular mediante sistemas de medición livianos, portátiles y con capacidad en tiempo real (Carvalho, et al., 2021). Los sensores más comúnmente utilizados en los Sistemas FES son las Unidades de Medición Inercial (IMU, por sus siglas en inglés), electrodos biopotenciales y sistemas basados en visión artificial, en un 45%, 36.7 y 18.3% de los casos, respectivamente (González-Graniel, et al., 2024).

Las IMU's y los sensores biopotenciales deben ser colocados en el paciente, lo cual puede inducir ruido debido al movimiento; además, si la colocación de los electrodos varía un poco de un día a otro, se pueden alterar significativamente las mediciones hechas y las respuestas motoras. Por ese motivo, es preferible utilizar sensores no invasivos, tales como aquellos basados en visión artificial.

De los sistemas basados en visión artificial utilizados en sistemas FES, la mayoría utiliza cámaras RGBD o costosos sistemas de captura de movimiento. Las cámaras RGBD, aunque son de costo accesible, utilizan sensores infrarrojos, lo que dificulta su uso en lugares con iluminación natural. Por ese motivo, en este trabajo se propone el uso de un sistema de visión artificial estereoscópico como sensor para sistemas de rehabilitación asistida con FES. Algunas de las ventajas de los sistemas de visión estereoscópica son su bajo costo, no son invasivos, permiten dimensionar objetos en el mundo real y se pueden utilizar en lugares con iluminación natural. El sistema propuesto utiliza una red neuronal convolucional para detectar

el cuerpo de una persona y algunos puntos de interés, tales como las articulaciones. Con ello, el sistema es capaz de medir el ángulo de desplazamiento de la articulación y la distancia recorrida por la misma. Con esta información y considerando la cantidad de cuadros por segundo de una secuencia de video, será posible calcular su velocidad y aceleración. Estos datos servirán como señales de retroalimentación para un sistema de control de la estimulación.

2. PRINCIPIOS BÁSICOS

2.1 Sistemas FES

Los sistemas FES constan principalmente de sensores, un algoritmo de control y una unidad de estimulación de los músculos. Los sensores ofrecen información crucial al sistema, lo que permite que el controlador ajuste las salidas de estimulación en función de los cambios en los parámetros y las interacciones ambientales (Meng, et al., 2017). En este trabajo nos enfocaremos en los sensores, especialmente los basados en visión artificial.

2.2 Sensores Portátiles

Los sensores portátiles, como plantillas de presión para el pie, pedales, acelerómetros, giroscopios, unidades de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés) y electrodos de electromiografía (EMG, por sus siglas en inglés), se han utilizado ampliamente en estrategias de control de FES (Nath & Somasundaram, 2023). En particular, las IMU son las más utilizadas en este campo, ya que integran giroscopios, acelerómetros y magnetómetros para estimar los ángulos articulares y las velocidades angulares mediante técnicas de fusión de sensores. Estas medidas combinadas permiten un control detallado del movimiento en aplicaciones orientadas a la marcha, lo que permite el acceso a variables cinemáticas específicas en tiempo real, como la aceleración y la orientación de segmentos corporales relevantes, por ejemplo, el pie, el tobillo y la parte inferior y superior de la pierna. La precisión y exactitud de los sistemas de detección portátiles están influenciadas por la cantidad y la ubicación de los sensores, su alineación con el sistema de coordenadas del cuerpo y los algoritmos de procesamiento de señales empleados.

2.3 Sensores Basados en Visión Artificial

Las tecnologías no portátiles basadas en la visión que utilizan cámaras estándar o de profundidad se utilizan cada vez más para el seguimiento del movimiento humano. Recientemente se ha informado que estas cámaras pueden extraer la información detallada necesaria para los análisis biomecánicos (Salchow-Hommen, et al., 2022). Algunos estudios han explorado la aplicabilidad de Microsoft Kinect como única entrada sensorial para el control de lazo cerrado de un sistema FES (Seel, et al., 2014) (Strbac, et al., 2013). En general, Kinect requiere una cámara RGB para la captura de imágenes y un sensor de luz infrarroja para estimar la profundidad, lo cual permite obtener las coordenadas tridimensionales de los objetos. Además, utilizando una secuencia de imágenes, es posible estimar la velocidad a la que se mueven los objetos. También incluye algoritmos eficaces que permiten la detección del esqueleto corporal en tiempo real. Una de las ventajas de Microsoft Kinect es que permite estimar la distancia y el patrón de los objetos en movimiento en la escena (Strbac, et al., 2013). También se han utilizado señales de ecogenicidad derivadas de imágenes de ultrasonidos (US) para medir la activación muscular (Zahradka, et al., 2019). Los autores se refieren a la ecogenicidad como la capacidad de reflejar las ondas ultrasónicas en el contexto de los tejidos circundantes, y puede utilizarse para estimar su desplazamiento. La ecogenicidad se obtiene calculando la intensidad media de los pixeles, dentro de una región de interés en cada fotograma de las imágenes generadas. Sin embargo, debido al elevado costo de procesamiento de las imágenes de este tipo, la frecuencia de muestreo que permite esta técnica es baja. Otro enfoque, que aparentemente ha sido poco utilizado para este fin es el uso de sistemas de visión estereoscópica. Un sistema de visión estereoscópico requiere sólo dos cámaras RGB calibradas para estimar la distancia tridimensional entre objetos, utilizando un proceso llamado triangulación, el cual se lleva a cabo entre puntos correspondientes al mismo objeto, visto desde ambas cámaras. El hardware necesario para estos sistemas puede ser incluso más barato que el de las cámaras de profundidad tipo RGBD.

2.4 Visión Estereoscópica

La visión estereoscópica se refiere a la habilidad de obtener información sobre la estructura tridimensional de una escena, utilizando dos o más imágenes capturadas desde diferentes ángulos. Se basa en la capacidad del ser humano de percibir el mundo en tres dimensiones, utilizando la disparidad de sus dos ojos. Los principales pasos del proceso en un sistema de la visión estereoscópica son:

- Capturar imágenes de la misma escena con al menos dos cámaras calibradas y con perspectivas ligeramente diferentes
- Remover las distorsiones radiales y tangenciales
- Rectificar las imágenes para reducir distorsiones
- Identificar puntos de interés en cada imagen
- Emparejar puntos correspondientes en ambas imágenes

Una vez identificados los puntos correspondientes, utilizando los parámetros obtenidos en un proceso de calibración de las cámaras, es posible calcular la distancia entre ellos mediante un proceso de triangulación (Bradski & Kaehler, 2008). Además, si se utiliza una secuencia de video, es posible determinar la rotación y traslación de los objetos en movimiento con respecto a las cámaras.

2.5 Calibración de cámaras

La calibración de la cámara nos proporciona un modelo de su geometría, las distorsiones causadas por las lentes y una estimación de los parámetros intrínsecos y extrínsecos. Dicha información es esencial para poder estimar la distancia real de los objetos presentes en una escena. Esto se suele lograr utilizando puntos conocidos en el mundo real y los puntos correspondientes proyectados en la imagen. Estos parámetros pueden utilizarse para corregir distorsiones geométricas

causadas por las lentes, estimar el movimiento de objetos o medir su tamaño. Para la representación de un punto tridimensional $\mathbf{P} = [X,Y,X,1]^T$ del mundo real en un punto bidimensional $\mathbf{P'} = [x, y, 1]^T$ en el plano de la cámara se puede utilizar el mapeo

$$\lambda \mathbf{P'} = \mathbf{A}[\mathbf{R}\ \mathbf{t}]\mathbf{P} \quad (1)$$

Donde $[\mathbf{R}\ \mathbf{t}]$ es una matriz de parámetros extrínsecos (rotación y traslación), λ es un factor de escala arbitrario, el cual se puede estimar utilizando el proceso de triangulación y $\mathbf{A}$ es una matriz de parámetros intrínsecos de la forma:

$$A = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Aquí, f_x y f_y representan la distancia focal con respecto a cada coordenada, c_x, c_y son los puntos centrales de la imagen y s se conoce como sesgo y representa el ángulo de inclinación del píxel.

2.6 Triangulación

Para este proceso se supone que las imágenes no tienen distorsión alguna, han sido rectificadas, la distancia a la que se encuentran una cámara de la otra es conocida, al igual que los puntos principales de ambas cámaras (Un punto principal es donde el rayo principal interseca el plano de imagen) y, además, se conoce la distancia focal (distancia perpendicular del plano de la cámara al foco). En ese caso, la profundidad es inversamente proporcional a la disparidad entre ambas vistas. El algoritmo de triangulación utiliza el concepto de semejanza de triángulos para calcular la distancia del foco de la cámara a los objetos del mundo real.

Bajo esas condiciones y suponiendo que x_l y x_r son las coordenadas horizontales de los mismos puntos proyectados en las cámaras izquierda y derecha. La profundidad Z se puede calcular por

$$Z = \frac{fT}{x_l - x_r} \quad (3)$$

Donde f es la distancia focal y T es la distancia (traslación) entre el origen de coordenadas de cada cámara.

2.7 Redes neuronales convolucionales

Una parte fundamental en el desarrollo de este trabajo es la detección de las articulaciones. Para ello se utilizó una Red Neuronal Convolucional (CNN, por sus siglas en inglés). A diferencia de los métodos tradicionales de aprendizaje automático para la clasificación, en los que las características deben elegirse manualmente y extraerse con algoritmos especializados, las CNN´s descubren automáticamente las características relevantes de los datos. Los componentes básicos de una CNN son una capa de entrada, una capa de salida y muchas capas ocultas (LeCun, et al., 2015). Cada capa oculta puede efectuar una de las siguientes funciones:

Convolución. Es una operación que se realiza entre una señal de entrada f y un filtro g. Para imágenes digitales dicha operación se puede definir por

$$\sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} f(i,j)g(x+i, y+j) \quad (4)$$

Cada capa convolucional oculta suele realizar esta operación entre la una imagen de entrada y un banco de filtros. La idea es que cada filtro active ciertas características de la imagen. Los coeficientes de los filtros se inicializan de manera aleatoria y se ajustan en la etapa de entrenamiento de la red.

Agrupamiento. Se utiliza para fusionar características semánticamente similares en una sola, para simplificar la salida. Esto se logra realizando un muestreo descendente no lineal, lo que reduce la cantidad de parámetros que la red necesita aprender. Una capa de agrupamiento toma un tamaño de agrupación como hiperparámetro. El procesamiento de la imagen de entrada es el siguiente: dividir la imagen en una cuadrícula en subáreas (generalmente de 2 x 2) y tomar de cada subárea un valor de pixel representativo (normalmente se utiliza el valor máximo).

Rectificación. El resultado de la convolución se pasa luego a través de una función no lineal. Generalmente, dicha función rectifica la señal de entrada, esto es, se asigna un valor de cero a los valores negativos y se mantienen los valores positivos. Esta rectificación permite un entrenamiento más rápido y efectivo de la red.

Estas tres operaciones se pueden repetir decenas o miles de veces. La penúltima capa es una capa completamente conectada que genera un vector de K dimensiones, donde K representa el número de clases que la red podrá predecir. Este vector contiene las probabilidades de cada clase de cualquier imagen que se clasifique. La capa final de la arquitectura CNN utiliza una función Softmax para generar el resultado final de la clasificación.

Actualmente, existen una gran cantidad de arquitecturas de redes disponibles. Muchas de ellas están optimizadas para aplicaciones específicas tales como el reconocimiento de personas, reconocimiento de objetos, segmentación semántica, reconocimiento de sismos, etc.

3. SISTEMA PROPUESTO

Se propone un sistema de visión estereoscópica utilizando dos cámaras calibradas. Las cámaras se calibraron con el método propuesto por Zhang (Zhang, 2000). Dicho método se basa en la observación desde varias posiciones de una imagen plana, tipo tablero de ajedrez. Con este método de calibración se obtienen los parámetros intrínsecos y extrínsecos de cada cámara.

El sistema detecta las personas y algunos puntos de interés (marcadores) en la cara y las articulaciones del cuerpo, mediante una red neuronal convolucional. La red utilizada se basa en la arquitectura MobileNetV2 (Sandler, et al., 2018), la cual está optimizado para aplicaciones de entrenamiento físico en tiempo real. Ésta CNN cuenta con 53 capas, fue entrenada con más de un millón de imágenes y es capaz de clasificar objetos pertenecientes a mil categorías diferentes. Dicha arquitectura es una variante del modelo BlazePose (Bazarevsky, et al., 2020). BlazePose detecta primero el rostro de una persona y luego, utilizando como base la alineación de

la cadera y los hombros, predice otros parámetros adicionales específicos como son el punto medio entre las caderas de la persona, el tamaño del círculo que la circunscribe y la inclinación del cuerpo. Para la detección de personas y puntos de interés se utilizó Python con las librerías de CVZONE (Murtaza, 2024). Dicho paquete incluye el soporte necesario de las librerías OPENCV y MEDIAPIPE. La figura 1 muestra los puntos de interés que se detectan.

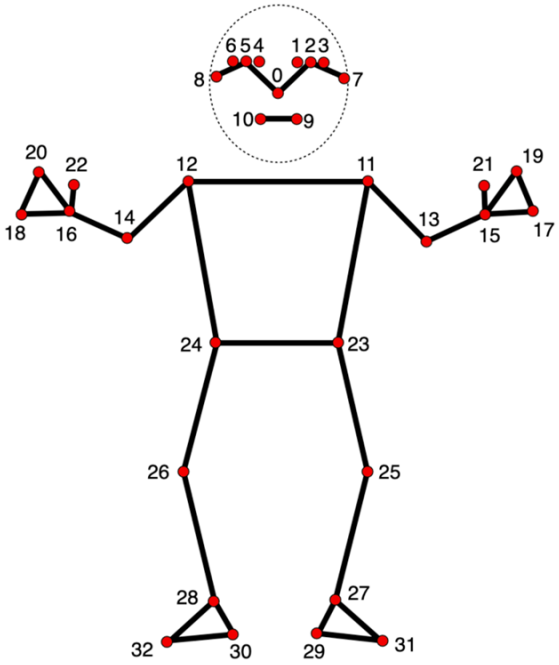


Figura 1. Puntos de interés detectados por la red neuronal incluida con MediaPipe.

Con los puntos de interés identificados de las articulaciones se calculan los ángulos entre las líneas rectas que pasan por cada par de marcadores. Para estimar la distancia recorrida por un objeto, una vez que se han obtenido los puntos correspondientes a las imágenes de ambas cámaras, se procede como sigue:

- Se toman como coordenadas de origen las encontradas en la primera imagen de una secuencia de video.
- En cada cuadro se aplica la triangulación para estimar la localización actual.
- Se obtiene la diferencia entre la localización actual y la localización anterior.

Con la información anterior, será posible estimar la velocidad y aceleración del objeto.

4. RESULTADOS

4.1 Configuración inicial

Todas las pruebas se realizaron dentro de un salón, en condiciones controladas de iluminación. Para realizar los experimentos se utilizaron dos cámaras web Logitec con una resolución de 640x480 pixeles, dispuestas como se muestra en la figura 2. La estimación de distancias se desarrolló utilizando las funciones estándar de Python. El cálculo de distancias tridimensionales mediante triangulación se llevó a cabo utilizando las librerías de OPENCV.



Figura 2. Arreglo de cámaras utilizado.

4.2 Pruebas de Cálculo de Distancia

Para este caso se colocó la cámara a diferentes distancias del objeto de prueba, variando desde 0.6 m hasta 3 m en pasos de 10 cm. Cada prueba de distancia se repitió 30 veces y se promediaron los resultados. La tabla 1 muestra parte de los resultados obtenidos de la distancia real, la distancia estimada y el porcentaje de error absoluto de la estimación. Como se puede apreciar, el porcentaje de error tiende a incrementarse conforme aumenta la distancia. Mas allá de 3 metros la medición ya no es confiable. Dicho error se podría reducir aumentando la resolución de las cámaras utilizadas; con ello se podría lograr una buena estimación a distancias mayores.

4.3 Pruebas de Medición de Ángulos

Para realizar esta prueba se colocó el brazo de una persona en diferentes posiciones. Se comparó el ángulo estimado con el medido con un goniómetro, en cada caso. La figura 3 es un ejemplo de los puntos de interés detectados y el ángulo estimado por el sistema. Los puntos utilizados para el cálculo del ángulo están encerrados en un círculo rojo. Los ángulos se variaron desde 185° hasta 300° con respecto a la horizontal. Estos son los valores más comunes de desplazamiento de la articulación. Para garantizar resultados estadísticamente correctos, se repitió cada prueba 30 veces para cada ángulo y se promediaron los resultados. La tabla 2 muestra una parte representativa de los resultados obtenidos del ángulo real, el ángulo estimado y el porcentaje de error absoluto en cada medición. El porcentaje de error máximo obtenido fue de 5.18%.

Tabla 1. Comparación de distancia real vs estimada

Distancia real (m)	distancia estimada (m)	Porcentaje de error absoluto promedio
0.6	0.591 ± 0.022	1.50 %
1.1	1.063 ± 0.042	3.36 %
1.6	1.507 ± 0.055	5.81 %
2.1	1.978 ± 0.081	5.90 %
2.6	2.367 ± 0.11	8.96 %

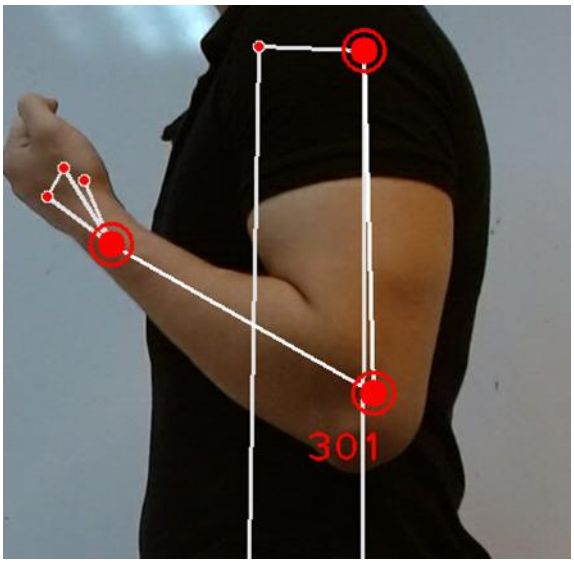


Figura 3. Ejemplo de imagen utilizada para estimar ángulos. Los puntos de interés utilizados están dentro de un círculo

Tabla 2. Comparación de distancia real vs estimada

Ángulo real (°)	Ángulo estimado (°)	Porcentaje de error absoluto promedio
185	184.32 ± 0.3	0.36 %
208	214.21 ± 0.8	2.98 %
228	237 ± 1.02	3.96 %
255	266.68 ± 1.1	4.58 %
300	301.187 ± 0.4	0.39 %

4.4 Discusión

Como se puede observar en la tabla 1, el error porcentual tiende a aumentar cuando la distancia a la que se encuentra el objeto es mayor. Después de 3 metros el error ya es considerable (mayor al 10 %). Esto se debe a que, a mayor distancia, cada pixel representa una mayor área, lo cual reduce la precisión. Sin embargo, utilizando una mayor resolución en las cámaras, se puede alcanzar una mejor precisión a mayores distancias. Por otro lado, en la tabla 2 se aprecia que en algunos ángulos el error porcentual es mayor. Esto se debe a la cercanía entre algunos puntos de interés detectados, los cuales llegan a ser confundidos por el algoritmo. Sin embargo, aún en el peor caso, el error se mantiene acotado por debajo de 5 %. Los resultados anteriores muestran la factibilidad del método propuesto para utilizarse en la rehabilitación motriz. Más aún, cuando se aplique a una secuencia de video, se puede aplicar un algoritmo adicional que estime el valor más probable de distancia y ángulo en la siguiente imagen. Con esa información se puede reajustar el próximo valor que se obtenga, al mismo tiempo que se mejora la predicción. Con ello se puede reducir aún más el error en las mediciones.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un sistema para calcular ángulos y distancias para su posterior aplicación en un sistema de rehabilitación para personas con problemas de pie caído. Los resultados obtenidos muestran que el método propuesto puede ser aplicado en situaciones controladas de rehabilitación, a cortas distancias. Incluso, aumentando la resolución de las cámaras, se podrá aplicar a mayores distancias. El trabajo futuro incluye la implementación de algoritmos de predicción de posición y ángulo, el cálculo de velocidad y aceleración en secuencias de video, así como la implementación del sistema completo de control y la búsqueda de algoritmos de control robustos.

REFERENCIAS

Alouane, M. A. y otros, 2019. Hybrid impedance control of a knee joint orthosis. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application,* 46(2), pp. 192-201.

Bazarevsky, V. y otros, 2020. *BlazePose: On-device Real-time Body Pose tracking.* [En línea]
Available at: https://arxiv.org/abs/2006.10204
[Último acceso: 10 April 2025].

Bradski, G. & Kaehler, A., 2008. *Learning OpenCV.* 1 ed. Sebastopol: O'Reilly.

Carvalho, S. y otros, 2021. Functional electrical stimulation system for drop foot correction using a dynamic narx neural network. *Machines,* 9(11).

González-Graniel, E. y otros, 2024. Sensing and Control Strategies Used in FES Systems Aimed at Assistance and Rehabilitation of Foot Drop: A Systematic Literature Review. *Journal of Personalized Medicine,* Volumen 14.

Khan, M. A. y otros, 2023. A systematic review on functional electrical stimulation based rehabilitation systems for upper limb post-stroke recovery. *Frontiers in Neurology,* Volumen 14.

LeCun, Y., Bengio, Y. & Hinton, G., 2015. Deep learning. *Nature ,* Volumen 521, pp. 436-444.

Meng, L., Porr, B. & Gollee, H., 2017. Technical developments of functional electrical stimulation to restore gait functions: sensing, control strategies, and current commercial systems. *Chinese Journal of Scientific Instrument,* Volumen 6, pp. 1319-1334.

Murtaza, H., 2024. *CVZONE.* [En línea]
Available at: https://github.com/cvzone/cvzone/tree/master
[Último acceso: 2 9 2024].

Nath, R. & Somasundaram, C., 2023. Incidence, etiology, and risk factors associated with foot drop. *Eplasty,* Volumen 23.

Page, A. & Freeman, C., 2020. Point-to-point repetitive control of functional electrical stimulation for drop-foot. *Control Engineering Practice,* Volumen 96.

Peishun, C. y otros, 2021. Changes in gait characteristics of stroke patients with foot drop after the combination treatment of foot drop stimulator and moving treadmill training. *Neural plasticity,* Volumen 1.

Pilkar, R., Ramanujam, A. & Nolan, K., 2017. Alterations in spectral attributes of surface electromyograms after utilization of a foot drop stimulator during post-stroke gait. *Frontiers in neurology,* 8(499).

Salchow-Hommen, C. y otros, 2022. Emerging portable technologies for gait analysis in neurological disorders. *Frontiers in Human Neuroscience,* Volumen 16.
Sandler, M. y otros, 2018. *MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks.* Salt Lake City, IEEE.
Seel, T., Raisch, J. & Schauer, T., 2014. Imu-based joint angle measurement for gait analysis. *Sensors,* 14(4), pp. 6891-6909.
Strbac, M., Malesevic, N., Cobeljic, R. & Schwirtlich, L., 2013. Feedback control of the forearm movement of tetraplegic patient based on microsoft kinect and multipad electrodes. *Journal of Automatic Control,* 21(1), pp. 7-11.
Zahradka, N. y otros, 2019. Evaluation of gait phase detection delay compensation strategies to control a gyroscope-controlled functional electrical stimulation system during walking. *Sensors,* 19(11).
Zhang, Z., 2000. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* 22(11), pp. 1330-1334.

Development of a Gesture-Controlled Robot Assistant for Transporting Oxygen Tanks

Guadalupe Salas, Jesús Ivan Contreras, Abril Jiménez, Juan Manuel Hernández

** Tecnológico Nacional de México campus Orizaba*

Avenida Oriente 9 No. 852. Col. Emiliano Zapata.Orizaba, Veracruz, México

(e-mail: guadalupe.sl@orizaba.tecnm.mx / gsalasmx@gmail.com)

Abstract: This work presents the design and development of a robot that allows users with pulmonary conditions to transport a portable oxygen tank through gestural communication. This is achieved through a glove with an ESP32, a pulse oximeter, and an accelerometer that transmits signals via communication Bluetooth to a robot called BOXY. The robot, composed of an Arduino Uno, gear motors, gas and ultrasonic sensors, and a Bluetooth module, follows the patient based on signals from the accelerometer. Additionally, the glove is linked to a mobile application that records and monitors the patient's vital signs. The design of BOXY was created using programs such as Fusion 360 for 3D modeling, EasyEDA for circuits and PCBs, Arduino IDE for programming, and Kodular for the mobile app. The 3D parts were printed in PLA and PETG and assembled with the circuits for functionality testing. The goal of Oxygen Go is to improve the quality of life for oxygen-dependent individuals, directly impacting the healthcare sector by providing them with comfort and safety throughout their therapy. This can be confirmed as a functional prototype physically exists. However, it presents some issues with Bluetooth communication, stability problems in the robot's wheels, and difficulties in object detection. The glove, which uses an ESP32, has no connection issues and correctly monitors vital signs through the app. Although the app has a good design and functionality, there are some issues with the transmission of vital sign data.

Keywords: Robot Assistant, Oxygen, Gesture-Controlled

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen productos que permiten la movilidad de las personas oxigeno dependientes a través de un sistema manual. Estos requieren de un esfuerzo adicional, convirtiéndose en una limitante al tener que estar tirando de un tanque de oxígeno medicinal pesado, reduciendo la actividad física y la realización de diversas tareas cotidianas.

Ciertas personas con enfermedades respiratorias requieren de oxígeno medicinal para preservar su calidad de vida; "las fuentes fijas de oxígeno pueden limitar las actividades diarias de los pacientes y contribuir al deterioro físico y mental." (Marien, Marchand, 2011) , y, en consecuencia, se han implementado equipos de oxigenoterapia portátiles para aquellos pacientes que sean postulantes a este tipo de técnica médica.

American Thoracic Society (2021) reveló en una encuesta que los principales problemas para las personas oxigeno dependientes al tener un equipo de oxígeno portátil son: peso, portabilidad, movilidad y transporte, teniendo respuestas como "Mi tanque de oxígeno portátil es como arrastrar el motor de un barco detrás de mí", "Puedo ir de dos a cuatro semanas y no salir de mi casa. Mi esposo hace las compras que yo solía hacer. Con lo que tengo ahora me impide ser más activo y lo necesito mucho. Utilizó un cochecito de bebé para sostener el tanque de oxígeno", "El peso de un concentrador de oxígeno portátil (POC) aumenta mi esfuerzo y provoca una mayor dificultad para respirar mientras realizo las actividades diarias fuera de casa", entre otras.

Ante estos problemas, se ha propuesto un robot que pueda seguir al paciente a donde vaya, siendo este, un nuevo equipo de asistencia médica con diferentes funciones, para brindar autonomía y movilidad, de manera que mejore su calidad de vida.

Ya existen los carros de oxígeno medicinal solo que no existe algún producto en el mercado o propuesta previa, diseñada específicamente para equipo de oxigenoterapia, que le brinde al paciente tener una mejor movilidad y diseño a su necesidad.

Las tecnologías en la medicina han tenido un impacto considerable en el tratamiento de diversas enfermedades, cada vez estas son actualizadas con el fin de dar una atención más especializada a los pacientes. Un ejemplo claro es la telemedicina. Jackie Hsu (2021), el vicepresidente senior de ASUS, señala que "La telemedicina será uno de los impulsores clave de la provisión de atención médica a medida que el

mundo avanza tanto desde la pandemia de COVID-19 la cual mostró el uso de la oxigenoterapia como un medio de supervivencia.

2. METODOLOGÍA

El prototipo funcional consiste en un guante y un robot que en conjunto lleva el nombre de BOXY. El primero contiene un microcontrolador modular ESP32, un sensor oxímetro y un acelerómetro; su funcionalidad se basa en recibir la señal de las fuerzas de los diferentes componentes del acelerómetro, el ESP32, configurado como maestro, se encarga de codificar la señal recibida por el acelerómetro y se comunica mediante comunicación bluetooth hacia BOXY, configurado como esclavo para que este realice las acciones de seguimiento al paciente: se requiere que la mano que contiene el guante tenga la palma en dirección al suelo y realizar dos movimientos seguidos de muñeca hacia arriba (avanzar), abajo (retroceder), izquierda (dar vuelta a la izquierda), derecha (dar vuelta a la derecha), mantener 2 segundos y luego regresar a la posición inicial (Fig. 1).

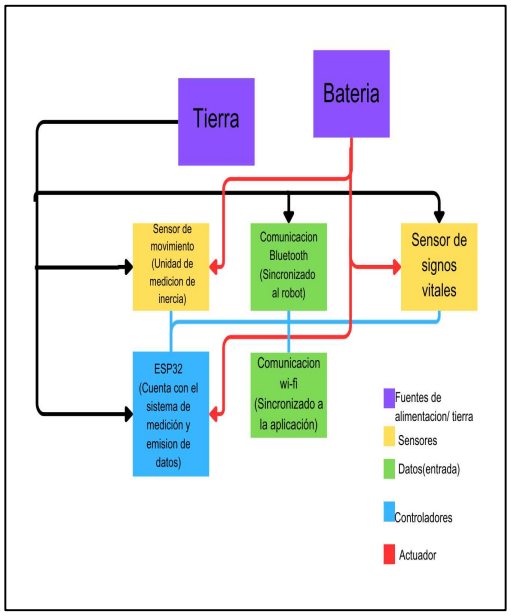


Fig. 1. Diagrama a bloques del guante

A su vez, cuenta con una aplicación para celular que registra los datos "Oxigenación" y "Frecuencia Cardiaca" los cuales son obtenidos del sensor oxímetro y se conservan hasta que este mismo genere nuevos resultados sobre el estado del paciente, esto permite tener un control y monitoreo de sus signos vitales. Incluye una visualización de las partes por millón detectadas por el sensor de gas en el ambiente, para que el paciente pueda saber si el lugar en el que está es seguro (Fig. 2).

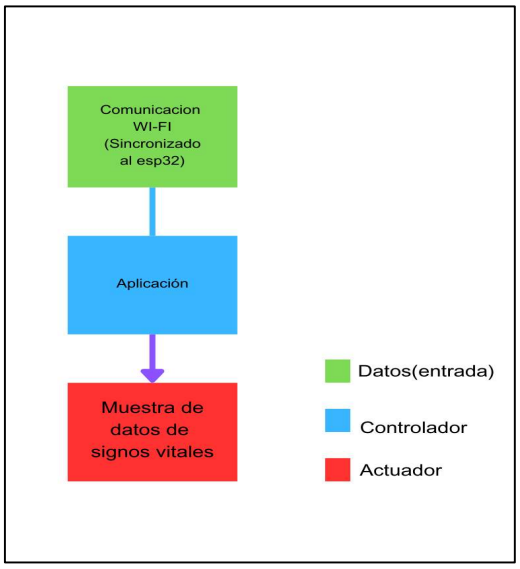


Fig. 2. Diagrama a bloques de la aplicación

El robot está compuesto por una tarjeta Arduino, dos motorreductores de 50 rpm, un sensor de gas, un sensor ultrasónico, un puente H, un buzzer y un módulo de comunicación Bluetooth. Este último recibe señales provenientes del acelerómetro, las cuales son enviadas a través del ESP32 y las transmite a la tarjeta Arduino, que se encarga de interpretar la información. La función principal de la tarjeta Arduino es emitir señales al puente H, el cual modula una señal de pulso(PWM) para controlar los dos motorreductores. El sensor ultrasónico actúa como un sistema de evasión de obstáculos; envía una señal a la tarjeta Arduino, que a su vez detiene los motores mediante una señal al puente H hasta que el obstáculo se encuentra fuera del rango de detección. Además, el sensor de gas emite una señal a la tarjeta Arduino, que activa el buzzer, alertando al paciente sobre la presencia de un ambiente potencialmente peligroso (Fig. 3).

Se eligieron usuarios simulados que representaban el perfil de usuario objetivo de BOXY. Esto permitió obtener una variedad de opiniones y sugerencias sobre la experiencia de uso del dispositivo.

- Pruebas de Usabilidad: Los usuarios simulados realizaron diversas tareas utilizando BOXY, centrándose en la interacción con el guante y el robot. Durante estas pruebas, se observó su comportamiento y se registraron sus comentarios en tiempo real.
- Recolección de Datos: Se implementaron encuestas y entrevistas después de las pruebas para recopilar comentarios y sugerencias de los usuarios.

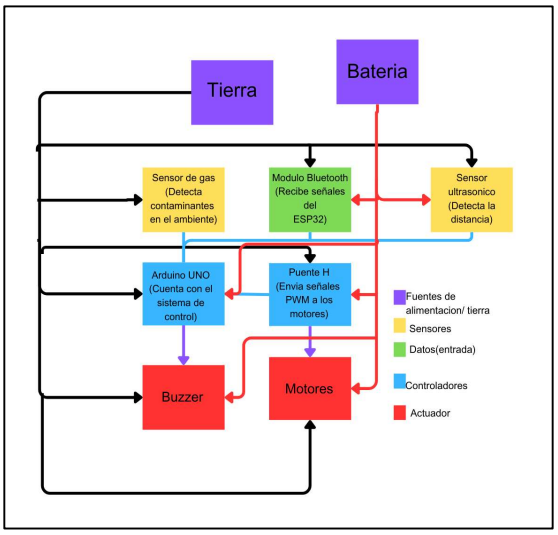


Fig. 3. Diagrama a bloques de BOXY

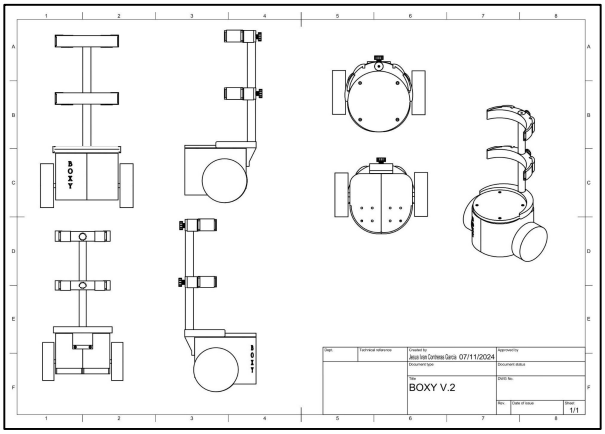


Fig. 4. Diseño CAD del robot

Para la elaboración y funcionamiento del robot, se usaron diversos softwares, como lo son: Fusion 360, EasyEDA, Creality, Arduino IDE y Kodular. En primer lugar, Fusión 360 fue una herramienta esencial para el modelado de las piezas 3D y los diagramas CAD. EasyEDA, al ser un software en línea gratuito, se utilizó para diseñar circuitos eléctricos y placas de circuitos impresos pcb´s. En la parte de la programación, se usó Arduino IDE que es un entorno de desarrollo integrado donde se escribieron los códigos para el control del robot, para el desarrollo de la aplicación para el monitoreo de signos vitales, se optó por Kodular (Fig. 4).

Teniendo ya el sistema y el diseño de la estructura del prototipo, se inició la impresión de las piezas 3D por medio de Creality, que es un programa que cumple esa función. Dichas piezas fueron impresas en PLA y PETG, después de obtener los materiales y las piezas para la realización de la impresión 3D, se ensambló la estructura del robot y se montaron los circuitos para realizar las pruebas de funcionamiento (Fig. 5).

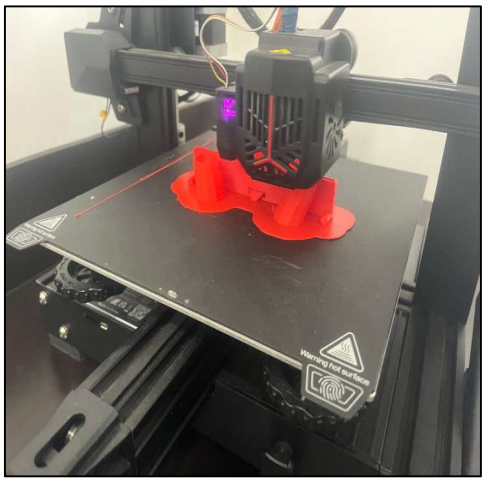


Fig. 5. Impresión 3D de una pieza del prototipo

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Se tiene como resultado el prototipo de dispositivo funcional que puede ser controlado mediante gestos de la mano para ayudar al paciente a transportar un tanque de oxígeno portátil.

Se imprimió la versión 1.0 del robot, esto debido a la falta de material y al escaso tiempo que se tuvo para su presentación en el evento de la Cumbre Nacional de Desarrollo, Tecnológico, Emprendimiento e Innovación Innovatecnm 2024 (fig. 6).

En este video se puede observar el funcionamiento de BOXY versión 1.0:

https://drive.google.com/file/d/1iiYvXXqaQqvWW2YmRrQ4Z4j34r54UpJg/view?usp=drive_link



Fig. 6. BOXY físicamente.

Sin embargo, estas funciones presentan algunos fallos de comunicación, específicamente al transferir la información de

las acciones a realizar de la comunicación Bluetooth hacia el robot, estas ocurren en cuanto se hace un cambio de dirección al robot de manera rápida, sin dejar los 2 segundos de ajuste del acelerómetro, esto mismo puede traer como consecuencia la desvinculación de la comunicación Bluetooth, alguna mala conexión, o que el acelerómetro no esté mandando los datos correctos. Respecto a la movilidad del robot, el problema se encuentra en la estabilidad de las ruedas: se llegó a la conclusión de que este modelo de ruedas no es el más adecuado para el robot, ya que estas, al encontrarse en un terreno irregular y lleno de obstáculos, se atascan y pierden tracción, impidiendo el avance del vehículo , lo que no permite una funcionalidad óptima.

Los sistemas de detección de humo y evasión de obstáculos implementados funcionan de manera correcta a pesar de que este último solo logra detectar objetos que estén dentro de su rango de efectividad, esto se refiere a que cumplan ciertas características para que la detección sea favorable.

Por otra parte, el guante no presenta los mismos problemas de conexiones del módulo de comunicación Bluetooth como se presentan con el robot puesto que se utilizó un ESP32 que cuenta con comunicación Bluetooth y wi-fi integrado. Las funciones de monitoreo de signos vitales funcionan en su totalidad ya que en la aplicación se pueden ver los datos recabados, esto se logra gracias a la comunicación wi-fi que hay entre el ESP32 y la aplicación. En términos de comodidad, el material del que está hecha la impresión 3D es muy rígido, esto genera la impresión de portar algo extraño en el brazo, ya que los componentes utilizados son de gran tamaño.

La aplicación cuenta con buen diseño y funcionalidad, a pesar de tener detalles con la transmisión de los datos de los signos vitales medidos por el sensor oxímetro; esta aplicación se conecta con el ESP32 por medio de wi-fi y al vincularse con ella es necesario introducir la nueva dirección de la IP. A su vez, su interfaz con el usuario es intuitiva y eficiente, proporciona información acerca del estado de conexión del robot con la app y en cuanto a la estética, los datos mostrados se pueden ver de manera clara y fácil.

Se realizaron pruebas con usuarios simulados, donde pudieron experimentar el uso de la primera versión de BOXY; se recibieron comentarios y sugerencias, los usuarios manifestaron incomodidad en el material del guante por ser rígido la sensación del peso y del tamaño en el brazo después de un tiempo.

De BOXY se recibieron buenos comentarios: la velocidad del robot es la adecuada, la facilidad para controlar los movimientos del robot, y lo que más destacaba el usuario era la importancia del sensor de humo, ya que mencionan que cada vez que no estaban en un ambiente óptimo sonaba el buzzer para alertarlos. Por otro lado, no les gustó mucho el sistema de evasión de obstáculos porque cada vez que detectaba un objeto demasiado cerca de boxy tenían que volver a realizar el gesto de la acción en la que se detuvo

La aplicación fue del agrado del usuario debido a que tiene un diseño intuitivo en el que se puede visualizar muy bien la lectura de la frecuencia cardiaca y la oxigenación de la sangre, al igual que las partes por millón que se encuentran en la atmósfera.

4. CONCLUSIONES

Como conclusión, se puede observar un progreso significativo en el cumplimiento del objetivo planteado para el robot, lo cual sugiere que existe una alta probabilidad de éxito para mejorar la transportabilidad de los tanques de oxígeno en personas con afecciones pulmonares, aunque aún quedan aspectos por mejorar y perfeccionar.

Gracias a la metodología llevada a cabo para el progreso del robot, se pudo desarrollar un prototipo funcional conformado por tres elementos: guante, BOXY y la aplicación de usuario.

Es de suma importancia considerar mejoras para la optimización del robot:

- Robot: Se pretende implementar mejoras en la autonomía del mismo agregando un sistema de seguimiento autónomo, lo que permitirá al paciente eliminar la necesidad de realizar gestos para el control del dispositivo.
- Guante: Mejorar el diseño del guante es la mejora más significativa; esto incluye buscar que sea lo más cómodo posible, casi imperceptible, de manera que el paciente se sienta con mayor libertad en su vida diaria.
- Aplicación: Resolver el problema de la conexión wifi del ESP32 y optimizar su fluidez en el procesamiento de datos.

REFERENCIAS

Asus. (2021, May 4). ASUS e Intel unen fuerzas para construir carros médicos móviles en apoyo a la lucha contra COVID-19 [ASUS and Intel join forces to build mobile medical carts in support of the fight against COVID-19]. ASUS México. https://www.asus.com/mx/news/kvbk8ymzwnittjuz

Dakkak, J., Tang, W., Smith, J. T., Balasubramanian, A., Mattson, M., Ainechi, A., Dudley, B., Hill, M. N., Mathai, S. C., McCormack, M. C., Acharya, S., & Danoff, S. K. (2021). Burden and unmet needs with portable oxygen in patients on long-term oxygen therapy. *Annals of the American Thoracic Society*, 18(9), 1498–1505. https://doi.org/10.1513/annalsats.202005-487OC

Díaz Lobato, S., & Mayoralas Alises, S. (2012). Perfiles de movilidad de los pacientes con oxigenoterapia crónica domiciliaria [Mobility profiles of patients with chronic home oxygen therapy]. *Archivos de Bronconeumología*, 48(2), 55–60. https://doi.org/10.1016/j.arbres.2011.10.002

APPSI: Extraction, Analysis, and Visualization Platform of Georeferenced Data Related to Mental Health

Gandhi Hernández-Chan * **Matilde Jiménez-Coello** **
Manuel Sosa-Correa ** **Sally Vanega-Romero** **

* *Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial - SECIHTI, PCTY carretera Sierra Papacal - Chuburná Pto Km5.5 (e-mail: ghernandez@centrogeo.edu.mx).*
** *Universidad Autónoma de Yucatán - Facultad de Psicología, Carretera Tizimin-Cholul Km1, 97305 Mérida, Yuc. (e-mail: mjcoello, mscorrea@correo.uady.mx, svanega@correo.uady.mx {@correo.uady.mx})*

ResumenYucatan is one of the states in Mexico that has historically maintained a high suicide rate compared to other states, consistently exceeding the national average. The serious problem of suicide in Yucatan is observable through the constant publication of cases in local newspapers and verifiable through official sources such as the INEGI (National Institute of Statistics and Geography). The suicide rate has shown an upward trend in recent years. INEGI data reports that, in 2020, Yucatan had the third highest suicide rate in the country, at 10.4 per 100,000 inhabitants. In 2021, suicides continued to rise, surpassing 264 in November of that year. In October 2023, Yucatan again ranked first in the suicide rate. This scenario has raised alarm bells among scientists, the community, business leaders, and authorities, who have joined forces to create a platform for extracting, analyzing, and visualizing georeferenced data related to mental health in the Yucatecan population and associated factors named APPSI (Application of Psychological Tests) and the Yucatan Mental Health Observatory, aimed to deepen understanding and support informed decision-making for the development of strategies to reduce risk factors and, ultimately, lower suicide rates. The platform was created by researchers of the Geointeligence National Laboratory and the Autonomus University of Yucatan.

Keywords: Mental health, screening, observatory, georeferenced, suicide

1. INTRODUCCIÓN

Por más de una década Yucatán ha presentado tasas de suicidio por arriba de la media nacional, manteniéndose de manera constante en los primeros cinco lugares en este indicador de salud. Esto resulta contrastante al ser un estado que, a la par, ha experimentado un contínuo y acelerado crecimiento económico y demográfico fomentado, en gran parte, por todas las vetajas que la zona ofrece, comenzando por la seguridad (bajo índice delictivo), la infraestructura (hospitales, escuelas, universidades, centros comerciales), gastronomía y turismo (cercanía con playas, cenotes y zonas arqueológicas y cercanía con playas del caribe mexicano), cultura (la lengua maya como segundo idioma), etc. Los medios periodísticos y otros medios publicitarios destacan constantemente estas ventajas de la región, pero también, de manera constante publican noticias de casos de suicidio o autolesión en el estado. Este ha sido el punto de partida del grupo de investigadores del Centro de Investigción en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo), el Laboratorio Nacional de Geointeligencia (GeoInt) y la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) quienes colaboran con este proyecto. Los resultados de uno de los primeros pasos de este proceso de investigación se muestra en Hernández-Chan et al. (2021) en donde los autores presentan el desarrollo de un análisis del contenido semántico de noticias de suicidio encontrando las principales causas atribuídas por los medios.

En la nube de palabras que se muestra en la Fig. 1, se puede observar que las causas principales según los medios son las discusiones de pareja, especialmente con la esposa, lo cual podría explicar en cierta medida la tendencia más elevada del género masculino hacia la vulnerabilidad. Además, se mencionan en menor medida problemas de depresión, drogadicción y alcoholismo.

A pesar de contar con estas pistas, se considera que estas causas son solamente detonantes. Es decir, que existen problemas previos de salud mental que colocan al idividuo en situaciones vulnerables.

⋆ Agradecemos a nuestras instituciones de adscripción y al Laboratorio Nacional de Geointeligencia (GeoInt) por todo el apoyo y facilidades otrorgadas para el desarrollo de este proyecto.



Figura 1. Causas atribuidas por los medios a casos de suicidio

Por otra parte, la Fig. 2 muestra una gráfica con los datos oficiales obtenidos de INEGI, los cuales revelan que, a nivel nacional, son los jóvenes en edades de 15 a 29 quienes resultan más vulnerables y, entre ellos, los de género masculino.

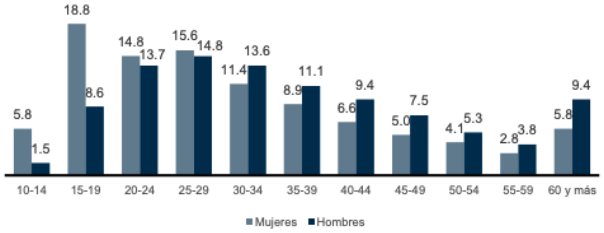


Figura 2. Suicidios registrados según grupo de edad y sexo. Fuente: INEGI

Sin embargo, en los últimos años se ha observado en los medios de comunicación (específicamente periódicos de circulación en Yucatán) la aparición de noticias que hacen alución a casos de menores y personas de la tercera edad, lo cual hace pensar que el problema, lejos de disminuir, va en incremento.

Fuentes con mayor rigor científico atribuyen las causas de autolesión o suicidio a problemas de salud mental como la depresión, ansiedad y estrés. A pesar de que la problemática no es nueva y de los esfuerzos que se han realizado con afán de abordarla, poco se ha avanzado con respecto al descubrimiento de causas o factores sociodemográficos.

Este trabajo tiene por objetivo presentar el proceso de creación y los resultados de la implementación de APPSI: Plataforma de Extracción, Análisis y Visualización de Datos Georreferenciados Relacionados con la Salud Mental, sistema que consta de dos componentes principales; por un lado la plataforma de tamizaje APPSI propiamente y por otra parte la plataforma de visualización a la que se ha demoninado Observatorio de Salud Mental.

En las siguientes secciones se muestran algunos trabajos relacionados a este proyecto desde el punto de vista del aprovechamiento de los Sistemas de Información Geoespacial (SIG) al área de la salud. Posteriormente se muestra la metodología para la construcción de este desarrollo y finalmente, en la sección de resultados, se presentan algunas gráficas con datos estadísticos que reflejan los hallazgos obtenidos a través de los procesos de extracción y análisis que forman parte de este desarrollo.

2. ANTECEDENTES

En esta sección se presentan algunos trabajos e investigaciones que se han realizado en diversas partes del mundo y que vinculan el uso de SIG y salud destacando el aprovechamiento de la georreferencia para mejorar estos servicios y hacerlos más acequibles.

Diversos estudios han demostrado que las intervenciones digitales no solo facilitan la detección temprana de síntomas de depresión, ansiedad, estrés e ideación suicida, sino que también potencian la adherencia y eficacia de las intervenciones a través de interfaces interactivas y adaptadas a las necesidades del usuario Mohr et al. (2013). La capacidad de estas plataformas para recolectar y procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real permite implementar estrategias preventivas y terapéuticas más precisas.

Por otra parte Cinnamon et al. (2009) afirman que las lesiones suponen una gran carga para los recursos de salud pública, y que esta no se distribuye de manera uniforme a lo largo del territorio, dejando zonas vulnerables demasiado alejadas de la ayuda oportuna. Esto le da un valor especial a mapear las lesiones pero aún más, a identificar zonas vulnerables a partir de la medición del riesgo con base en factores sociodemográficos. En un estudio sobre aplicaciones web interactivas de mapeo relacionadas con la salud, se observó una gran variación en cuanto a contenido, cartografía y aspectos técnicos. Tras la aplicación de la encuesta ellos crearon un sitio web con mapas de lesiones estáticos, animados e interactivos, los cuales muestran tasas de lesiones y los posibles factores de riesgo sociodemográficos para la ciudad de Toronto. Esto ha servido para demostrar varias maneras de explorar los mismos conjuntos de datos de salud pública. Los resultados destacan las opciones prácticas disponibles para los analistas de salud pública y los responsables de la toma de decisiones que desean ampliar sus herramientas de exploración de datos y apoyo a la toma de decisiones con un componente espacial.

De igual forma en Duarte et al. (2021) se menciona que los indicadores de calidad de la prevención (ICP) constituyen un conjunto de medidas que pueden combinarse con datos de pacientes hospitalizados para identificar la calidad de la atención en condiciones sensibles a la atención ambulatoria (ACSC). Los SIG, la cartografía web y las aplicaciones contribuyen a una mejor representación de la distribución espacial de los ICP. El objetivo principal de su trabajo fue facilitar la evaluación de patrones geográficos y tendencias de los datos de salud en Portugal. Para ello, se desarrollaron dos aplicaciones innovadoras de código abierto utilizando heramientas como Leaflet Javascript Library, PostGIS y GeoServer, para crear un prototipo de aplicación de mapas web. Además, usaron el lenguaje Python para desarrollar la aplicación SIG. La evaluación geoespacial de los patrones geográficos de los datos de salud en Portugal puede obtenerse mediante una aplicación SIG y una aplicación de mapas web. Ambas herramientas propuestas permitieron una evaluación fácil e intuitiva de los patrones geográficos y las tendencias temporales de los valores de los ICP en Portugal, junto con otros datos de salud relevantes, como la ubicación de los centros de salud,

que, a su vez, mostró cierta asociación entre la ubicación de los centros y la calidad de la atención médica.

Los SIG integran cartografía informática con análisis y gestión de datos, siendo ampliamente utilizados en sectores como la planificación urbana, la agricultura y, más recientemente, la salud pública. En este último ámbito, los SIG han evolucionado desde simples mapas hasta análisis geoestadísticos avanzados y plataformas interactivas o WebGIS. Su capacidad para representar visualmente datos espaciales complejos los convierte en herramientas analíticas clave, superando las funciones de la cartografía tradicional y los programas estadísticos convencionales. Aunque su adopción se ve limitada por costos y requerimientos técnicos, los SIG han demostrado su utilidad en múltiples aplicaciones de salud pública, como la vigilancia epidemiológica, la investigación de implementación y la formulación de políticas. Al facilitar la comprensión de patrones y relaciones espaciales, los SIG pueden contribuir significativamente a reducir inequidades en salud y mejorar el acceso universal a servicios médicos, especialmente en contextos de bajos recursos. Su expansión futura, impulsada por tecnologías como WebGIS, promete un impacto aún mayor en la eficacia de los sistemas de salud a nivel global Yasobant et al. (2019).

En el trabajo de Bhattacharya (2023) se menciona que en la actualidad, los gobiernos están aprovechando los sensores digitales y tecnologías como los SIG para mejorar la gobernanza y la prestación de servicios de salud pública. Sus autores afirman que la geoinformática ofrece herramientas esenciales para la investigación epidemiológica y la respuesta a brotes, al integrar la dimensión espacial y temporal en todas las fases de preparación, respuesta y recuperación ante emergencias sanitarias, y que los SIG permiten una toma de decisiones más eficiente mediante el análisis espacial, la asignación óptima de recursos, la mejora de la comunicación interinstitucional y la participación ciudadana. Su utilidad ha sido evidente en contextos como desastres naturales y pandemias, destacándose durante la crisis de COVID-19. Al integrar datos y modelos centrados en la ubicación, los SIG facilitan una estrategia eficaz para lograr la equidad en salud. Su trabajo se enfoca en analizar la aplicación de los SIG en el sistema de salud pública de la India, subrayando su potencial transformador en la formulación de políticas sanitarias futuras.

3. METODOLOGÍA

El Observatorio de Salud Mental de Yucatán es el resultado de un proceso de investigación y desarrollo tecnológico que se ha llevado a cabo entres etapas. La primera etapa corresponde al desarrollo de APPSI [1], una plataforma de extracción de datos gerreferenciados de salud mental y sociodemográficos.

Las pruebas de salud mental que se aplican a través de APPSI son (C-SSRS Columbia) para medir la ideación suicida, (dass21) para la medición de niveles de depresión, ansiedad y estrés y finalmente EAYIE (Escala AutoInformada Yucatán de Inteligencia Emocional) Sosa Correa et al. (2023) para la medición de inteligencia emocional. Además, la plataforma incluye cuestionarios adicionales que recaban información sobre la edad, género, estado civil, cantidad de hijos, dirección, municipio, tiempo de vivir en Yucatán, hábitos de alimentación, hábitos de sueño, consumo de estupefacientes, consumo de café, tenencia de mascotas, acceso a servicios de salud, economía, padecimiento de enfermedades, convivencia y relaciones familiares, etc. APPSI es accesible a través de cualquier dispiositivo con acceso a Internet.

Cabe mencionar que más allá de la información que arrojan las pruebas de salud mental, la información sociodemográfica ha sido de gran utilidad para encontrar factores correlacionados al estado emocional positivo o negativo de la población. Por ejemplo, se ha encontrado una estrecha relación con la alimentación, siendo que, quienes tienen mejores hábitos alimenticios gozan de mejor estado emocional. De igual forma, se ha econtrado diferencia en el estado emocional entre quienes viven en zona urbana y quienes viven en zona rural, siendo estos últimos más favorecidos. Aunado a esto, esta aplicación también ha servido para confimar la correlación entre el consumo de alcohol y el estado emocional, resultando en niveles más altos de depresión, ansiedad y estrés en quienes consumen alcohol con mayor frecuencia.

Los datos recabados a través de estos cuestionarios son almacenados en tiempo real en una base de datos relacional creada en MySql. Además, las respuestas a las pruebas psicológicas son revisadas y calificadas de forma inmediata por medio de algoritmos diseñados para ese propósito. Estos algoritmos se basan en el método de calificación para cada prueba o test psicológico establecido en su manual de aplicación. Los resultados de calificar las pruebas con estos algoritmos se reflejan directamente en las gráficas contenidas en el Observatorio de Salud Mental. Además, el uso de estos algoritmos para calificación abre la posibilidad de poder entregar el resultado de manera inmediata a cada una de las personas que hacen uso del sistema. Este resultado va acompañado por teléfonos de emergencia locales, con lo que se busca empoderar a cada uno de los individuos con la información acerca de su estado de salud, para que sean ellos mismos quienes ejerzan la primera acción.

Una parte importante en esta fase de extracción y almacenamiento de datos es la obtención de la georreferencia. Esta es la razón por la cual se solicita la dirección y municipio a los usuarios dentro la plataforma APPSI. Se ha optado por hacerlo de esta forma ya que, el medio para la obtención de datos ha sido dividido en dos fases. En la primera, se ofrece una plática de sensibilización acerca del cuidado de la salud mental. Dado que, al momento de la plática, todos los usuarios se encuentran concentrados en un mismo sitio, obtener la georreferencia de forma automática colocaría varios puntos demasiado cercanos y se perdería el valor de este dato, así que, una vez que se cuenta con la dirección ésta es transformada a coordenadas utilizando los servivios de google maps.

Finalmente, los datos almacenados son recuperados por el Observatorio de Salud Mental de Yucatán, el cual, presenta gráficas que muestra estadísticas generales acerca del estado de salud mental de la población.

Las capas descritas anteriormente se muestran en la Fig. 3.

[1] https://siemai.mx/appsi/

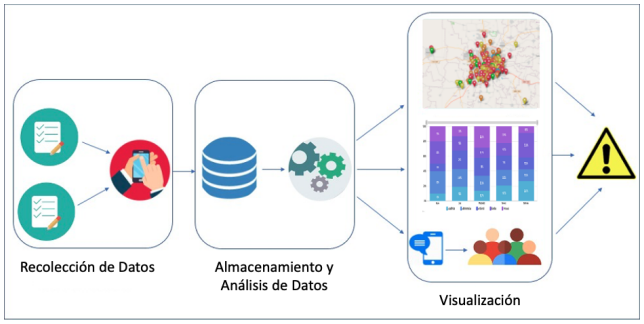


Figura 3. Fases de APPSI - Observatorio de Salud Mental de Yucatán

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan algunas gráficas que forman parte del Observatorio de Salud Mental de Yucatán [2] y que muestran las estadísticas generales del estado emocional de la población encuestada encontradas con APPSI.

La Fig. 4 muestra la cantidad de hombres y mujeres que han aceptado formar parte de este estudio de manera voluntaria y anónima. En este aspecto cabe señalar que, en términos de salud mental y, específicamente de autolesión, es el género masculino el que presenta mayor número de casos de suicidio en comparación con el género femenino, sin embargo, esta gráfica solo muestra la cantidad de individuos encuestados de cada uno de estos géneros.

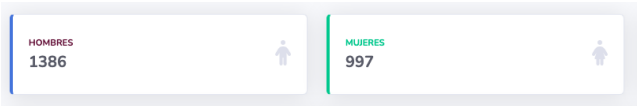


Figura 4. Cantidad de Hombres y Mujeres encuestados

La Fig. 5 muestra el porcentaje de la población en riesgo y sin riesgo de autolesión según los datos recabados por medio de la prueba C-SSRS Columbia, la cual, como se mencionó anteriormente, ha sido utilizada para medir ideación suicida. Más adelante se presenta la distribución de este porcentaje.

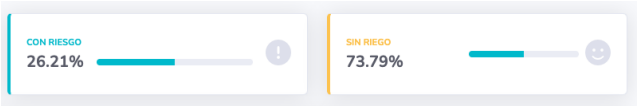


Figura 5. Porcentaje de individuos con riesgo y sin riesgo

Con respecto a la georreferencia, la Fig. 6 presenta el mapa que muestra las zonas en el estado de donde se han obtenido datos. Los puntos de colores corresponden a clusters de los lugares en donde se han recabado los datos. Cada punto en el mapa indica la cantidad de datos agrupados en esa zona. Este mapa fue construido usando la librería leaflet y es parte de la visualización que presenta el Observatorio de Salud Mental. El detalle de cada cluster se obtiene haciendo acercamientos al mapa. Como se puede observar, la zona con mayor cantidad de individuos encuestados es la Ciudad de Mérida, sin

[2] https://siemai.mx/appsi/observatorio/yucatan/

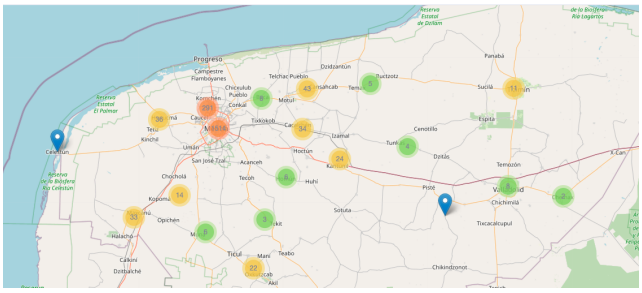


Figura 6. Zona de levantamiento de datos

embargo, se cuenta con información de otros municipios, lo cual ha permitido hacer estudios en los que se compara el estado emocional de individuos en zona urbana y zona rural.

La Fig. 7 muestra algo similar a la zona de levantamiento de datos, sin embargo presenta los datos a mayor detalle, permitiendo tener un acercamiento a los clusters para observar de manera individual las ubicaciones. Además, presenta los datos por categorías, en donde los pines azules representan individuos con riesgo nulo, los pines verdes representan individuos con riesgo bajo, los pines amarillos representan individuos con riesgo moderado y, por último, los pines rojos muestran individuos con riesgo alto. Nuevamente, esta categorización se ha hecho con base en los resultados de la prueba C-SSRS Columbia y las georreferencias obtenidas a partir de las direcciones. La documentación o manual de cada una de las pruebas establece el método de calificación con el cual se obtiene un puntaje de las respuestas. Este puntaje establece para cada caso (columbia y DASS21) el nivel de riesgo.

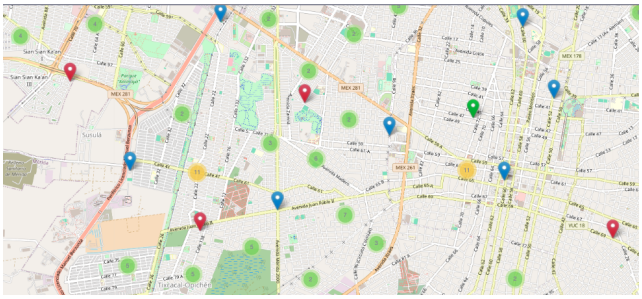


Figura 7. Mapa con casos individuales de riesgo.

Aquí es importante recalcar que la encuesta ha sido en todo momento voluntaria y anónima, por lo que a pesar de contar con la ubicación de los individuos, no se cuenta con más información que permita indentificarlos, por ejemplo, nombre, teléfono o correo electrónico, por lo que los datos no son trazables.

Además, antes de comenzar a responder las pruebas, a los voluntarios se les presenta un texto de consentimiento informado, en el cual se les comunica las intensiones del estudio y se hace énfasis en la privacidad y la utilidad de los datos.

La Fig. 8 muestra cómo se comporta la depresión en la población encuestada. Se puede observar que, a pesar de que la mayoría de la población se encuentra en el nivel nulo, el resto de la población, aproximadamente el 40 %

se encuentra en el nivel leve y que cerca del 10 % de la población se encuentra en el nivel extremadamente severo. Esta información abona al proceso de toma de decisiones ya que permite tener un panorama amplio de la situación y pensar en diseñar estrategias para disminuir estos niveles, sobre todo si se tiene en cuenta que esta variable, la depresión, es la que está más asociada a casos de autolesión y suicidio.

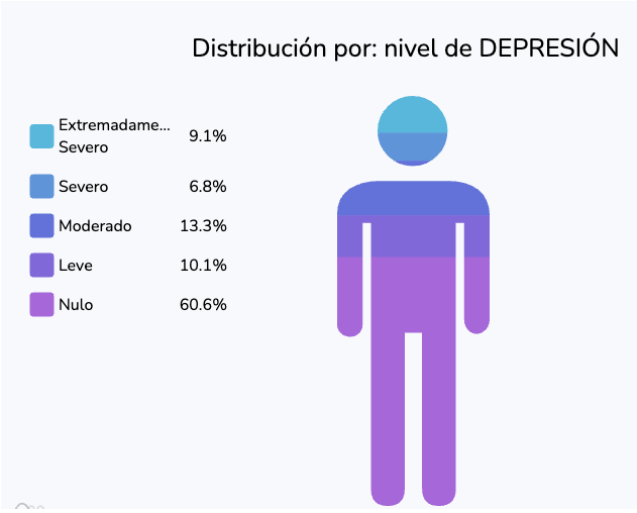


Figura 8. Porcentajes de niveles de depresión en la población encuestada

La Fig. 9 muestra el comportamiento de la variable ansiedad en la población encuestada. En comparación con la depresión, se puede observar que un mayor porcentaje se encuentra en el nivel nulo, es decir, sin presencia de este padecimiento. Sin embargo, al igual que la depresión, se encontró más del 10 % de la población en el nivel extremadamente severo, lo cual, nuevamente se puede considerar un nicho de oportunidad para comenzar a diseñar estrategias de mitigación.

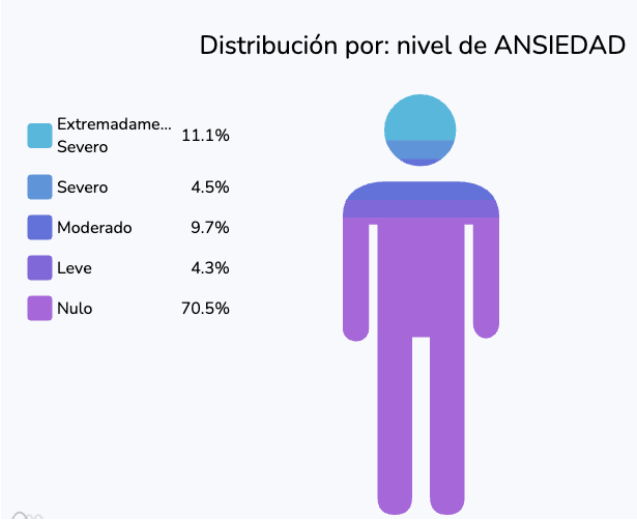


Figura 9. Porcentajes de niveles de ansiedad en la población encuestada

La Fig. 10 muestra las estadísticas con respecto al estrés en la población. Al igual que la depresión y la ansiedad, esta variable fue medida utilizando la prueba dass21. Se puede observar que, en comparación con la depresión y la ansiedad, ésta es la que muestra mayor porcentaje de la población en el nivel más bajo (75 %) y, de igual forma, es la que muestra menor porcentaje de población en el nivel más alto (3.5 %). Esto indica que, de las tres variables, es el estrés el que menos afecta a la población y la depresión lo que más les afecta.

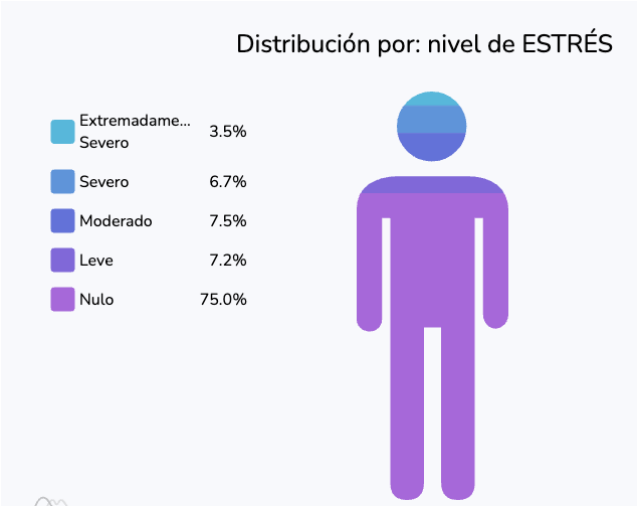


Figura 10. Porcentajes de niveles de estrés en la población encuestada

La Fig. 11 al igual que las anteriores muestra los porcentajes de la población en cada uno de los niveles de ideación suicida según lo obtenido con la escala C-SSRS Columbia. Se puede observar que, afortunadamente la gran parte de la población se encuentra en el nivel más bajo o nivel nulo. Sin embargo, si omitiéramos este nivel, se podría ver que, aproximadamente el 26 % de la población se encuetra en, al menos, el nivel más bajo. Es decir, un poco más de la cuarta parte de la población está en riesgo de autolesión y/o suicidio. Una vez más, el valor de esta información es que proporciona la oportunidad de actuar de manera oportuna con estrategias de mitigación a nivel poblacional.

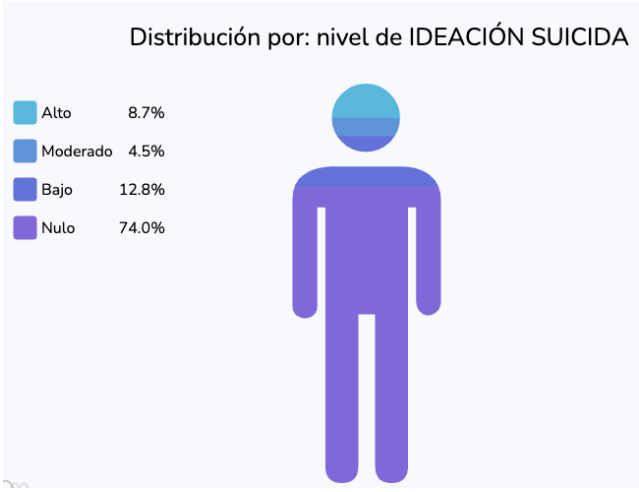


Figura 11. Porcentajes de niveles de ideación suicida en la población encuestada

5. CONCLUSIÓN

Este proyecto se apoya en una sólida base de evidencia científica que respalda el uso de herramientas digitales para la evaluación y seguimiento de la salud mental, la aplicación de metodologías geoespaciales en salud pública y la necesidad de enfoques interculturales en regiones de alta vulnerabilidad. Los datos obtenidos a través de él han permitido generar una fotografía bastante general pero a la vez detallada del estado emocional o de salud mental de la población adulta en general en diversos puntos del territorio, lo que a su vez, ha facilitado hacer comparaciones entre diferentes sectores de la sociedad, por ejemplo, quienes viven en zonas urbanas y rurales. Además, al recabar información adicional como hábitos alimenticios, consumo de alcohol y estupefacientes, actividad física, hábitos de sueño, etc., también ha dado paso a la identificación de factores, algunos relacionados a la infraestructura urbana, que pudieran representar riesgo para la salud mental individual y poblacional.

Aún persisten múltiples desafíos por abordar, y lo alcanzado hasta el momento representa apenas el inicio de un proceso más amplio. No obstante, la información disponible hasta la fecha constituye un insumo valioso para el desarrollo inicial de estrategias orientadas a mitigar las condiciones de vulnerabilidad en materia de salud mental. En este contexto, el propósito fundamental de estos sistemas es fortalecer el proceso de toma de decisiones mediante el suministro de datos confiables, actualizados y pertinentes.

AGRADECIMIENTOS

El equipo de trabajo agradece infinitamente a los más de dos mil individuos que voluntariamente han aceptado participar en este estudio, así mismo, a todas las empresas e instituciones que se han sumado a los esfuerzos de cuidar la salud mental de quienes colaboran con ellos.

De igual forma, hacemos un especial agradecimiento a Asociación Sofía quien ha impulsado grandemente este proyecto con gran compromiso social.

REFERENCIAS

Bhattacharya, D. (2023). Geographic information systems applications in india's public health are we moving towards the right direction. *Int. J. Community Med. Public Health*, 10, 893–900.

Cinnamon, J., Rinner, C., Cusimano, M.D., Marshall, S., Bekele, T., Hernandez, T., Glazier, R.H., and Chipman, M.L. (2009). Online map design for public-health decision makers. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 44(4), 289–300.

Duarte, L., Teodoro, A.C., Lobo, M., Viana, J., Pinheiro, V., and Freitas, A. (2021). An open source gis application for spatial assessment of health care quality indicators. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4), 264.

Hernández-Chan, G.S., Carlos-Martínez, H., Peralta-Blanco, R.M., Sánchez-Siordia, O.G., Pool-Cen, J.M., and Ramírez-Camacho, M.A. (2021). Semantic analysis of news of self-inflicted deaths in yucatán. In *2021 Mexican International Conference on Computer Science (ENC)*, 1–5. IEEE.

Mohr, D.C., Burns, M.N., Schueller, S.M., Clarke, G., and Klinkman, M. (2013). Behavioral intervention technologies: evidence review and recommendations for future research in mental health. *General hospital psychiatry*, 35(4), 332–338.

Sosa Correa, M., Rodríguez Mora, Á., Guerrero Rodríguez, C., Vanega Romero, S., et al. (2023). Escala autoinformada yucatán de inteligencia emocional para adultos (eayie-ad). *Revista Iberoamericana de Diagnostico y Evaluacion Psicologica*.

Yasobant, S., Vora, K.S., and Upadhyay, A. (2019). Geographic information system applications in public health: Advancing health research. In *Healthcare Policy and Reform: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, 538–561. IGI Global.

User interface for artificial pancreas using a hardware-in-the-loop system for signal monitoring

Alvares Gonzalez, Martha Betsabe *, **Jaimes Pérez, Josué Iván** *, **Ramirez Rasgado, Felipe** **, **Astorga Zaragoza, Carlos Manuel** ** **Arroyo Trejo, Erandi Alejandra** **

* *TecNM, Instituto Tecnológico de Cuautla, e-mail: 20680041, comunicacion@cuautla.tecnm.mx.*
** *TecNM, CENIDET, e-mail: d19ce042,carlos.az,m23ce008@cenidet.tecnm.mx*

Abstract:
This study focuses on developing an intuitive and reliable user interface for an artificial pancreas system, aiming to enhance patient-system interaction and ensure safe and efficient diabetes management. The proposed interface enables real-time visualization of glucose levels and insulin administration while incorporating alert mechanisms and historical data tracking to support better decision-making. The performance of the interface is evaluated considering different scenarios, obtaining the expected performances.

Keywords: Health monitoring, artificial pancreas, diabetes mellitus type 1, hardware-in-the-loop.

1. INTRODUCCIÓN

La diabetes tipo 1 es una enfermedad autoinmune crónica que se caracteriza por la destrucción de las células beta del páncreas, responsables de la producción de insulina. Como resultado, las personas con esta condición dependen de la administración exógena de insulina para regular sus niveles de glucosa en sangre y prevenir complicaciones graves. Un control inadecuado de la glucosa puede derivar en episodios de hipoglucemia, que pueden causar confusión, pérdida del conocimiento o incluso coma, así como en hiperglucemia sostenida, que puede desencadenar cetoacidosis diabética y daño a largo plazo en órganos vitales como el corazón, los riñones y los ojos.

Tradicionalmente, el manejo de la diabetes tipo 1 ha requerido un monitoreo constante mediante punciones capilares y la administración manual de insulina en función de las mediciones obtenidas. Sin embargo, este proceso puede ser tedioso, invasivo y susceptible a errores humanos, lo que incrementa el riesgo de descompensaciones y reduce la calidad de vida de los pacientes. En este contexto, los avances en tecnología médica han permitido el desarrollo de sistemas de páncreas artificiales, dispositivos diseñados para automatizar la administración de insulina en función de los niveles de glucosa en tiempo real. Estos sistemas combinan sensores continuos de glucosa, algoritmos de control y bombas de insulina para ofrecer un control más preciso y estable, reduciendo la carga del paciente y mejorando su bienestar.

Estudios recientes han mostrado que los sistemas de páncreas artificial contribuyen significativamente a la disminución de la variabilidad glucémica y la incidencia de hipoglucemia nocturna Bergenstal et al. (2010). Sin embargo, a pesar de los beneficios clínicos, la adopción generalizada de esta tecnología también depende de factores relacionados con su diseño y usabilidad. La implementación efectiva de un páncreas artificial no solo requiere sensores precisos y algoritmos robustos, sino también interfaces de usuario accesibles y fáciles de usar. Según Shneiderman y Plaisant Shneiderman et al. (2017), una interfaz deficiente puede dificultar la interacción del paciente con el sistema, comprometiendo su seguridad y eficacia. Es fundamental que el diseño de la interfaz sea intuitivo, claro y funcional, permitiendo a los usuarios visualizar de manera sencilla sus niveles de glucosa, la administración de insulina y cualquier alerta crítica que requiera su atención.

Shneiderman et al. (2017) analiza el papel crucial de las alertas dentro de los sistemas de monitoreo de diabetes. Estas alertas son fundamentales para gestionar los niveles de glucosa en sangre, ya que pueden ayudar a prevenir episodios de hipoglucemia (bajos niveles de glucosa) o hiperglucemia (altos niveles de glucosa), los cuales pueden ser peligrosos para los pacientes con diabetes.

Por otro lado, el desarrollo de sistemas mecatrónicos modernos requiere una integración estrecha entre el modelado físico, la simulación y el diseño de control. En este contexto, los sistemas de hardware en el lazo (que denominaremos como originalmente se conocen en su terminología en inglés Hardware-in-the-Loop, HIL) se utilizan como una herramienta clave para validar y probar controladores en condiciones cercanas a las reales. Esta técnica permite

que el hardware del controlador interactúe con un modelo simulado de la planta, ofreciendo un entorno seguro y flexible para experimentar con diversas condiciones operativas antes de aplicar el sistema en su entorno final. El enfoque HIL no solo mejora la eficiencia del diseño, sino que también reduce riesgos, tiempos de desarrollo y costos asociados a la implementación directa de sistemas de control complejos.

La figura 1 muestra la arquitectura general del simulador de diabetes tipo 1, donde se identifican los principales componentes que intervienen en la simulación de la glucosa en sangre. Se observa un módulo de entrada que representa las variables exógenas, como la ingesta de alimentos y la administración de insulina exógena. Estas entradas son procesadas por el modelo matemático del metabolismo de la glucosa-insulina, el cual simula la dinámica fisiológica del organismo de un paciente con diabetes tipo 1. Cada componente está interconectado para representar el flujo de información entre las entradas, el modelo fisiológico, la interfaz de usuario y el sistema de control.

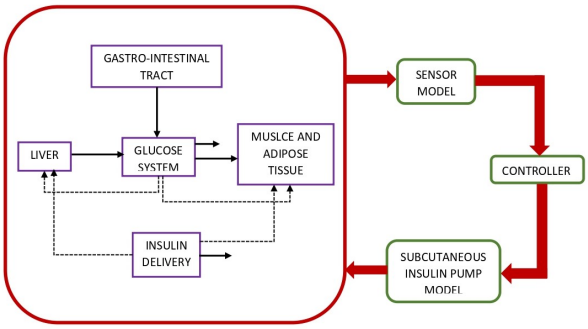


Fig. 1. Componentes del simulador de diabetes tipo 1

En este trabajo, se aborda el desarrollo de una interfaz de usuario optimizada para un sistema de páncreas artificial, con el objetivo de mejorar la interacción entre el paciente y la tecnología. Se propone una plataforma que, además de mostrar los valores de glucosa y la administración de insulina en tiempo real, ofrezca la posibilidad de emitir alertas cuando los valores estén fuera de los rangos normales y permita la consulta del historial de datos para un mejor análisis del tratamiento. Esta propuesta busca no solo facilitar el uso del sistema, sino también contribuir a un manejo más eficiente y seguro de la diabetes tipo 1.

Para fundamentar este estudio, se realiza una revisión de los antecedentes y avances en la tecnología de páncreas artificial, con un enfoque en el diseño de interfaces para dispositivos médicos. Además, se analizan los avances actuales del proyecto, evaluando su impacto en la salud digital y su viabilidad como herramienta para mejorar la calidad de vida de las personas con diabetes tipo 1.

La organización de este trabajo es la siguiente, en la sección 2 se presenta la metodología para el desarrollo de la interfaz, en la sección 3 se presenta el modelo matemático utilizado para la adquisición de datos. La evaluación de la interfaz se presenta en la sección 4 y finalmente, las conclusiones del trabajo en la sección 5.

2. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de documentos científicos, incluyendo artículos, estudios clínicos y reportes técnicos, con el objetivo de comprender a profundidad el contexto médico y tecnológico relacionado con los sistemas de páncreas artificial. A través de este análisis, se identificaron los principales desafíos en el monitoreo y control de la glucosa en pacientes con diabetes tipo 1, así como los avances recientes en el desarrollo de dispositivos médicos automatizados. Con base en esta información, se establecieron los requerimientos específicos del sistema, asegurando que la solución propuesta respondiera a las necesidades de los usuarios y cumpliera con los estándares de seguridad y usabilidad.

Además, se realizó un proceso de evaluación y selección de herramientas tecnológicas adecuadas para la implementación del sistema, considerando factores como compatibilidad, eficiencia y facilidad de integración con sensores de monitoreo continuo de glucosa y bombas de insulina. Finalmente, con un enfoque centrado en el usuario, se diseñó una interfaz intuitiva y accesible, priorizando la claridad en la visualización de datos, la facilidad de navegación y la implementación de alertas que permitan una respuesta rápida ante situaciones críticas.

2.1 Revisión de documentos

Los textos analizados proporcionaron información clave sobre:

- *Control de glucosa en diabetes tipo 1:* Métodos no lineales y observadores robustos para minimizar errores en monitoreo.
- *Retos en la regulación de glucosa:* Manejo de retrasos en las señales y control en tiempo real.
- *Hardware-in-the-loop (HIL):* Pruebas con MATLAB Simulink para validar algoritmos antes de su implementación.
- *Modelos matemáticos y software:* Descripción precisa de la dinámica glucosa-insulina.
- *Sistemas DIY de páncreas artificial:* Enfoque en accesibilidad y personalización.

Interpretación de datos

Se identificaron elementos clave para el desarrollo de la interfaz:

- *Modelos matemáticos precisos para procesar señales en tiempo real* Guiatic (2023).
- *Uso de HIL para simular y ajustar algoritmos de control.*
- *Desafíos en tiempo real:* Filtrado de datos y generación de alertas.
- *Diseño centrado en el usuario:* Gráficas intuitivas y alertas visibles.
- *Requerimientos funcionales:* Visualización en tiempo real, alertas automáticas y registros históricos.

La interpretación de los datos fue fundamental para convertir la teoría en soluciones prácticas, ya que permitió analizar los patrones y comportamientos del sistema con mayor claridad. A través de este proceso, se identificaron áreas clave que necesitaban optimización, lo que facilitó el diseño de un sistema más eficiente y adaptado a las necesidades reales de los usuarios. Además, al basarse en los datos, se pudieron tomar decisiones informadas para asegurar que las soluciones implementadas fueran no solo efectivas, sino también seguras. La interpretación continua de los datos permitió ajustar y mejorar el sistema de manera constante, garantizando su fiabilidad y desempeño a lo largo del tiempo.

2.2 Escenarios de uso

Los escenarios de uso describen situaciones específicas en las que los usuarios interactúan con el sistema de páncreas artificial y la interfaz. Estos escenarios ayudan a comprender mejor cómo se utilizará la aplicación en la vida real y permiten diseñar una interfaz que se adapte a las necesidades de los pacientes.

Estos escenarios son presentados a continuación:

(1) *Emergencia por valores fuera de rango*

- El sistema detecta glucosa alta (> 250 mg/dL) y emite una alerta.
- Se muestra una advertencia sobre la necesidad de insulina.
- El paciente revisa el historial reciente y los datos se almacenan automáticamente.

(2) *Revisión de datos por un médico*

- El médico accede al historial del paciente, filtra datos de los últimos 30 días y detecta patrones anormales.
- Genera un reporte en pdf para consulta médica.

2.3 Tecnologías utilizadas

Para el desarrollo del sistema de monitoreo y control del páncreas artificial, se emplearon diversas tecnologías que permiten la integración entre hardware, simulación y la interfaz de usuario.

- *Node.js:* Utilizado para gestionar la lógica del servidor, procesar datos en tiempo real y manejar la comunicación con la base de datos.
- *MATLAB y Simulink:* De acuerdo a la definición de MathWorks (2023), tenemos que estas herramientas son empleadas para la simulación del sistema glucosa-insulina, permitiendo modelar y probar algoritmos de control antes de su implementación.
- *Hardware-in-the-Loop (HIL):* Facilita la validación del sistema en un entorno controlado, combinando simulaciones con hardware real.
- *HTML y JavaScript:* Tecnologías fundamentales para la construcción de la interfaz web, asegurando una visualización interactiva de los datos en tiempo real.
- *SQLite:* Base de datos ligera utilizada para almacenar registros de monitoreo, asegurando acceso eficiente y persistente a los datos históricos Almeida et al. (2017).

Estas tecnologías trabajan en conjunto para garantizar un sistema eficiente, seguro y adaptable a las necesidades del usuario.

3. MODELO MATEMÁTICO

Uno de los modelos con mayor popularidad es el modelo mínimo de Bergman que fue propuesto desde el año 1979. Una variante de este modelo para pacientes con DMT1 se muestra en Ishii et al. (2017), Chandrasekhar and Padhi (2023), el cual se ha utilizado para regular el sistema glucosa-insulina por medio de un páncreas artificial (Khan et al., 2020). Para favorecer el enfoque de control se realiza un cambio de variable en este modelo resultando las Ecs. (2)-(4) Isermann (2014):

$$\dot{x}_1(t) = -(p_1 + x_2(t))x_1(t) + p_1 G_b + D(t) \quad (1)$$
$$\dot{x}_2(t) = -p_2 x_2(t) + p_3(x_3(t) - I_b) \quad (2)$$
$$\dot{x}_3(t) = -N x_3(t) + (u(t))/V_I \quad (3)$$

donde $x_1(t)$,$x_2(t)$ y $x_3(t)$ son la concentración de glucosa en la sangre [mg/dL], el efecto de la insulina en la glucosa (insulina activa) [1/min] y la concentración de la insulina en la sangre [mU/dL], respectivamente. G_b es el valor basal de la concentración de glucosa [mg/dL], I_b es un valor objetivo para la infusión de insulina [mU/dL] y N es la tasa de desaparición de insulina en la sangre $[1/min]$. $u(t)$ es la tasa de infusión exógena de la insulina [mU/min]y además, $D(t)$ es la tasa de infusión exógena de la glucosa, dicho de otra manera, es una perturbación en la dinámica del sistema relacionada con la ingesta de carbohidratos [mg/dL min] . Esta perturbación puede ser expresada matemáticamente como:

$$D(t) = B_d e^{-k_d t}. \quad (4)$$

donde B_d es la cantidad de carbohidratos ingeridos $[g]$, k_d es la tasa de descomposición de los carbohidratos [1/min] y t es el tiempo [min].

4. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la implementación de la interfaz de usuario para el páncreas artificial mediante un sistema hardware en el lazo se presentan a continuación. En esta evaluación, se ha analizado tanto la funcionalidad de la interfaz como su capacidad para monitorear y registrar señales en tiempo real de manera precisa y eficiente. Se ha verificado que la interfaz permite una interacción fluida con el sistema, proporcionando al usuario información clara y actualizada sobre los niveles de glucosa y la administración de insulina. Además, se han realizado pruebas para medir la respuesta del sistema ante cambios en los parámetros monitoreados, asegurando que las alertas y registros se generen adecuadamente. Estos resultados permiten validar la efectividad de la interfaz en la gestión del páncreas artificial, destacando su importancia en la mejora del control de la diabetes tipo 1.

1. Presentación de resultados

1.1 Registro e inicio de sesión

Se verificó el correcto funcionamiento del sistema de autenticación de usuarios. Se realizaron pruebas con distintos perfiles, asegurando la integridad de los datos en la base de datos SQLite3. En las Figs. 2 y 3 se visualizan las ventanas de registro e inicio de sesión o "login".



Fig. 2. Ventana de registro



Fig. 3. Login

1.2 Adquisición y visualización de señales

Se estableció la conexión entre MATLAB Online y la interfaz desarrollada. La transmisión de datos en tiempo real permitió visualizar las señales generadas por el sistema simulado en Simulink. La Fig. 4 muestra una representación de la gráfica obtenida en la interfaz.

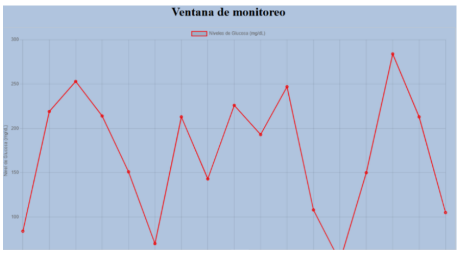


Fig. 4. Visualización de señales

1.3 Generación de alertas

El sistema de alertas se activó cuando los valores de la señal superaron los umbrales definidos. En el 95% de las pruebas, las alertas se generaron correctamente y fueron registradas en la base de datos. Sin embargo, en el 5% restante, se identificaron retrasos en la notificación, lo que sugiere la necesidad de optimizar la gestión de eventos en la interfaz. Un ejemplo de estas notificaciones se muestra en la Fig. 5.

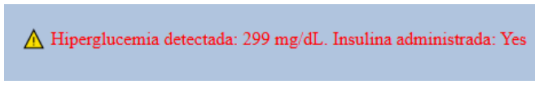


Fig. 5. Alertas

1.4 Diagrama de la interfaz

La figura 6 ilustra la navegabilidad dentro de la interfaz de usuario desarrollada. Se presenta un esquema jerárquico de las pantallas principales y las transiciones permitidas entre ellas. Desde la pantalla de inicio, el usuario puede acceder a las opciones de registro o inicio de sesión, lo que garantiza el control de acceso al sistema. Tras autenticarse, el usuario es dirigido a la página principal, donde se visualiza la ventana de monitoreo, el historial de resultados, y las alertas. Este diagrama permite visualizar las rutas posibles dentro de la interfaz, asegurando que todas las funciones clave sean accesibles de manera intuitiva y eficiente.

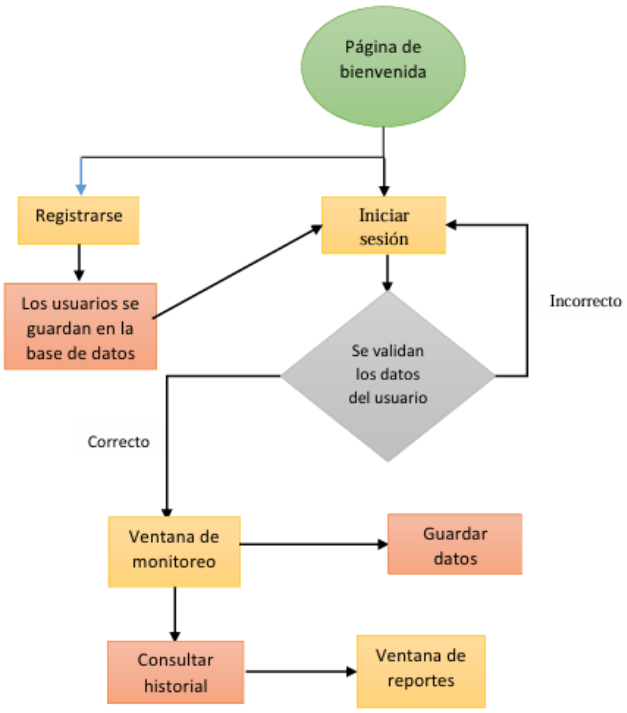


Fig. 6. Diagrama de navegación dentro de la interfaz

5. CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema de monitoreo para un páncreas artificial mediante hardware en el lazo logró cumplir de manera satisfactoria los objetivos planteados, al ofrecer una herramienta funcional para el control y monitoreo continuo de la glucosa en pacientes con diabetes tipo 1.

Los resultados demostraron la efectividad del monitoreo en tiempo real, permitiendo capturar y visualizar de forma continua las variaciones en los niveles de glucosa, alcanzando así el objetivo de seguimiento dinámico. La implementación de alertas preventivas frente a valores fuera del rango normal validó su utilidad y precisión mediante datos simulados, contribuyendo a la prevención de complicaciones agudas, tal como se estableció en los objetivos específicos.

La integración con SQLite garantizó una gestión segura y organizada de los datos, facilitando consultas y reportes para el análisis de tendencias. La comunicación entre MATLAB y la interfaz de usuario posibilitó la simulación de escenarios clínicos con alta fidelidad, facilitando la

validación de estrategias de control antes de su aplicación en pacientes reales.

Como limitación, se identificó la dependencia de MATLAB para la generación de señales, por lo que se sugiere incorporar módulos autónomos en futuras versiones, así como evaluar el sistema con sensores físicos en tiempo real para su validación práctica.

En conclusión, este proyecto representa un avance significativo en el monitoreo de parámetros médicos, con potencial de aplicación en la educación, investigación y desarrollo de páncreas artificiales más autónomos y seguros. Su impacto en la ingeniería biomédica resalta la importancia de seguir explorando mejoras y nuevas aplicaciones en el control de enfermedades crónicas.

REFERENCIAS

Almeida, J., Barreto, A., and Ferreira, A. (2017). A lightweight database model for embedded systems. *Embedded Systems Journal*, 34(1), 22–30. doi: 10.1109/ESJ.2017.7892345.

Bergenstal, R.M., Klonoff, S.A., Garg, B.W., Bode, L., Meredith, R.F., Slover, B.S., Ahmann, D.R., Welsh, J.T., Lee, W.H., Howard, B.W., and Kolaczynski, W.V. (2010). Effectiveness of sensor-augmented insulin-pump therapy in type 1 diabetes. *New England Journal of Medicine*, 363(4), 311–320. doi: 10.1056/NEJMoa1002853.

Cobelli, C., Renard, E., and Kovatchev, B. (2011). Artificial pancreas: past, present, future. *Diabetes*, 60(11), 2672–2682. doi:10.2337/db11-0654.

Guiatic (2023). Matlab-simulink: Matlab, el lenguaje del cálculo técnico. `https://guiatic.com`. Accedido en abril de 2025.

Isermann, R. (2014). *Mechatronic systems: modelling and simulation with control*. Springer.

Ishii, M., Watanabe, T., and Tanaka, K. (2017). Advances in glucose sensing technologies for continuous monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 241, 205–221. doi:10.1016/j.snb.2016.11.062.

MathWorks (2023). What is hardware-in-the-loop simulation? matlab & simulink. `https://la.mathworks.com`. Accedido en abril de 2025.

Pastore, M., Pappalardo, F., and Riggi, F. (2019). Model-based predictive control for artificial pancreas systems. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 66(12), 3487–3496. doi:10.1109/TBME.2019.2900232.

Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M., Jacobs, S., Elmqvist, N., and Diakopoulos, N. (2017). *Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction*. Pearson, 6th edition.

Society, D.T. (2020). The role of alerts in diabetes care. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 14(3), 483–490. doi:10.1177/1932296819890629.

Deep Learning-Based Semantic Segmentation of Skin Lesions Using Pre-Trained Models.

García Ramírez, Fernando*, González Huitrón, Víctor Alejandro*, Guzmán Rivera, Miguel Ángel*, Montante Garza, Mario Alberto*, Gorrostieta Hurtado, Efrén**

**Tecnológico Nacional de México campus Querétaro, Av. Tecnológico S/N, Centro Histórico, Centro, 76000 Santiago de Querétaro, Qro.*
e-mail: fernando.gr@queretaro.tecnm.mx, victor.gh@queretaro.tecnm.mx, miguel.gr@queretaro.tecnm.mx, mario.mg@queretaro.tecnm.mx

*** Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, C.P. 76010, Querétaro, Qro.*

e-mail: efrengorrostieta@gmail.com

Abstract: The largest organ of the human body is the skin, which performs multiple physiological functions. Among these, one of the primary roles is to act as a protective barrier against external agents that may pose threats to the organism. Consequently, the early detection of skin lesions is of significant importance to maintain health and prevent the progression of severe conditions, such as skin cancer. In this context, automated image analysis systems offer promising support tools for the early identification and assessment of dermatological abnormalities. This research presents a methodology based on convolutional neural networks for the semantic segmentation of skin lesion images, utilizing data from The ISIC 2017 Challenge Dataset. The study proposes a comparative evaluation involving the U-Net architecture and a set of pre-trained classification models originally trained on the ImageNet dataset. The selected models—based on the EfficientNet, MobileOne, ResNet, and Xception architectures—were chosen due to their diversity in terms of parameter complexity and their potential for practical application and deployment in resource-constrained environments. The evaluation of these models was carried out using the Intersection over Union (IoU) metric, which is commonly employed in image segmentation tasks to quantify the overlap between predicted and ground truth regions. The analysis emphasizes the relative strengths and limitations of each architecture in terms of segmentation accuracy and computational efficiency. The results of this study aim to guide the selection of optimal models by balancing predictive performance, resource requirements, and feasibility of implementation in real-world clinical or diagnostic systems.

Keywords: Deep Learning, Computer Vision, Skin Cancer, Semantic Segmentation.

1. INTRODUCCIÓN

El cáncer de piel, y especialmente el melanoma, está experimentando un aumento en su incidencia en México, debido a factores como la exposición excesiva a la radiación ultravioleta y cambios en el comportamiento social. Detectar estos cánceres de manera temprana es crucial para mejorar las tasas de supervivencia, pero el diagnóstico se ve limitado por la variabilidad en la interpretación de las imágenes dermatoscópicas y la falta de especialistas en ciertas áreas del país.

Los algoritmos de detección médica son una de las primeras herramientas utilizadas para determinar si una lesión cutánea es maligna o benigna (Nachbar, 1994; Zalaudek, 2006; Henning, 2007). Nachbar (1994) desarrollaron un método subjetivo basado en la percepción visual de la lesión. La regla ABCD se basa en la asimetría, bordes, color, forma y diámetro que aparecen en las lesiones cutáneas. Debido a la simplicidad del algoritmo, es uno de los más practicados para evaluar una lesión mediante un examen a simple vista o utilizando un dermatoscopio.

El algoritmo médico ABCD se compone de las siguientes partes:

- **Asimetría A**: La lesión se divide en dos ejes perpendiculares a 90° entre sí, de forma que se obtenga la menor puntuación de asimetría posible. En otras palabras, se determina si la lesión es simétrica o no. Por cada eje en el que se detecta asimetría, se añade un punto.
- **Bordes B**: La lesión se divide en cortes por ocho ejes que determinan si una lesión presenta bordes abruptos. Si un segmento presenta un borde abrupto, se añade un punto.
- **Colores C**: La lesión puede presentar uno o varios de los siguientes colores: blanco, parduzco, marrón oscuro, negro, azul y rojo. Son generados por los vasos y las concentraciones de melanina, por lo que por cada color encontrado se suma un punto por color.
- **Estructuras Dermatoscópica D**: La lesión presenta el aspecto de las siguientes estructuras: puntos, manchas, redes pigmentadas y zonas no

estructuradas. Se añade un punto por cada estructura encontrada en la lesión.

Las características descritas se ponderan del siguiente modo:

$$TDS = (1.3 \cdot A) + (0.1 \cdot B) + (0.5 \cdot C) + (0.5 \cdot D) \quad (1)$$

donde TDS es la Puntuación Dermatoscópica Total si es inferior a 4.75 se concluye que la lesión es benigna si la puntuación está entre 4.75 y 5.45 la lesión se considera sospechosa si es superior a 5.45 se considera maligna. Los valores de ponderación de la regla ABCD han sido determinados empíricamente a través de estudios clínicos y análisis estadísticos (Nachbar, 1994).
Un ejemplo de imágenes RGB aplicando los criterios ABCD se muestra en la Fig. 1.

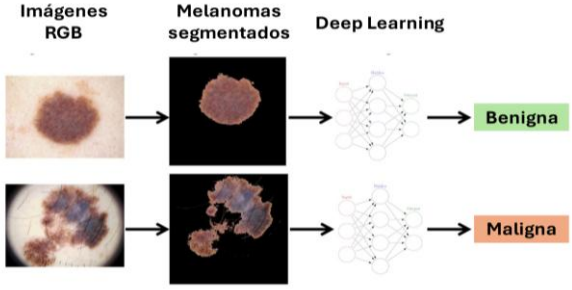
Fig. 1. Imágenes cutáneas con características para la regla ABCD



Los algoritmos del aprendizaje profundo más comunes son: redes neuronales profundas (DNN) (Sauter, 2023), redes neuronales convolucionales (CNN), redes neuronales recurrentes (RNN) (Popescu, 2022), redes neuronales de transformadores (ViT) (Xiao, 2023), Redes Neuronales de Autoencoders (Bhatt, 2023), Redes Neuronales Generativas Antagónicas (GANs), Redes Neuronales de Grafos (GNN) (Dildar, 2021).

Es importante señalar que el aprendizaje profundo es un subcampo del aprendizaje automático usado en la inteligencia artificial el cual es fundamental para el desarrollo de un sistema de inteligencia artificial. Un ejemplo común de manera generalizada se presenta en la Fig. 2. como diagrama de flujo.

Fig. 2. Diagrama de flujo para un clasificador de melanomas.

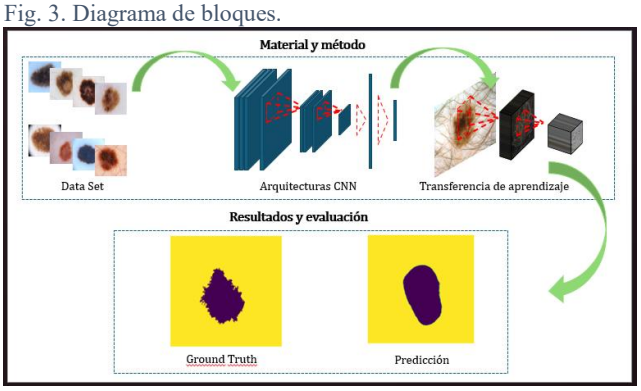


En la actualidad la inteligencia artificial enfrenta desafíos en las imágenes médicas, ya que depende del intercambio de datos, el desarrollo de algoritmos y la regulación ética. El éxito requiere grandes volúmenes de datos con un etiquetado preciso, realizado por expertos, ya que un etiquetado deficiente afecta el aprendizaje del sistema. Debido a la expansión del uso de la IA en el diagnóstico médico por imagen y a los numerosos retos a los que se enfrenta, este trabajo pretende evaluar y resumir algunas funciones de activación para la segmentación de imágenes dermatoscópicas.

2. METODOLOGÍA

Se plantea un estudio comparativo con la arquitectura U-Net y las CNN; EfficientNet (Tan, 2019), MobileOne (Vasu, 2023), ResNet (He, 2016) y Xception (Chollet, 2017) para evaluar su rendimiento en segmentación de imágenes. El análisis considerará la métrica IoU, destacando sus ventajas y desventajas. Como se muestra en la figura 3, los resultados permitirán determinar la mejor arquitectura según el equilibrio entre exactitud y costo computacional.

Fig. 3. Diagrama de bloques.



2.1 Segmentación semántica y aprendizaje profundo.

La segmentación semántica es una tarea de visión por computadora que asigna una etiqueta a cada píxel de una imagen, permitiendo la identificación de objetos y regiones (Hao, 2020). El aprendizaje profundo ha revolucionado este campo mediante CNN, mejorando la precisión y automatización del proceso. Modelos como U-Net (Huang, 2020), DeepLab (Chen, 2018) y SegNet (Badrinarayanan, 2017) utilizan arquitecturas profundas para extraer características y segmentar con alta precisión. Gracias a estas técnicas, la segmentación semántica se aplica en medicina y otros campos de la ciencia e ingeniería.
La arquitectura U-Net es fundamental, ya que segmenta imágenes con alta precisión. Su estructura en forma de "U", con un codificador – decodificador, que incluye conexiones de salto en los enlaces directos entre capas, estas conexiones permiten combinar características de baja y alta resolución, haciendo que el modelo sea más preciso en tareas de segmentación semántica. Gracias a su eficiencia y capacidad de aprendizaje en conjuntos de datos pequeños, U-Net se ha convertido en un estándar en aplicaciones médicas, satelitales y de visión por computadora.

La función Dice Loss (Zhao, 2020) es crucial en la arquitectura U-Net, ya que optimiza la segmentación semántica al manejar mejor el desequilibrio de clases en las imágenes. En general, mide la superposición entre la segmentación predicha y la real, lo que la hace ideal para conjuntos de datos con regiones

pequeñas o desbalanceadas. A diferencia de la entropía cruzada, que se utiliza comúnmente para tareas de clasificación, Dice Loss mejora la precisión en los bordes y reduce los falsos negativos.

El coeficiente de Dice (DSC - Dice Similarity Coefficient) se define de la siguiente manera:

$$DSC = \frac{2|y_{pred} \cap y_{true}|}{|y_{pred}| + |y_{true}|}, \quad (2)$$

donde,

- y_{pred} son los valores predichos por el modelo.
- y_{true} son los valores reales.
- La multiplicación $y_{pred} \cdot y_{true}$ representa la intersección entre la predicción y la verdad.

El coeficiente de Dice toma valores entre 0 y 1, para los cuales:

- **0** significa que no hay superposición entre la predicción y la verdad.
- **1** significa que hay una coincidencia perfecta.

La función de pérdida se define como:

$$Dice\ Loss = 1 - DSC, \quad (3)$$

o de manera equivalente:

$$Dice\ Loss = 1 - \frac{2|y_{pred} \cap y_{true}| + \epsilon}{|y_{pred}| + |y_{true}| + \epsilon}, \quad (4)$$

donde ϵ es un pequeño valor para evitar divisiones por cero.

2.2 Arquitecturas CNN.

El núcleo de una CNN es la capa de convolución, donde se aplican filtros o "kernels" a la imagen de entrada. Estos filtros recorren la imagen, detectando características locales como bordes, texturas o formas simples. A medida que la información avanza por las capas de la red, las características simples se combinan para formar representaciones más complejas y abstractas, permitiendo que la red reconozca objetos completos o escenas específicas.

Además de las capas de convolución, las CNN incorporan capas de pooling (submuestreo) que reducen la dimensionalidad de las representaciones intermedias, conservando las características más relevantes y disminuyendo el costo computacional. Las funciones de activación no lineales, como la ReLU (Rectified Linear Unit), se utilizan para introducir no linealidades en el modelo, permitiendo que la red capture relaciones complejas en los datos (Zhao, 2024).

Xception es un tipo de red neuronal convolucional que optimiza la arquitectura de las redes Inception al reemplazar sus módulos convencionales por convoluciones separables en profundidad. Esta técnica divide la operación de convolución tradicional en dos pasos: primero, una convolución en profundidad que aplica filtros de manera independiente a cada canal de entrada, y luego, una convolución 1x1 que combina la información obtenida. Este enfoque reduce de manera significativa la cantidad de parámetros y el costo computacional, sin comprometer el rendimiento en tareas de clasificación de imágenes e incluso mejorándolo en algunos casos. Además, Xception incorpora conexiones residuales, lo que facilita el entrenamiento de redes más profundas y permite una propagación más eficiente del gradiente.

EfficientNet es una familia de arquitecturas de redes neuronales convolucionales diseñada para lograr un equilibrio óptimo entre precisión y eficiencia computacional. Su innovación principal radica en un método llamado "compounding scaling", que ajusta de manera equilibrada la profundidad, el ancho de las capas y la resolución de entrada de la red para mejorar el rendimiento sin aumentar excesivamente el número de parámetros. En lugar de escalar arbitrariamente uno de estos factores, EfficientNet optimiza su crecimiento de manera conjunta, lo que permite entrenar modelos más precisos y eficientes en términos de memoria y cómputo.

ResNet es una arquitectura de redes neuronales convolucionales que aborda el problema del desvanecimiento del gradiente al entrenar modelos profundos. Su innovación clave son las conexiones residuales o skip connections, que permiten que la información fluya directamente entre capas sin necesidad de pasar por todas las transformaciones intermedias. Esto facilita el entrenamiento de redes más profundas sin que el gradiente se desvanezca o se degrade con el tiempo.

MobileOne es una arquitectura optimizada para su uso en dispositivos móviles y entornos con recursos computacionales limitados. Su diseño se basa en una estrategia de reparametrización estructural, lo que significa que durante el entrenamiento utiliza una estructura más compleja con múltiples caminos de convolución, pero en la fase de inferencia se transforma en una arquitectura completamente secuencial y eficiente. Esto permite alcanzar un equilibrio entre precisión y velocidad, manteniendo un bajo consumo de memoria y mejorando el rendimiento en comparación con modelos anteriores.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

El conjunto de datos seleccionado para la presente investigación es “International Skin Imaging Collaboration. SIIM-ISIC 2017 Challenge Dataset” (Codella, 2017) El conjunto de datos contiene 2,600 imágenes dermatoscópicas de lesiones cutáneas benignas y malignas, que se dividen en 2,000 de entrenamiento y 600 de prueba. La resolución varia desde 540x576 hasta 4499x6748 y aplicando un reescalamiento a 512x512. Se mantuvo la normalización especificada por cada modelo. Las imágenes de entrada están en formato jpg y su correspondiente salida en png. Cada imagen se asocia a uno de estos individuos mediante un identificador único de paciente. Todos los diagnósticos malignos se han confirmado mediante histopatología y los

diagnósticos benignos se han confirmado mediante el acuerdo de expertos, el seguimiento longitudinal o la histopatología. Una publicación exhaustiva que describe todas las características de este conjunto de datos está disponible en forma de preimpresión que aún no ha sido sometida a revisión por pares. El conjunto de datos fue generado por la Colaboración Internacional de Imágenes de la Piel (ISIC) y las imágenes provienen de las siguientes fuentes: Hospital Clínic de Barcelona, Universidad Médica de Viena, Memorial Sloan Kettering Cancer Center, Instituto de Melanoma de Australia, Universidad de Queensland y la Facultad de Medicina de la Universidad de Atenas.

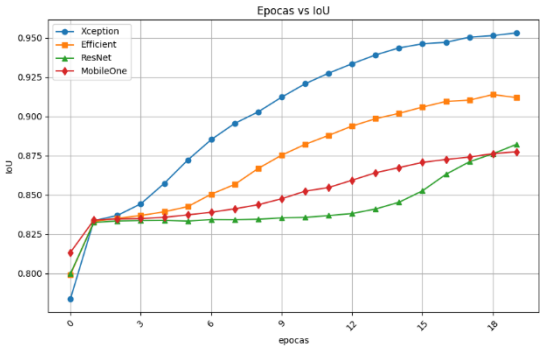
La métrica IoU (Intersection over Union) (Cheng. 2021) es utilizada para evaluar la precisión de modelos de segmentación y detección de objetos en visión por computadora. Se calcula como el área de superposición entre la región predicha por el modelo y la región real en los datos, dividida por el área total combinada de ambas regiones. Matemáticamente, se expresa como:

$$IoU = \frac{|y_{pred} \cap y_{true}|}{|y_{pred}| \cup |y_{true}|}, \quad (5)$$

donde la intersección es la zona en común entre la predicción y la región real, y la unión es la suma de ambas áreas, restando la intersección para evitar contarla dos veces.

Su valor varía entre 0 y 1, donde 1 indica una coincidencia perfecta. Un IoU alto significa mejor rendimiento del modelo, generalmente, un umbral de $IoU \geq 0.5$ se considera aceptable. IoU es una métrica fundamental para evaluar la detección de objetos y segmentación de imágenes con CNN. Un valor alto de IoU indica una mejor precisión del modelo, lo que es clave para aplicaciones en el análisis médico de imágenes.

Fig. 4. Valores de IoU por época obtenidos en el entrenamiento.



En la figura 4 se evalúa cómo varía el desempeño de los modelos en términos de IoU a medida que avanza el entrenamiento en función de las épocas. La arquitectura Xception tiene el mejor desempeño en general para la segmentación a pesar de que parte con un IoU bajo, pero su crecimiento es rápido y constante lo que nos indica que aprende características útiles muy temprano en el entrenamiento, presentando una tendencia ascendente y estabilizándose en las últimas épocas lo que nos indica que podría mejorar y evita el sobreajuste. EfficientNet es eficiente en términos de precisión contra el tamaño de la muestra, llega a un buen rendimiento sin la complejidad de la arquitectura de Xception, aunque su crecimiento después de la mitad de las épocas es lenta, lo que indica una posible cercanía al punto de saturación. En contraparte ResNet y MobileOne son las que tiene un progreso más lento y tienen un rendimiento casi similar, aunque MobileOne tiene una mejora más continua que indica que con más entrenamiento podría mejorar y en el caso de ResNet puede deberse a la tasa de aprendizaje.

Tabla 1. Resultado IoU y características de los modelos.

Modelos	IoU conjunto de prueba	Número de parámetros (M)	Tamaño de archivo (MB)
Xception	0.7789	20	88
EfficientNet-b3	0.7755	10	48
ResNet-152	0.7805	58	232
MobileOne-s0	0.7806	4	4.8

En la tabla 1 muestra como la arquitectura ResNet es la de mayor complejidad y su tamaño es mucho mayor que MobileOne, lo que se traduce en tiempo de entrenamientos más largos o un mayor consumo de GPU y no sería ideal para dispositivos con recursos limitados sin alguna optimización previa. En el modelo EfficientNet tiene un límite de aprendizaje más cercano y aunque es más liviano, aun puede ser más costoso que modelos diseñados para una eficiencia externa. La arquitectura Xception aunque es un modelo clásico, el desempeño es limitado para la segmentación. En el caso de MobileOne su rendimiento es modesto y no es el modelo más robusto, pero es el que presenta mejor posibilidad de rendimiento en implementaciones de hardware limitado.

4. CONCLUSIONES

La revisión del estado del arte demuestra los avances que ha tenido el aprendizaje profundo en diferentes ramas de la ciencia y tecnología, aunado a esto el diagnóstico médico por imágenes dermatoscópicas en lesiones cutáneas puede beneficiarse enormemente del aprendizaje profundo. Nuestra investigación se centra en la segmentación semántica de imágenes dermatoscópicas y coadyuvar en un modelo de inteligencia artificial para la detección de melanomas. Al tratarse de una aplicación médica, la precisión y la fiabilidad del modelo se vuelven especialmente críticas, ya que los errores pueden tener implicaciones serias en diagnósticos, tratamientos o decisiones clínicas. En la segmentación semántica de lesiones cutáneas es vital tener modelo que segmente con altísima fidelidad y un IoU alto es esencial, porque una pequeña diferencia en la imagen puede representar un diagnóstico incorrecto.

Si queremos una máxima precisión sin importar el costo computacional, Xception cumple el requerimiento, en algunos ambientes clínicos se dispone de dichos recursos como servidores o entornos en la nube. La arquitectura EfficientNet tiene un buen balance entre precisión y eficiencia; lo que puede

ayudar en caso de que el hardware sea más limitado, por ejemplo, en quirófanos o estaciones móviles. Si se requiere ejecutar el modelo en un dispositivo móvil, como un sistema portátil tele médico o de asistencia remota, MobileOne es el más viable, por su tamaño, sin embargo, su precisión es riesgosa para tareas críticas. ResNet se puede usar como un modelo base o para investigación básica, su desempeño es bajo y para medicina esto no es suficiente sin ajustes.

La disponibilidad y el intercambio de datos siguen siendo una de las mayores preocupaciones que podrían obstaculizar el desarrollo y la aplicación con éxito del aprendizaje profundo en el campo del diagnóstico médico por imagen. Es fundamental que la arquitectura empleada generalice lo mejor posible y no solo aprenda del conjunto de datos. Es deseable usar modelos cuya arquitectura sea bien entendida y documentada en entornos clínicos, para facilitar la aprobación regulatoria y la validación por pares médicos.

REFERENCIAS

F. Nachbar et al., 'The ABCD rule of dermatoscopy: High prospective value in the diagnosis of doubtful melanocytic skin lesions', Journal of the American Academy of Dermatology, vol. 30, no. 4, pp. 551–559, 1994.

I. Zalaudek et al. (2006) 'Three-point checklist of dermoscopy: an open internet study', British Journal of Dermatology, vol. 154, no. 3, pp. 431–437.

J. S. Henning et al., 'The CASH (color, architecture, symmetry, and homogeneity) algorithm for dermoscopy', Journal of the American Academy of Dermatology, vol. 56, no. 1, pp. 45–52, 2007.

D. Sauter, G. Lodde, F. Nensa, D. Schadendorf, E. Livingstone, and M. Kukuk, (2023) 'Deep learning in computational dermatopathology of melanoma: A technical systematic literature review', Computers in Biology and Medicine, vol. 163, p. 107083.

D. Popescu, M. El-Khatib, H. El-Khatib, and L. Ichim, (2022) 'New Trends in Melanoma Detection Using Neural Networks: A Systematic Review', Sensors, vol. 22, no. 2.

Xiao, H., Li, L., Liu, Q., Zhu, X., & Zhang, Q. (2023). Transformers in medical image segmentation: A review. Biomedical Signal Processing and Control, 84, 104791. doi:10.1016/j.bspc.2023.104791

H. Bhatt, V. Shah, K. Shah, R. Shah, and M. Shah, (2023) 'State-of-the-art machine learning techniques for melanoma skin cancer detection and classification: a comprehensive review', Intelligent Medicine, vol. 03, no. 03, pp. 180–190.

M. Dildar et al. (2021) 'Skin Cancer Detection: A Review Using Deep Learning Techniques', International Journal of Environmental Research and Public Health, vol. 18, no. 10.

Zhao, R. et al. (2020) 'Rethinking Dice Loss for Medical Image Segmentation', in 2020 IEEE International Conference on Data Mining (ICDM), pp. 851–860. Available at: https://doi.org/10.1109/ICDM50108.2020.00094.

Zhao, X. et al. (2024) 'A review of convolutional neural networks in computer vision', Artificial Intelligence Review, 57(4), p. 99. Available at: https://doi.org/10.1007/s10462-024-10721-6

Chollet, F. (2017) 'Xception: Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions', in 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, pp. 1800–1807. Available at: https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.195.

Tan, M. and Le, Q.V. (2019) 'EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks', CoRR, abs/1905.11946. Available at: http://arxiv.org/abs/1905.11946.

He, K. et al. (2016) 'Deep Residual Learning for Image Recognition', in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).

Vasu, P.K.A. et al. (2023) 'MobileOne: An Improved One millisecond Mobile Backbone', in 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 7907–7917. Available at: https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.00764.

Hao, S., Zhou, Y., & Guo, Y. (2020). A Brief Survey on Semantic Segmentation with Deep Learning. Neurocomputing, 406, 302–321. doi:10.1016/j.neucom.2019.11.118

Huang, H., Lin, L., Tong, R., Hu, H., Zhang, Q., Iwamoto, Y., … Wu, J. (2020). UNet 3+: A Full-Scale Connected UNet for Medical Image Segmentation. ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 1055–1059. doi:10.1109/ICASSP40776.2020.9053405

Chen, L.-C., Papandreou, G., Kokkinos, I., Murphy, K., & Yuille, A. L. (2018). DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 40(4), 834–848. doi:10.1109/TPAMI.2017.2699184

Badrinarayanan, V., Kendall, A., & Cipolla, R. (2017). SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 39(12), 2481–2495. doi:10.1109/TPAMI.2016.2644615

Cheng, B. et al. (2021) 'Boundary IoU: Improving Object-Centric Image Segmentation Evaluation', in 2021

IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, pp. 15329–15337. Available at: https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01508.

Codella, N.C.F. et al. (2017) 'Skin Lesion Analysis Toward Melanoma Detection: A Challenge at the 2017 International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), Hosted by the International Skin Imaging Collaboration (ISIC)', CoRR, abs/1710.05006. Available at: http://arxiv.org/abs/1710.05006.

Analysis of Pressure Distribution in a Seat during Seated Posture of the Human Body

Carmona-Ruiz, Deisy * **Navarro-Martínez, Fernando Abel** *
Lugo-González, Esther **

* *División de Estudios de Posgrado. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapan de León, Oaxaca, México. (e-mail:deysiabril@gs.utm.mx, fernando305.fm@gs.utm.mx)*
** *Instituto de Electrónica y Mecatrónica, Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapan de León, Oaxaca, México. (e-mail: elugog@mixteco.utm.mx).*

Abstract:
Technological progress has increased the amount of physically inactive work; in addition, prolonged periods of sitting can lead to musculoskeletal disorders. To address this issue, different technologies have been implemented, with finite element analysis being an accessible option to simulate and evaluate pressure distribution in different postures without requiring physical implementation. This paper presents the simplified CAD design of a 28-year-old female human body weighing 97 kg. Four postures were simulated, obtaining results that show that posture influences pressure, concentrating on the ischial tuberosities or on the lower thigh depending on the inclination. The results obtained show that the posture adopted significantly influences the distribution of pressures, with concentrations in the ischial tuberosities or in the lower thigh depending on the inclination, highlighting the use of finite element tools, in this context providing an effective tool for analysing and improving ergonomic conditions, contributing to the health and well-being of workers in sedentary environments.

Keywords: Finite element analysis, pressure distribution, seating, CAD model, musculoskeletal disorders.

1. INTRODUCCIÓN

Permanecer sentados por más de una hora puede provocar diversas afecciones en la salud, incluyendo molestias musculoesqueléticas que pueden contribuir al desarrollo de problemas crónicos, tales como úlceras por presión, fatiga muscular en la región glútea y dolor lumbar, así como se reporta en Panero y Zelnik (1996); Larrea-Araujo et al. (2021). En Odebiyi y Okafor-Udoka (2023) se menciona que los trastornos musculoesqueléticos son causados o agravados por riesgos ergonómicos, dando como resultado problemas tanto en la salud como en la productividad. Este problema se ha intensificado con el aumento del teletrabajo. En México, por ejemplo, durante la pandemia de COVID-19, el 23.5% de la población empleada trabajaba desde casa (INEGI (2020)), realizando tareas repetitivas con escasa movilidad. Además, un estudio reciente de INEGI (2023), menciona que aproximadamente el 60% de los adultos mexicanos lleva un estilo de vida sedentario, lo que evidencia la necesidad de soluciones ergonómicas. Dispositivos comerciales como el X3 PX100, Corporation (2011), o el BodiTrak Seat, Dong-Eun et al. (2018), permiten este análisis de presion ejercido en el asiento, pero su costo y complejidad limitan su accesibilidad, debido a la gran cantidad de sensores implementados. En Saenz-Cogollo et al. (2016) se muestra el desarrollo de un sistema de mapeo de presión similar a una alfombrilla, basado en un sensor textil de una sola capa y destinado a ser utilizado en entornos domésticos para monitorizar el estado físico de personas con movilidad limitada. En Xu et al. (2021) desarrollaron un sistema portátil de monitorización para reconocer la postura sentada del usuario e informar de los resultados en tiempo real. Se utilizó un conjunto de sensores de presión para recoger información relacionada con las posturas al sentarse, mientras que los datos se mostraban en un ordenador, este desarrollo se validó con una simulación en elemento finito para verificar la ubicación de los puntos de presión. Como se observa, el mapeo de presión puede hacerse aplicando diversos sensores y determinar con esto la precisión, costo y facilidad de adquisición entre otras variables y también se puede simular en diversas herramientas como el análisis de esfuerzos en elemento finito. Por otro lado, en la actualidad, la tecnología ha desarrollado diferentes formas de realizar el diseño de modelos humanos (Yan et al. (2020), Mujtaba-Hussain et al. (2022), por medio de escáner 3D, sensores, mediciones antropométricas y herramientas de *software* de modelado 3D. Como alternativa, el modelado 3D y simulaciones por elementos finitos permiten analizar el comportamiento biomecánico sin prototipos físicos. Por un lado las simulaciones por elementos finitos permiten analizar múltiples escenarios postulares sin incurrir en altos costos o requerir equipamiento especializado. Sin embargo, muchos modelos existentes son demasiado detallados (Liu et al. (2022)) o se basan en percentiles antropométricos estándar (Wenxia et al. (2019)), lo que reduce su aplicabilidad en casos

específicos. En este trabajo, para probar el mapeo de presión, se utiliza un modelo en 3D simplificado, que en este caso será de una mujer, destacando la distribución de presión ejercida en el asiento durante tres diferentes posturas utilizando la herramienta de elementos finitos.

En las siguientes secciones se describe el proceso de modelado 3D, el análisis FEM para las posturas, y los resultados obtenidos en cuanto a distribución de presión.

2. METODOLOGÍA

2.1 Modelado del dummy y del asiento

Para analizar la distribución de presión entre el cuerpo humano y una superficie rígida, se simula el comportamiento mecánico de los materiales involucrados y las condiciones de contacto. Por lo tanto, se utiliza el método de elementos finitos, el cual permite modelar la interacción entre geometrías complejas y materiales con diferentes propiedades mecánicas. El objetivo principal de esta simulación es estimar la distribución de presiones generadas en el asiento en distintas posturas, con el fin de identificar las áreas con mayor presión.

Para simular la distribución de presión que se genera entre un modelo humano y la superficie del asiento se llevó acabo un análisis de elemento finito estático. Se utiliza un mallado más fino en la región de contacto entre los muslos y el asiento, ya que en esta zona se concentran las mayores presiones y, por tanto, se requiere mayor resolución para capturar los detalles del contacto. En las regiones del modelo que no intervienen directamente en el contacto se usa un mallado más grueso, con el fin de reducir el costo computacional sin comprometer la precisión general de la simulación. Para utilizar un programa de análisis FEM se requiere tener un diseño CAD, que en este caso es de la sección del cuerpo humano a analizar (*dummy*) y del asiento. Por un lado, el diseño del *dummy* fue modelado con base en el cuerpo humano de una persona femenina con un peso total de 97 kg, en la Tabla 1 se muestran las dimensiones antropométricas tomadas en cuenta para el diseño y en la Figura 1 se tiene una vista isométrica del diseño.

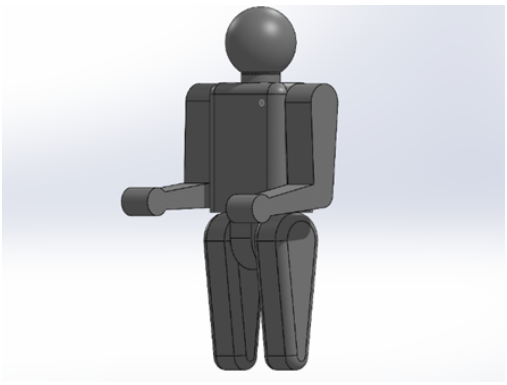


Fig. 1. Diseño CAD del Dummy (Vista isométrica).

También se requiere el diseño del asiento donde se sentará el usuario. Se considera un material de madera contrachapada con un grosor de $18mm$, con dimensiones de $400mm \times 400mm \times 18mm$. Esta elección permite analizar

Tabla 1. Dimensiones antropométricas

Dimensiones	Medidas	Dimensiones	Medidas
Estatura	1.6 m	Diámetro máx. bideltoide	0.36 m
Ancho de caderas	0.404 m	Alcance brazo frontal	0.94 m
Longitud posadera a propileno	0.35 m	Perímetro de brazo	0.54 m
Profundidad del tórax	0.20 m	Altura máx. del muslo	0.14 m
Diámetro transversal del torax	0.26 m	Diámetro de la cabeza	0.25 m

la distribución de presión sin la interferencia de deformaciones propias de materiales acolchonados, enfocando el análisis en la respuesta del cuerpo humano ante una superficie sin amortiguación. Además, se consideran las propiedades del material como el límite elástico de 20 MPa, el módulo elástico de 500 MPa, el coeficiente de Poisson de 0.35 y la densidad del material de 500 kg/m^3, las cuales son extraídas de for Standardization (2004) y Laboratory (2021).

2.2 Simulación del mapeo de presiones

Para este estudio, se simplificó el modelo considerando únicamente los muslos y el torso, ya que estas regiones soportan el peso corporal durante la sedestación. Estudios han adoptado enfoques similares al centrarse en esta zona anatómica para evaluar la interacción entre el cuerpo humano y superficies de asiento, considerando que la mayor concentración de presión ocurre en los isquiones, muslos y glúteos (Paul et al. (2014); Makhsous et al. (2008)). Los pesos de cada componente son los siguientes: dos piezas correspondientes al muslo, con un peso individual de 11.42 kg, sumando un total de 22.84 kg; y una pieza correspondiente al torso, con un peso de 38.20 kg. El peso total combinado es de 61.04 kg.

A continuación, se presentan con mayor detalle las diferentes posturas a analizar. Estas configuraciones se eligieron por su frecuencia en contextos reales de trabajo y descanso, permitiendo observar cómo varía la distribución de presión según la inclinación del torso:

(1) Postura neutra: Esta se presenta cuando se mantiene el centro de gravedad en equilibrio, donde el ángulo entre los muslos y el torso es de 90° (ver Figura 2).
(2) Inclinación hacia adelante (65°): Normalmente esta postura se realiza cuando se está trabajando en un escritorio, aquí el ángulo entre los muslos y el torso es de 65° (ver Figura 3).
(3) Inclinación hacia adelante (40°): El ángulo entre los muslos y el torso es de 40° (ver Figura 4).
(4) Reclinación hacia atrás: El ángulo entre los muslos y el torso es de 110° (ver Figura 5).

Para el análisis, se consideró al *dummy* como un cuerpo rígido, ya que su deformación es despreciable en comparación con la del asiento. Además, en la Figura 6, se estableció el contacto entre la superficie del asiento y la parte baja de los muslos del dummy para modelar la interacción entre ambos. Este contacto fue definido sin considerar

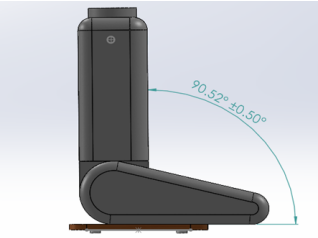


Fig. 2. Postura neutra.

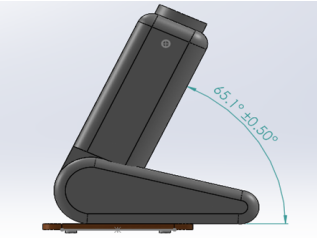


Fig. 3. Postura inclinada hacia adelante (65°).

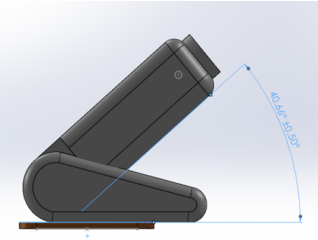


Fig. 4. Postura inclinada hacia adelante (40°).

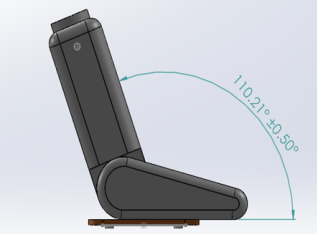


Fig. 5. Postura inclinada hacia atrás.

propiedades de fricción para simplificar el modelo y centrarse en la distribución vertical de presión. Se contempla incluir un modelo con fricción en trabajos futuros para analizar desplazamientos tangenciales o deslizamientos. En

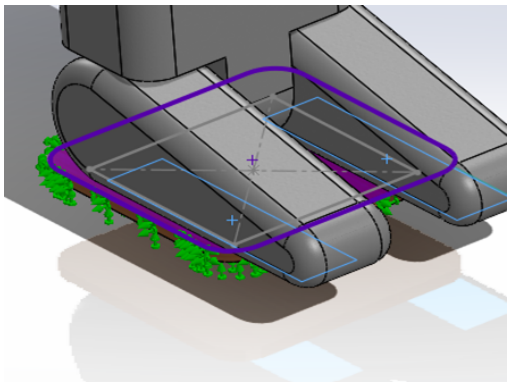


Fig. 6. Interacción de contacto local entre el asiento y los muslos.

este estudio, se consideró una representación monocapa de la piel humana, cuyas propiedades fueron tomadas del estudio de López y Jesica (2019), y se tomó en cuenta como una aproximación homogénea del comportamiento mecánico de la piel humana, sin realizar mediciones experimentales propias. Sin embargo, se reconoce que esta simplificación no considera explícitamente los tejidos subyacentes como grasa y músculo, los cuales influyen en la distribución de presión. Para obtener propiedades mecánicas que se asemejen a los de la piel se consideró un límite elástico de $0.02MPa$, un módulo elástico de $0.08MPa$, un coeficiente de Poisson de 0.495 y una densidad de $100kg/m^3$.

Para evitar deformaciones en todas direcciones, se aplican condiciones de frontera que restringen los desplazamientos en la parte inferior del asiento, permitiendo únicamente la deformación hacia abajo causada por la carga ejercida por el *dummy* (ver Figura 7). También debe configurarse la

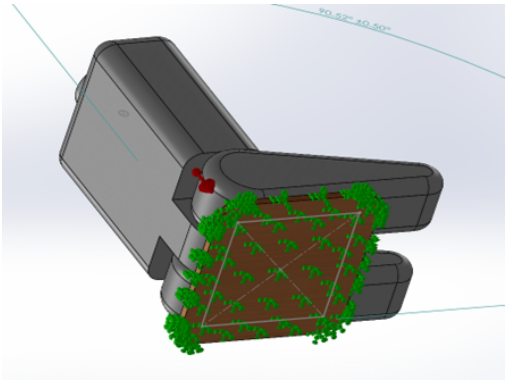


Fig. 7. Restricción fija

carga externa principal como la gravedad ($g = 9.81m/s^2$), con la finalidad de simular la acción del peso del *dummy* sobre el asiento. Por otro lado, el modelo se discretiza mediante una malla tipo tetraédrica. El primer mallado se realiza en la parte superior, específicamente en la zona de contacto entre los muslos y la base del asiento. Para esta región, se emplea una malla más densa, con un tamaño de elemento de $9.4837mm$, un mínimo de $8.5353mm$ y un coeficiente de refinamiento de 1.4, para mejorar la resolución de los esfuerzos generados, como se observa en la Figura 8. En contraste, en la parte trasera del asiento

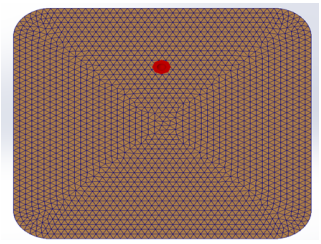


Fig. 8. Mallado denso.

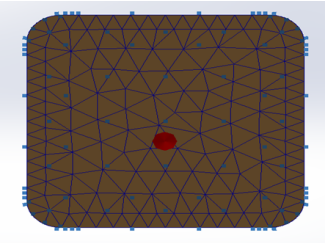


Fig. 9. Mallado menos denso.

se utiliza una malla menos densa, con un tamaño de elemento de $39.5155mm$ con un mínimo de $35.5639mm$ y el mismo coeficiente de refinamiento, tal y como se ilustra en la Figura 9. La elección del tamaño de los elementos en la malla influye directamente en la precisión de los resultados: mallas más finas permiten obtener soluciones más precisas, aunque a un mayor costo computacional, mientras que mallas más grandes aceleran el proceso de simulación, pero reducen la precisión de los resultados. Empleando cada una de las configuraciones, se realizan las simulaciones para cada una de las posturas. Se empleó un análisis estático que resuelve las ecuaciones de equilibrio bajo carga gravitacional, sin considerar efectos dinámicos o dependientes del tiempo.

3. RESULTADOS

A continuación, se presenta el análisis de esfuerzos de compresión y la deformación en el asiento durante las diferentes posturas en sedestación. Este análisis permite identificar regiones críticas donde la acumulación de presión podría generar incomodidad o incluso riesgos de lesión por presión si la postura se mantiene durante periodos prolongados.

En la Figura 10 se muestra el mapa de presión de contacto entre la superficie del asiento y los muslos del cuerpo durante la postura normal. Las zonas con mayor presión están representadas en color rojo con un valor máximo de $1.85 \times 10^5 N/m^2$, donde se puede observar que las zonas cercanas a la tuberosidad isquiática y los son donde se ejerce mayor presión. Mientas tanto en la Figura 11, se muestra la deformación correspondiente a la misma postura, dando como resultado una deformación máxima de $2.1618 \times 10^5 N/m^2$, y la figura concuerda con las zonas de mayor esfuerzo al contacto.

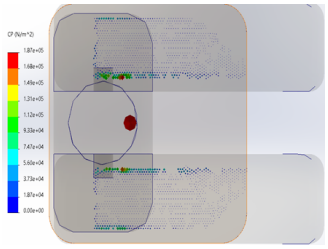


Fig. 10. Presión al contacto durante la postura normal.

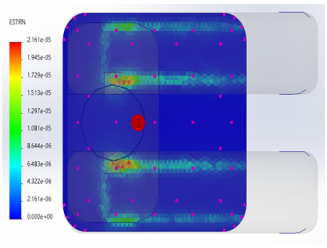


Fig. 11. Deformación unitaria durante la postura normal.

En la Figura 12, se muestra el mapa de presión de contacto correspondiente a la postura inclinada hacia adelante (65°), donde se observa que se tienen esfuerzos máximos de $1.47 \times 10^5 N/m^2$ y se distribuyen en la parte baja de los muslos y la entrepierna, generando mayor presión en estas áreas, indicando un cambio en la distribución de carga respecto a la postura normal. Por otro lado, en la Figura 13, se muestra la deformación de la base del asiento, con una deformación máxima de $1.689 \times 10^5 N/m^2$. Al igual que en el caso anterior, las zonas de mayor deformación coinciden con las áreas de mayor presión, lo que refuerza la validez del análisis y permite identificar posibles regiones de incomodidad o fatiga. En la postura inclinada hacia

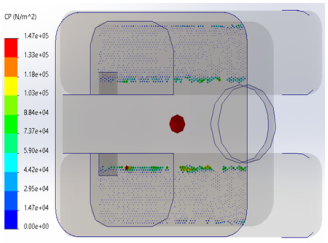


Fig. 12. Presión al contacto durante la postura inclinada hacia delante (65°).

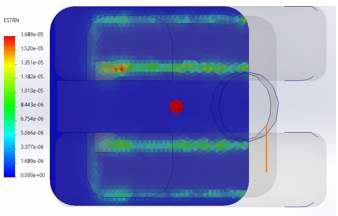


Fig. 13. Deformación unitaria durante la postura inclinada hacia delante (65°).

atrás, se obtiene un esfuerzo máximo de contacto de $2.45 \times 10^5 N/m^2$ (ver Figura 14). En esta postura, la presión se concentra principalmente en áreas cerca de la tuberosidad isquiática y en la parte superior del glúteo, mientras que en los muslos se presenta una reducción significativa en la carga. En la Figura 15 se puede ver la deformación unitaria, donde se observa una mayor deformación cerca de la tuberosidad con una deformación máxima de $2.97 \times 10^5 N/m^2$.

En un análisis adicional, en la Figura 16 se muestra el histograma de las presiones normales al eje Y ejercidas

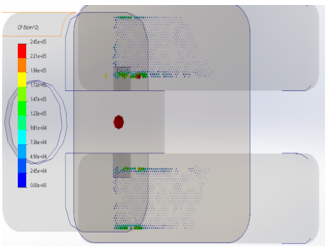


Fig. 14. Presión al contacto durante la postura inclinada hacia atrás.

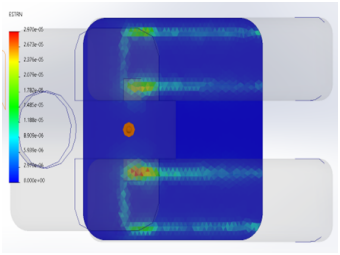


Fig. 15. Deformación unitaria durante la postura inclinada hacia atrás.

sobre el asiento. En este se compara la distribución entre la postura normal, inclinada hacia delante (65°) y la inclinada hacia atrás. Se puede observar que la postura inclinada hacia delante (65°) tiene una mayor concentración de esfuerzos elevados comparado con postura normal. Por su parte, la postura hacia atrás sin un respaldo, registra una mayor acumulación de esfuerzos altos, comparada con las otras dos posturas.

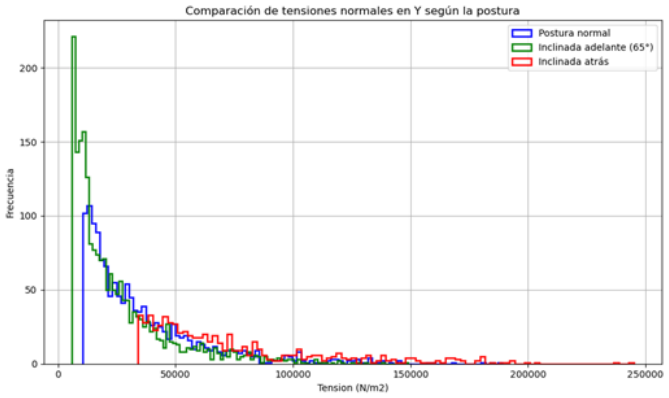


Fig. 16. Histograma de los esfuerzos normales al eje Y.

Como complemento a los estudios anteriores, se evalúan los resultados obtenidos del análisis de presión de contacto y la deformación unitaria de la postura inclinada hacia delante con un ángulo de 40°. Por lo tanto, en la Figura 17 se muestra el mapa de presiones y en la Figura 18 la deformación unitaria. Como se puede observar se ejerce mayor presión en la parte baja del muslo y la entrepierna, liberando las presiones cerca de la tuberosidad isquiática.

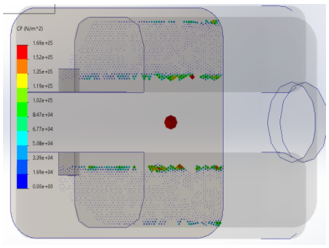


Fig. 17. Presión al contacto durante la postura inclinada hacia adelante (40°).

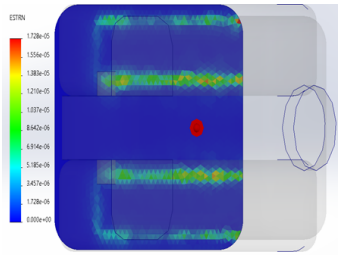


Fig. 18. Deformación unitaria durante la postura inclinada hacia adelante (40°).

Además, en la Figura 19 se presenta el histograma de los esfuerzos normales en el eje Y correspondientes a

la postura inclinada a 40° y a 60°, con la finalidad de comparar la frecuencia de la distribución de presiones, en ambas configuraciones. Para este análisis se tomó en cuenta únicamente valores mayores de $5,000 N/m^2$ con el fin de centrarse en las regiones con mayor presión. La comparación reveló un incremento del 27.33% en los esfuerzos normales durante la postura inclinada hacia adelante con 40° en comparación con la de 60°. Indicando que la parte baja de los muslos ejerce mayor presión entre más inclinado se encuentre.

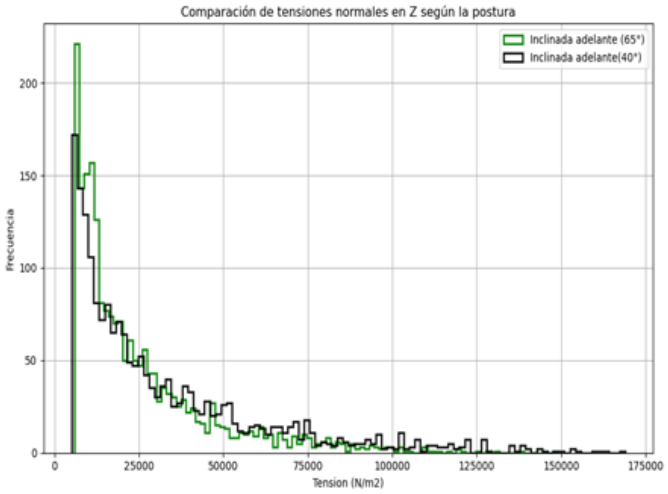


Fig. 19. Histograma de las tensiones normales al eje Y de las posturas inclinadas hacia adelante.

A continuación, en la Tabla 2 se detalla el análisis comparativo de las cuatro posturas evaluadas, considerando el esfuerzo máximo de contacto, la deformación unitaria y las áreas anatómicas con mayor concentración de carga. La postura inclinada hacia atrás registró los valores más altos de presión, alcanzando $2.45 \times 10^5 N/m^2$. Esta elevada concentración de carga se localiza principalmente en la tuberosidad isquiática y región glútea, indicando una distribución de peso desfavorable que podría generar puntos de sobrecarga y posibles molestias con el tiempo prolongado en esta posición.

En contraste, las posturas inclinadas hacia adelante muestran una reducción progresiva de la presión conforme aumenta el ángulo de inclinación. La postura a 40° presenta $1.69 \times 10^5 N/m^2$, mientras que a 60° disminuye a $1.47 \times 10^5 N/m^2$. En estas posiciones, la carga se desplaza hacia las extremidades inferiores, concentrándose particularmente en la zona de la entrepierna y la parte distal de los muslos. Además, en la postura normal, se muestran valores intermedios de presión ($1.85 \times 10^5 N/m^2$) con un patrón de distribución donde el peso se reparte entre tres áreas principales: las tuberosidades isquiáticas, la musculatura glútea y los muslos. Esta configuración anatómica parece ofrecer una mejor distribución de las cargas. En la Tabla 3 se muestra un cuadro comparativo de la presión mínima, máxima y promedio de cada postura tomando en cuenta los esfuerzos normales en el eje Z. Como se puede observar en la postura inclinada hacia atrás, se tiene el esfuerzo con mayor valor promedio, con una diferencia porcentual del 70% respecto a su valor máximo. Esto indica que aproximadamente el 30% de sus valores promedios se encuentran cerca del máximo, observando

Tabla 2. Tabla comparativa de las diferentes configuraciones.

Postura	**Esfuerzo máximo de contacto** (N/m^2)	**Deformación unitaria** (N/m^2)	**Áreas de mayor contacto**
Normal	1.85×10^5	2.1618×10^5	• Tuberosidad isquiática • Glúteos • Muslos
Inclinada hacia delante (40)	1.69×10^5	1.728×10^5	• Parte baja del muslo • Entrepierna
Inclinada hacia delante (60)	1.47×10^5	1.689×10^5	• Entrepierna • Tuberosidad isquiática
Inclinado hacia atrás	2.45×10^5	2.97×10^5	• Tuberosidad isquiática • Glúteos

que su valor mínimo se encuentra muy cerca del promedio, garantizando una mejor distribución. Además para la postura normal, el esfuerzo promedio es aproximadamente a 19% de sus valores máximos. De igual manera el esfuerzo mínimo se encuentra cerca de su valor promedio. Por otro lado la postura inclinada hacia adelante (60°) se encuentra con una diferencia porcentual del 83% , mientas que a 40° se encuentra a 70% , dando como resultado una mayor concentración de sus esfuerzos cercanos a su promedio.

Tabla 3. Tabla comparativa de las presiones normales al eje Z.

Postura	**Esfuerzo mínimo** N/m^2	**Esfuerzo máximo** N/m^2	**Esfuerzo promedio** N/m^2	**Δ% μ-máx.**
Normal	1.06×10^4	1.89×10^5	3.585×10^4	81 %
Inclinada hacia delante (40°)	3.8×10^1	1.69×10^5	$9,752 \times 10^3$	70 %
Inclinada hacia delante (60°)	5.95×10^3	1.49×10^5	2.523×10^4	83 %
Inclinado hacia atrás	3.4×10^4	2.45×10^5	7.349×10^4	70 %

4. CONCLUSIONES

Este estudio permitió realizar la simulación de la distribución de presión de contacto en un modelo CAD del cuerpo humano simplificado, tomando en cuenta cuatro diferentes posturas, además se realizó una comparación entre la postura inclinada hacia delante con dos diferentes ángulos. El análisis de elemento finito dio como resultado la localización e intensidad de presiones en función de la postura adoptada. Donde se muestra que la postura inclinada hacia adelante (40°) presenta un incremento del 27.33% en las presiones normales respecto a la postura inclinada con 60°, sometiendo a mayor presión a la parte baja de los muslo. En contraste, se puede observar que la postura inclinada hacia atrás mostró un incremento de la

presión concentrada en la tuberosidad isquiática y en los glúteos. Estos resultados sugieren que la postura corporal influye en las presiones ejercidas en el asiento, debido a que se desplaza el centro de gravedad dependiendo de la inclinación del torso. Lo cual podría desarrollar molestias o lesiones por someterse a presiones prolongadas. El análisis por elemento finito resultó ser una herramienta que permite analizar la distribución de presión en el asiento sin la necesidad de implementarlo de manera física. Con base en estos resultados, se puede hacer una propuesta para la colocación de los sensores que permitirán realizar de manera física el mapeo de las presiones, que es la segunda fase de este estudio.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico otorgado durante la realización de este artículo."

REFERENCIAS

Corporation, X.T. (2011). Testing and measurement product catalogue. Technical report, XSENSOR Technology Corporation. URL `http://www.alliancesystems.com.br/media/pdf /XSensor_Catalogue_7_4_2011_low_res.pdf`. En línea; accedido 31 Mayo del 2024.

Dong-Eun, L., Sang-Min, S., Hee-Soon, W., y Sung, Y.W. (2018). Análisis del desequilibrio corporal en varias posturas de escritura usando la medición de la presión al sentarse. *Diario of Physical Therapy Science*, 343 – 346. URL `https://api.semanticscholar.org/CorpusID:39370 48`.

for Standardization, E.C. (2004). EN 13986: Wood-based panels for construction. European Standard. Brussels, Belgium.

INEGI (2020). Encuesta telefónica sobre covid-19 y mercado laboral. URL `https://www.inegi.org.mx/contenidos/investiga cion/ecovidml/2020/doc/ecovid_ml_presentacion. pdf`. [Accesado 10-Marzo-2024].

INEGI (2023). Módulo de práctica deportiva y ejercicio físico (mopradef) 2023. URL `https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladepren sa/boletines/2024/MOPRADEF/MOPRADEF2023.pdf`. [Accesado 12-Marzo-2024].

Laboratory, U.F.P. (2021). Wood handbook: Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-282, US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. URL `https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/61969`. Table 5–3a.

Larrea-Araujo, C., Ayala Granja, J., Vinueza-Cabezas, A., y Acosta-Vargas, P. (2021). Ergonomic risk factors of teleworking in ecuador during the covid-19 pandemic: A cross-sectional study. *Int J Environ Res Public Health*, 11–18.

Liu, S., Beillas, P., Ding, L., y Wang, X. (2022). Developing a full-body finite element model and its preliminary validation for seating comfort. In *Proceedings of the 7th International Digital Human Modeling Symposium*. doi: 10.17077/dhm.31775.

López, I. y Jesica, A. (2019). *Comportamiento mecánico de la piel en función del espesor de las capas que la componen*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, Colombia.

Makhsous, M., Lim, D., Hendrix, R., Bankard, J., Rymer, W., y Lin, F. (2008). Finite element analysis for evaluation of pressure ulcer on the buttock: Development and validation. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering : a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 15, 517–25. doi:10.1109/TNSRE.2007.906967.

Mujtaba-Hussain, J., Muhammad-Adil, A., Ahmad, A., Hafiza, Mahnoor, A., Jehangir, A., Javed, K., Ateeq-Ur, R., y Seada, H. (2022). Fsr-based smart system for detection of wheelchair sitting postures using machine learning algorithms and techniques. *Journal of Sensors*, 10. URL `https://www.hindawi.com/journals/js/2022/19010 58/`.

Odebiyi, D.O. y Okafor-Udoka, A.C. (2023). Musculoskeletal disorders, workplace ergonomics and injury prevention. *Ergonomics-new insights*.

Panero, J. y Zelnik, M. (1996). Human dimension and interior space. *Editorial Gustavo Gili SA*. URL `https://claudiaalvaradom.files.wordpress.com/ 2012/10 /lasdimensioneshumanasenlosespaciosin teriores.pdf`.

Paul, G., Miller, J., y Pendlebury, J. (2014). Soft tissue human thigh and buttock finite element model to simulate vehicle seat cushion indentation. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*, 4, 220. doi: 10.1504/IJHFMS.2014.067179.

Saenz-Cogollo, J., Pau, M., Fraboni, B., y Bonfiglio, A. (2016). Pressure mapping mat for tele-home care applications. *Sensors*, 16(3), 1–6. doi:10.3390/s16030365.

Wenxia, X., Yudi, Z., y Jiatong, Y. (2019). Study on virtual simulation method of driver seat comfort. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 493, 012096. IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/493/1/012096.

Xu, R., Cong, W., Yao, X., Xuliang, G., Zhiyuan, Z., y Bin, C. (2021). A portable sitting posture monitoring system based on a pressure sensor array and machine learning. *Sensors and Actuators A: Physical*, 331(1), 1–6. doi:10.1016/j.sna.2021.112900.

Yan, S., Wirta, J., y Kämäräinen, J.K. (2020). Anthropometric clothing measurements from 3d body scans. *Machine Vision and Applications*, 31(1), 7. doi:10.1007/s00138-019-01054-4. URL `https://doi.org/10.1007/s00138-019-01054-4`.

Algorithm Using Steganography Techniques for Security, Integrity and Authentication of Clinical Data in Imaging

Nuñez Ramirez, Diana *, Sánchez Diaz, Aimee Amalinalli *, Reyes Gordillo, Jonathan Daniel *,

** Instituto Tecnológico de Tláhuac I Av. Estanislao Ramírez Ruiz 301, Amp. Selene, Tláhuac, 13420 Ciudad de México, CDMX*
(e-mail: diana.nr@tlahuac.tecnm.mx).

Abstract: In recent years, digitalization has increased significantly in the medical field in Mexico, driven mainly by the need to improve the efficiency, accessibility and quality of healthcare services. The implementation of the Electronic Patient Record (EPR) allows better management of patient information, reduces errors and facilitates communication between health professionals and patients. Achieving the interoperability of acquisition, transmission and storage systems in conjunction with ECE makes it possible to provide comprehensive and coordinated care. Currently, the Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) standard has been responsible for defining different medical image formats, the data that can be exchanged, as well as the quality required for medical interpretation or clinical use.
This paper proposes a system that allows non-invasive concealment of sensitive patient data in medical images. The data are name, ID, year of birth, gender, medical institution or associated clinic.
This algorithm through the Simple Linear Iterative Clustering (SLIC) technique selects a region that we will call superpixels, which will be evaluated with metrics such as pixel intensity and entropy and finally manage to insert data in binary format in the image.
The algorithm will be in charge of choosing strategic regions that will not only hide information but will also be a method of identifying image manipulation, if the image during storage, transmission and/or access suffers an intentional manipulation or not, it will be possible to identify it more easily.
It is important to meet the requirements of integrity, authentication and security of medical information and its related imaging for the patient's well-being.
Keywords: Digital Watermarking, SHA256, superpixel, DICOM.

1. INTRODUCCIÓN

Los problemas de desvinculación entre el Expediente Clínico Electrónico (ECE o EPR por sus siglas en inglés) y su imagen médica correspondiente son una preocupación significativa en el ámbito de la salud digital. Esta desvinculación puede ocurrir por diversas razones y tener consecuencias graves, de acuerdo con Barni, M., et. al. (2005).

En Cedillo-Hernandez M., et. al. (2015), se menciona que las causas de la desvinculación son la modificación de metadatos DICOM, errores en la indexación o almacenamiento, problemas de interoperabilidad, errores humanos, actualizaciones o migraciones de sistemas. Esto puede conducir a diagnósticos erróneos, prescripciones médicas incorrectas, intervenciones quirúrgicas equívocas, retrasos en la atención, pérdida de información valiosa e impacto en la reputación y recursos de la institución médica.

1.1 Estandar DICOM

El estándar DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) se compone principalmente de servicios de red para la transmisión de datos de imágenes médicas y otra información relacionada. Aunque inicialmente se enfoca en la comunicación de red, posteriormente se añadió un formato de archivo para el almacenamiento en medios portátiles (Varma, 2012).

El servicio de almacenamiento DICOM permite el envío de imágenes y otros datos persistentes (como informes estructurados) desde una estación de trabajo a un sistema central de archivo y comunicación de imágenes (PACS), además se utiliza para obtener una confirmación de que un dispositivo ha guardado permanentemente una imagen (Strickland, 2000). Es decir que los ECE y las imágenes médicas se almacenan en diferentes lugares, por lo tanto, es necesario vincular la imagen y su ECE correspondiente cada vez que se necesite consultar el expediente completo del paciente.

1.2 Marca de Agua

La marca de agua digital es un método para integrar una señal o código identificativo dentro de un archivo digital (como una imagen, audio o video), conocido como señal huésped. Esta marca de agua contiene información (como un logo, número de serie o datos del propietario) que puede ser detectada por

individuos autorizados para propósitos de verificación de autenticidad, protección de derechos de autor o rastreo de copias. En esencia, se incrusta información invisible o sutil en el contenido digital para identificar su origen o proteger su propiedad. (Das y Kundu, 2012).

Mousavi, Naghsh y Abu-Bakar (2014) realizaron una revisión sobre las técnicas de marca de agua utilizadas en imágenes médicas y en su trabajo expresan que los requerimientos fundamentales para el diseño de algoritmos de marcado de agua en imágenes médicas se consideren tres aspectos:

Imperceptibilidad: La alteración visual introducida por la marca de agua debe ser mínima o nula para el ojo humano, preservando la calidad diagnóstica de la imagen. La imperceptibilidad se evalúa mediante métricas como PSNR y SSIM.

Robustez: El método de marcado debe resistir tanto modificaciones accidentales como ataques intencionados que busquen eliminar o dificultar la detección de la marca de agua. La resistencia se mide con indicadores como la tasa de bits correctos (BCR) o bien la tasa de bits erróneos (BER).

Capacidad de la señal: Se refiere a la cantidad de información que se puede codificar en la marca de agua dentro de la imagen médica. El volumen de datos que la señal puede contener está directamente relacionado con el propósito específico de la aplicación del marcado de agua.

2. METODOLOGÍA

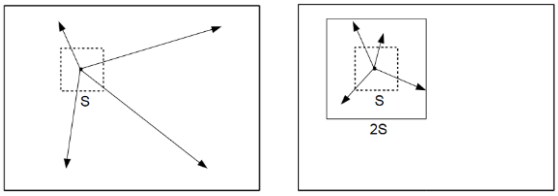
La propuesta que se presenta a continuación se divide en dos etapas, la primera es la etapa de inserción de datos que se ocultarán en regiones previamente seleccionadas y la segunda etapa es la recuperación de la información insertada para comprobar que la imagen no ha sufrido manipulaciones.

2.1 Etapa de Inserción

1. La imagen es segmentada por el algoritmo SLIC formando superpixeles, los superpixels por defecto hacen una segmentación más general entre la Región de Interés (ROI, por sus siglas en inglés) y la Región de No Interés (RONI, por sus siglas en inglés).

2. La agrupación iterativa (SLIC) es una adaptación de algoritmo de k-means para generación de superpíxeles.

3. El número de cálculos de distancia en la optimización se reduce drásticamente al limitar el espacio de búsqueda a una región proporcional al tamaño del superpíxel, observe Figura 1 (a). Achanta, Shaji, Smith, Lucchi, Fua y Susstrunk, (2012) desarrollaron una adaptación del algoritmo convencional de k-means en donde las distancias se calculan desde el centro de cada grupo hasta cada píxel de la imagen como se observa en la Figura 1 (b).



(a) (b)

Figura 1. (a) Búsqueda estándar de k-means en toda la imagen. (b) Búsqueda SLIC en una región limitada Achanta et al. (2012).

4. Posterior a la segmentación por superpixeles se eligen de 3 a 5 regiones con menor entropía e intensidad, en otras palabras, regiones que pertenecen a la RONI y que presentan mejor homogeneidad, esto depende del contenido de cada imagen, como se observa en la Figura 2.

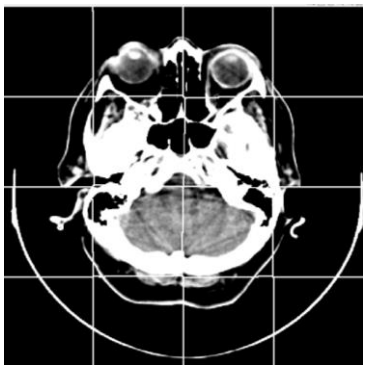


Figura 2. Segmentación de una Tomografía Computarizada.

5. La formación de la marca de agua es a través de la extracción de los metadatos de la imagen, se conformará una cadena de datos que está constituida por nombre completo, ID, año de nacimiento, sexo, institución médica o bien clínica asociada.

6. Posteriormente se aplicará el hash SHA256 y la operación lógica XOR para disminuir el tamaño de la marca de agua a la cual denominaremos *W,* como se explica en (1).

$$W = b(r) \oplus b(s) \quad (1)$$

Donde *W* es la marca de agua que se insertará y b indica cada bloque en que está dividida la marca de acuerdo con la cadena de bits del hash SHA256, donde, *r*=1, …, 128 y *s*=129, …256 y ⊕ denota la operación XOR.

7. Dentro de cada bloque se hace una segunda segmentación con ventanas de *MxM* y se aplican la ecuación (2).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{x=0}^{k-1}\sum_{y=0}^{k-1} f(x,y)}{M^2} \quad (2)$$

En donde $\bar{x}$ es la media de intensidad de píxel de cada bloque, el tamaño de cada bloque está definido por *k*, *f(x,y)* es el valor de cada píxel que se encuentra en el bloque, el siguiente proceso está basado en método propuesto por Rodríguez-Colín, Feregrino y Villanueva (2008).

8. Y posterior se realiza la siguiente operación, asignando un valor a α y eligiendo el píxel del centro del bloque *pc*, α es la fuerza de inserción de la marca de agua la cual tiene un valor de entre 0 a 1, observe (3).

$$\delta = pc \times \alpha \quad (3)$$

9. La forma de insertar la marca de agua es la siguiente, en el *pc* o bien píxel central, este cambia de valor y se convierte en *pcn* o píxel central nuevo, como se muestra en la ecuación (4).

$$pcn = pc + \delta_1 \quad (4)$$

Si el bit a insertar de acuerdo con la marca de agua *W* es 1, pcn es el nuevo valor del píxel.

10. Por otro lado, si el bit a insertar de acuerdo con la marca de agua W es 0, entonces se aplica la ecuación (5).

$$pcn = pc - \delta_2 \quad (5)$$

2.2 Etapa de Extracción

La forma de extraer la marca de agua es la siguiente

1. Primero realizar el proceso de localización de los pixeles centrales de cada bloque que se encuentra en la región o bien regiones seleccionadas.

   Si $pcn \geq \bar{x}$ se extrae el bit "1".

   Si $pcn < \bar{x}$ se extrae el bit "0".

   De esta forma la marca de agua recuperada es *W´*.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

El algoritmo fue implementado en imágenes DICOM en la modalidad Tomografía Computarizada con dimensiones de 512*512 a escala de grises con una profundidad de pixel de 16 bits.

El tamaño de la marca de agua tiene una longitud de 128 bits, esto nos permite conservar la integridad de los datos a insertar y también mantener la calidad visual de la imagen.

La métrica que nos permite comprobar la imperceptibilidad del algoritmo es la relación Pico Señal a Ruido (PSNR) que es utilizada para evaluar qué tan imperceptible es la modificación introducida en una imagen. Representa la relación entre la imagen original y la imagen procesada (marcada), cuantificando la calidad visual que se mantiene después de aplicar el método propuesto, como se muestra en la ecuación (6).

$$PSNR(dB) = 10\,log_{10}\left(\frac{N_1.N_2(.ValorMaxPixel^2)}{\sum_{x=1}^{N_1}\sum_{y=1}^{N_2}(I(x,y))-I'(x,y))^2}\right) \quad (6)$$

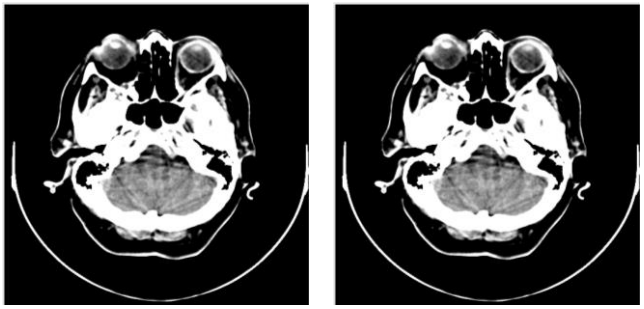
Donde $I(x,y)$ es la imagen médica original, $I'(x,y)$ es la imagen médica marcada, N_1 y N_2 son las dimensiones de la imagen y $ValorMaxPixel$ es el valor máximo de píxel de la imagen (Klinger y Snavely, 2010).

También se evaluó de acuerdo con el Índice de Similitud Estructural (SSIM, por sus siglas en inglés) es una métrica que evalúa la semejanza estructural entre una imagen procesada y la imagen original. Su valor oscila entre 0 y 1, donde 1 indica una identidad visual completa entre ambas imágenes y 0 señala una ausencia total de similitud estructural. Yu, Shang y Li (2013) presentaron la ecuación (7) para el cálculo del SSIM la cual analiza la información estructural de las imágenes para identificar cualquier distorsión introducida por el procesamiento aplicado.

$$SSIM(I,I') = \frac{(2\mu_I\mu_{I'}+C_1)\left(2\sigma_{I_1'}+C_2\right)}{(\mu_I^2+\mu_{I'}^2+C_1)(\sigma_I^2+\sigma_{I'}^2+C_2)} \quad (7)$$

Donde I es la imagen médica original, I'es la imagen con marca de agua, C_1es una constante según la luminancia de la imagen, C_2es una constante de contraste, σ es la desviación estándar de la señal de contraste y la intensidad de la señal de luminancia es μ.

En la Figura 3 es posible observar que en la imagen (a) se obtiene la imagen DICOM original y en la (b) se encuentra la imagen DICOM marcada.



(a) (b)

Figura 3. (a) Imagen de cerebro original (b) Imagen de cerebro marcada.

Por otro lado, para evaluar la integridad de los datos recuperados se aplica la Tasa de Bits Erróneos (BER, por sus siglas en inglés), se calcula con la ecuación (7).

$$BER = \frac{\sum_{i=1}^{L} W_i \oplus W_i'}{L} \quad (7)$$

Donde L es la longitud de la cadena de bits de la marca de agua original W, generada en esta etapa de detección, W' es la marca de agua recuperada, y $\oplus$ es la operación XOR (Kennedy y Eberhart, 1995).
En la siguiente tabla se muestran las métricas promedio obtenidas al aplicarse a 5 imágenes de cerebro.

Tabla 1. Métricas de evaluación.

Métrica	PSNR	SSIM	BER
Cerebro	49.86 dB	0.999	0

Como se puede observar en la Tabla 1, los valores de PSNR y SSIM muestran que la imagen no sufre distorsiones visuales significativas y la recuperación de la información es integra, es decir, no hay perdida de datos.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos cumplen con los requerimientos de un procesamiento aplicado a imagenología médica. La manipulación de los pixeles es imperceptible y es posible recuperar la marca de agua íntegra, lo que nos asegura la vinculación entre el ECE y la imagen asociada, aunque estas se encuentren almacenadas en diferentes dispositivos, esto también brinda autenticación ya que si la imagen sufrió manipulaciones intencionadas o no intencionadas durante la transmisión, almacenamiento o incluso tuvo acceso alguien que no tenía las credenciales, las manipulaciones se pueden identificar al realizar comparaciones con las regiones de la RONI seleccionadas.

Rodríguez-Colín, Feregrino y Villanueva (2008) obtuvieron como resultado de su propuesta un 37.1 dB en imágenes de cráneo para PSNR, nuestro método muestra un PSNR de 49.86 dB, esto supera en imperceptibilidad al método propuesto, es importante mencionar que el trabajo presentado en el presente documento brinda complejidad y seguridad al implementar el hash SHA256, para estandarizar la longitud de la marca de agua.

Para la métrica de imperceptibilidad SSIM se obtuvo un promedio de 0.999 muy cercano a 1, lo que nos indica que el cambio no es perceptible al ojo humano ya que la métrica está basada en el sistema visual humano.

Por otro lado, en cuanto a la integridad de la información, el mensaje oculto en la marca de agua se recupera de forma integra ya que la tasa de error es cero.

REFERENCIAS

Barni, M., Cox, I., Kalker, T., Kim, Hyoung-Joong. (2005). Digital Watermarking: 4th International Workshop, IWDW 2005, Siena, Italy, September 15-17. DOI: 10.1007/11551492.

Cedillo-Hernandez M., F. Garcia-Ugalde, M. Nakano-Miyatake and H. Perez-Meana (2015). Robust watermarking method in DFT domain for effective management of medical imaging, Springer Signal, Image and Video Processing, vol. 9, no. 5, pp. 1163-1178. DOI: 10.1007/s11760-013-0555-x.

Das, S., y Kundu, M. K. (2012). Effective management of medical information through a novel blind watermarking technique. Journal of Medical Systems, 36, 3339-3351. DOI: 10.1007/s10916-012-9827-1

DICOM Standard. (s.f.). DICOM Standard. Recuperado de https://www.dicomstandard.org/ (Consultado el 20 de abril de 2025).

Kennedy, J., y Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization (pso). En Proceedings of IEEE international conference on neural networks, Perth, Australia, pp. 1942–1948. vol.4. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.

Klinger, K., y Snavely, J. (2010). Advanced Techniques in Multimedia Watermarking: Image, Video and Audio Applications.

Mousavi, S. M., Naghsh, A., y Abu-Bakar, S. A. R. (2014). Watermarking Techniques used in Medical Images: A Survey. Journal of Digital Imaging, 27(6), 714–729.

Rodríguez Colín, R., Feregrino, C., y Villanueva, J.-A. (2008). Robust Watermarking Scheme Applied to Radiological Medical Images. IEICE Transactions on Information and Systems, E91-D(3), 862-864. doi: 10.1093/ietisy/e91-d.3.862.

Strickland, N. H. (2000). PACS (picture archiving and communication systems): filmless radiology. Archives of Disease in Childhood, 83(1), 82-86. doi: 10.1136/adc.83.1.82.

Varma, D. R. (2012). Managing DICOM images: Tips and tricks for the radiologist. Indian Journal of Radiology and Imaging, 22(1), 4-13. doi: 10.4103/0971-3026.95396.

Yu, P., Shang, Y., y Li, C. (2013). A new visible watermarking technique applied to CMOS image sensor. MIPPR 2013: Multispectral Image Acquisition, Processing, and Analysis, 8917, 891719. doi: 10.1117/12.2031136.

Entomopathogenic Nematodes *Steinernema glaseri* Protected with Zinc Oxide Nanoparticles Against Ultraviolet Radiation

Cortés Martínez, Carlos Inocencio*, Hernández Ramírez, Cecilia*, González Arango, Fabiola*, Ruiz Robles, Amairani Marlenne*, Ávila López, Mariana Beatriz, Martínez Salgado, Rita Teresa***

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Etla, Abasolo S/N, Barrio del Agua Buena, Santiago Suchilquitongo, Oaxaca, México, 68230. (e-mail: carlos.cm@itvalletla.edu.mx, cecilia.rh@itvalletla.edu.mx, fabiolagonzalezarango@gmail.com, marlene.rr@itvalletla.edu.mx, rita.ms@itvalletla.edu.mx).*

*** Centro de Innovación para el Desarrollo Apícola Sustentable en Quintana Roo/Universidad Intercultural Maya de Quintana Roo, México, 77890. (e-mail: mariana.avila@secihti.mx).*

*** Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados (CIBIOGEM-SECIHTI), Ciudad de México, México, 03940. (e-mail: mariana.avila@secihti.mx).*

Abstract: The adoption of entomopathogenic nematodes as an effective biopesticide for the control of insect pests is conditioned by the development of formulation technology. For foliar applications, the use of a protective adjuvant against ultraviolet (UV) radiation is needed, and low concentrations of Zinc oxide nanoparticles in aqueous suspensions have shown a nontoxic effect on nematodes. The objective was to evaluate the effect of Zinc oxide nanoparticles on viability of *Steinernema glaseri* NJ43 exposed to UV radiation. An experiment was established in which 5 mL suspensions with 1000 infective juveniles per mL and concentrations of 200, 500 and 1500 ppm were exposed for 10 and 20 min. Twenty-four hours after UV exposure and storage at 25 °C and 50% relative humidity, the nematodes *S. glaseri* maintained a survival equivalent to that of the unexposed, but its pathogenicity on *Galleria mellonella* larvae was improved significantly. These results reveal that Zinc oxide nanoparticles provide UV protection at the concentrations tested, under laboratory conditions.

Keywords: Agroecological Transition, Biological Control, Biopesticide, Insect pest, Nanomaterials.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de alimentos vegetales requiere aumentar la producción agrícola para alcanzar la autosuficiencia alimentaria, lo que hace necesario implementar prácticas agroecológicas en los cultivos para garantizar una producción sostenible (Naciones Unidas, 2015).

El acceso a insumos biológicos para el control de insectos plaga agrícolas, que sean de bajo impacto ambiental y seguros para la salud humana y animal, promueve la adopción de estas prácticas agroecológicas, permite reducir el uso de insecticidas químicos, evita residuos tóxicos en los productos agrícolas y coadyuva a la disponibilidad de alimentos más saludables (Vermeire at al., 2024).

Los nemátodos entomopatógenos (NEP) de los géneros *Steinernema* y *Heterorhabditis*, son depredadores naturales que ayudan a mantener el equilibrio de las poblaciones de insectos, no representan un riesgo para la salud humana o animal, y están aprobados como agentes de biocontrol de coleópteros y lepidópteros en la producción agrícola orgánica (Shapiro-Ilan et al., 2006).

El desarrollo y comercialización de un producto a base de NEP parte de la recolección de cepas altamente virulentas, el mejoramiento de sus capacidades patogénicas, la producción industrial de juveniles infectivos (JI) viables a bajo costo y el mantenimiento de su efectividad (Cortes-Martínez and Chavarría-Hernández, 2020). La formulación de un producto a base de NEP en consideración con el método de aplicación, permite la extensión de la vida útil y el mejoramiento de la efectividad en campo (Cruz-Martínez et al., 2017).

En campo, la radiación ultravioleta (UV) reduce el desempeño de los NEP como agentes de biocontrol y limita su uso contra plagas que habitan por encima del suelo, lo que condiciona su aplicación en las primeras horas de la mañana, al final de la tarde o en suelos subterráneos (Shapiro-Ilan et al. 2006).

Las nanopartículas de óxido de Zinc (NP-OZn) poseen características fisicoquímicas que les confieren propiedades antibacterianas, antifúngicas y de protección UV, lo que posibilita su uso como nanofertilizantes y nanopesticidas para la transición a una agricultura más sostenible (Makirita et al., 2020; Abd-Elsalam, 2021).

Sin embargo, la integración de las NP con los NEP enfrenta importantes desafíos, entre ellos: I) optimización de los niveles de concentración de NP sin comprometer la viabilidad de los NEP, II) asegurar que las NP sean inocuas para los NEP y no generen efectos tóxicos en el medio ambiente, III) mantener la estabilidad de los NEP durante el almacenamiento y IV) garantizar la eficacia de la formulación en campo.

Recientemente, se determinó que la exposición a NP-OZn en suspensiones concentradas del orden de 20 a 1500 ppm no tuvo un efecto toxico sobre los nemátodos *Steinernema glaseri* NJ-43 (Bravo-Soriano et al., 2023). Sin embargo, el efecto de las NP-OZn sobre el nemátodo expuesto a radiación UV no se ha determinado.

El objetivo fue determinar el efecto protector de NP-OZn sobre *S. glaseri* frente a la radiación UV (235 nm) en condiciones de laboratorio. Este estudio establece las bases para una etapa futura de desarrollo de un bioinsumo formulado, con énfasis en su aplicabilidad práctica y escalabilidad.

2. METODOLOGÍA

2.1 Nemátodos entomopatógenos

S. glaseri cepa NJ-43 forma parte de la colección de agentes entomopatógenos del Laboratorio de Agrobiotecnología del Instituto Tecnológico del Valle de Etla. La etapa juvenil infectivo (JI) se produce periódicamente en larvas del último instar de la polilla de la cera *Galleria mellonella* y se almacenan a 10-12 °C en suspensión acuosa (SA) con agua destilada estéril.

2.2 Nanopartículas de óxido de Zinc

Las nanopartículas de óxido de Zinc (Sigma-Aldrich, no. 677450) tienen un tamaño de partícula < 50 nm.

2.3. Reproducción de nemátodos juveniles infectivos

Los nemátodos de la etapa JI se produjeron por crianza masiva usando larvas de *G. mellonella* en trampas White invertidas (Kaya and Stock, 1997). Los JI cosechados se enjuagaron y concentraron en SA a una razón de 1000 JI/mL con agua desionizada estéril y se almacenaron a 10-12 °C. 24 h antes de su uso, se aclimataron a 25 °C y humedad relativa de 50 %.

2.4 Exposición a radiación ultravioleta de nemátodos protegidos con NP-OZn

Las NP-OZn se suspendieron en agua desionizada estéril y se dispersaron por sonicación (AcmeSonic-Model A2L- 60 W) durante 30 min a 30 °C. Luego, se tomaron 4 mL de la suspensión de NP-OZn y se mezcló con 1 mL de la suspensión de JI con 5000 JI/mL, para obtener una suspensión de NP-OZn/NEP con una concentración final de 1000 JI/mL.

Las suspensiones preparadas con NEP y NP-OZn, se expusieron a la radiación UV de una lampara de 235 nm de longitud de onda dentro de una campana de flujo laminar (Marca Heal Force, modelo AlphaClean 1300) (Fig. 1).

El experimento de exposición a radiación UV fue un DCA con un factor asimétrico factorial de 2×3. En el que el factor UV tuvo 2 niveles (10 y 20 min) y el factor concentración de NP-OZn tuvo 3 niveles (200, 500 y 1500 ppm).

Se establecieron tratamientos de control sin exposición a radiación UV y, con y sin NP-OZn. El experimento se realizó por triplicado. Despues de 24 h, se determinó la supervivencia de los JI y la patogenicidad sobre larvas de *G. mellonella*.



Fig. 1. Exposición de JI de *S. glaseri* NJ43 a radiación UV de 235 nm.

2.5 Supervivencia de los JI

Se tomo una muestra de 0.1 mL de la suspensión NP-OZn/NEP y se colocó en un porta objetos. Los JI se examinaron a través de un microscopio estereoscópico a un aumento de 30× y se contabilizaron los individuos vivos y muertos (Fig. 2). Se tomaron tres muestras de cada réplica del tratamiento y de cada muestra se realizaron 3 repeticiones.

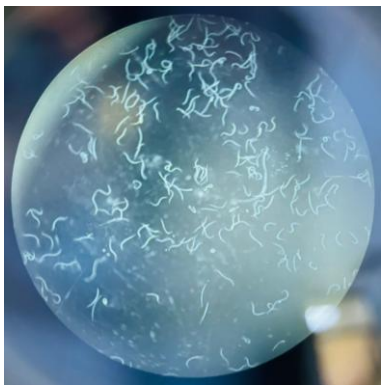


Fig. 2. JI de *S. glaseri* 24 h despues de la exposición a radiación UV.

2.6 Bioensayo de patogenicidad

En pocillos de una placa de cultivo se colocó un disco de papel filtro estéril y una larva de *G. mellonella*, se agregó una muestra de la suspensión de NP-OZn/NEP que contenía 20 JI vivos (Fig. 3). La mortalidad de las larvas se determinó 72 h después de la inoculación, tomando como signo de infección el cambio uniforme de la coloración de la larva a marrón oscuro.



Fig. 3. Enfrentamiento de JI de *S. glaseri* NJ43 expuestos a radiación UV contra larvas del último instar de *G. mellonella*.

2.7. Análisis estadístico

El análisis de varianza (ANOVA) en rangos y la prueba de Tukey ($P < 0.05$) fueron realizados para determinar la diferencia estadística en la supervivencia de los JI expuestos a radiación UV y la patogenicidad sobre *G. mellonella*. Todos los análisis se realizaron con el software SigmaPlot® 12 (Systat Software, Inc, San José, CA, USA.).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 muestra la tasa de supervivencia de los JI de *S. glaseri* en suspensión acuosa con NP-OZn, 24 h después de su exposición a radiación UV. El porcentaje de supervivencia de *S. glaseri* con tres diferentes concentraciones de NP-OZn, expuestos a luz UV va de 94.33 a 98.33 %.

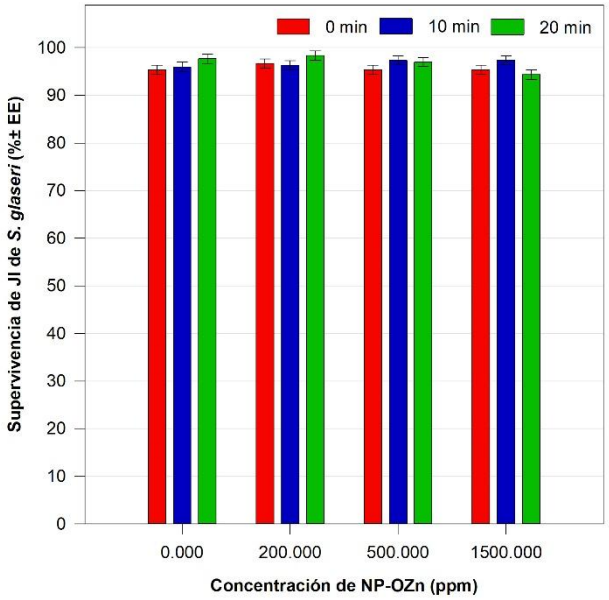


Fig. 4. Supervivencia de JI de *S. glaseri* NJ43 expuestos a radiación UV en suspensión acuosa con y sin protección con NP-OZn.

No se observa una variación significativa de la supervivencia entre los factores evaluados. En el ANOVA, se obtuvo una $P = 0.332$ para el factor concentración de NP-OZn y para el factor tiempo de exposición a la radiación UV una $P = 0.164$. Por lo tanto, la supervivencia de los JI protegidos con las diferentes concentraciones de NP-OZn y expuestos a radiación UV es semejante a la de los JI no protegidos y no expuestos a radiación UV.

La Fig. 5 presenta la variación de la mortalidad de *G. mellonella* por la inoculación con 20 JI de *S. glaseri*, los cuales fueron previamente mantenidos en suspensiones concentradas de NP-OZn y expuestos a radiación UV. La patogenicidad de *S. glaseri* fue de 3.33 a 73.33 %.

Los JI que no fueron protegidos con NP-OZn y se expusieron a radiación UV por 10 y 20 min, vieron significativamente afectadas sus aptitudes patogénicas. Sin embargo, se destaca la mejora de la patogenicidad de *S. glaseri*, siendo mayor y menos variable si se protegen a los JI con una concentración de 500 ppm de NP-OZn.

La supervivencia de *S. glaseri* es menor a la reportada para el nemátodo *S. carpocapsae* expuesto a >50 mg/L de NP-OZn (Makirita et al., 2020) y *S. carpocapsae* (Nemastar) expuesto a 2% de NP- TiO_2 (Kotliarevski et al. 2022). Solo es semejante a la supervivencia de *S. arenarium* expuesto a 20-1500 ppm de NP-Ag (Taha and Abo-Shady, 2016).

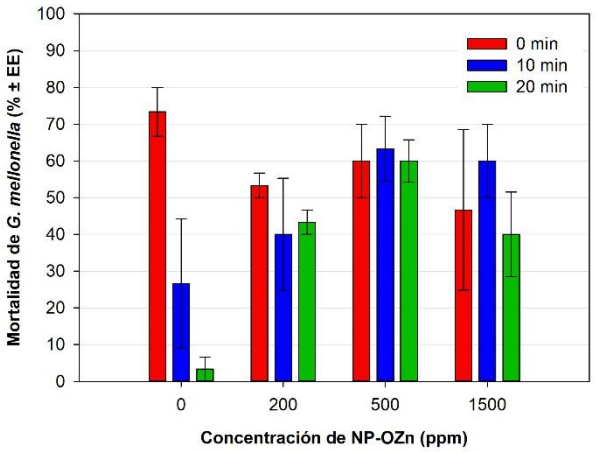


Fig. 5. Mortalidad de *G. mellonella* por el enfrentamiento con JI de *S. glaseri* NJ43 expuestos a radiación UV, previamente protegidos con NP-OZn.

La patogenicidad de *S. glaseri* (≈ 65%) protegido con NP-OZn y expuesto a radiación UV es comparable a la patogenicidad de *S. carpocapsae* (75%) evaluado en las mismas condiciones, que se reportado por (Makirita et al., 2020).

4. CONCLUSIONES

La supervivencia de los JI *S. glaseri* protegidos y expuestos a radiación UV y no protegidos y no expuestos fue mantenida por arriba de 95%. El mayor beneficio protector de las NP-OZn se observó con la concentración de 500 ppm, conservando la patogenicidad de los JI en bioensayos con *G. mellonella*, tras exposiciones por 10 y 20 min a radiación UV de 235 nm, en condiciones de laboratorio.

Los resultados demuestran que 500 ppm de NP-OZn es una concentración con potencial de uso en el diseño de un bioinsumo formulado a base del nemátodo *S. glaseri*, para el control de plagas bajo los principios de la transición agroecológica.

No obstante, considerando el método de aplicación foliar de los NEP, se debe considerar una etapa futura de evaluación experimental durante un periodo más amplio de exposición a la radiación UV, por ejemplo, de 1, 2, 4 y 6 h.

REFERENCIAS

Abd-Elsalam, K. A. (2021) Silver-based nanomaterials for sustainable applications in agroecology: A note from the editor. In: Abd-Elsalam, K. A. (ed.) Silver nanomaterials for agri-food applications. Ámsterdam: Elsevier, 1-14. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823528-7.00001-9

Bravo-Soriano, L., Cortés-Martínez, C. I., and Santiago-Martínez, G. M. (2023) Nanopartículas metálicas de óxido de Zinc como coadyuvantes para la formulación de nematodos

entomopatógenos *Steinernema*. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 10, 37. https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/article/view/83

Cortés-Martínez, C. I., and Chavarría-Hernández, N. (2020). Production of entomopathogenic nematodes in submerged monoxenic culture: A review. *Biotechnology and Bioengineering*, 117 (12), 3968-3985. https://doi.org/10.1002/bit.27515

Cruz-Martínez, H., Ruiz-Vega, J., Matadamas-Ortiz, P.T., Cortés-Martínez, C.I., and Rosas-Diaz, J. (2017). Formulation of entomopathogenic nematodes for crop pest control: a review. *Plant Protection Science*, 53, 15-24. https://doi.org/10.17221/35/2016-pps

Kaya, H. K., and Stock, S. P. (1997) Techniques in insect nematology. In: Lacey, L. A. (ed.) Manual of techniques in insect pathology. San Diego: Academic Press, 281–324. https://doi.org/10.1016/b978-012432555-5/50016-6

Kotliarevski, L., Cohen, R., Ramakrishnan, J., Wu, S., Mani, K. A., Amar-Feldbaum, R., ... and Mechrez, G. (2022) Individual coating of entomopathogenic nematodes with titania (TiO2) nanoparticles based on oil-in-water Pickering emulsion: A new formulation for biopesticides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(42), 13518-13527. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c04424.s004

Makirita, W. E., Yong, L., He, N., Mbega, E. R., Chacha, M., Li, X., and Zhang, F. (2020) Effects of nanoparticles of metal oxides on the survival of the entomopathogenic nematode: *Steinernema carpocapsae*. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20(3), 1434-1439. https://doi.org/10.1166/jnn.2020.17164

Naciones Unidas. (2015) Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015. Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. A/RES/70/1. https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf

Shapiro-Ilan, D. I., Gouge, D. H., Piggott, S. J., and Fife, J. P. (2006) Application technology and environmental considerations for use of entomopathogenic nematodes in biological control. *Biological Control*, 38 (1), 124-133. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2005.09.005

Taha, E. H., and Abo-Shady, N. M. (2016) Effect of silver nanoparticles on the mortality pathogenicity and reproductivity of entomopathogenic nematodes. *International Journal of Zoological Research*, 12 (3-4), 47-50. https://doi.org/10.3923/ijzr.2016.47.50

Vermeire, M. L., Thiour-Mauprivez, C., and De Clerck, C. (2024) Agroecological transition: towards a better understanding of the impact of ecology-based farming practices on soil microbial ecotoxicology. *FEMS Microbiology Ecology*, 100 (4), fiae031. https://doi.org/10.1093/femsec/fiae031

Real Time Monitoring and Control IoT System for an Earth Worm Breeding Bed

Ortega Castillo, Diana Alejandra*, Ponce Monarrez, Israel Ulises*

** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Avenida del Charro y Henry Dunant #450, Omega.*
(e-mail: {al237868@alumnos.uacj.mx, israel.ulises@uacj.mx).

Abstract: The aim for this research is to develop an Internet of Things (IoT)-based system for real-time monitoring and control of key climatological variables, such as temperature and humidity, in a California worm (*Eisenia Fetida*) bed. This system is designed to maintain the health of the worm colony, enhancing breeding conditions and maximizing the production of solid humus and leachate. The resulting vermicompost offers significant benefits for urban agriculture and the environment. In urban gardens, this organic compost improves soil structure, increases water retention, and provides essential nutrients, promoting vigorous plant and vegetable growth. Additionally, it helps reduce pests and disease incidence, making it ideal for home gardens. From an environmental perspective, vermicomposting enables sustainable management of organic waste, reducing the need for chemical fertilizers and minimizing pollution. The proposed IoT system will allow for efficient remote control by monitoring the worm bed conditions and adjusting variables to prevent unfavorable conditions for worm health. With the incorporation of IoT sensors and a carefully designed worm bed that includes aeration mechanisms and leachate collection, this system enables efficient remote monitoring and control. This will not only ease worm management but also ensure optimal conditions for the continuous production of high-quality vermicompost, promoting sustainability at both urban and environmental levels.

Keywords: IoT System, monitoring and control, vermicompost, earthworm.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la cría de lombriz californiana (*Eisenia Fétida*), conocida por su capacidad de convertir desechos orgánicos en vermicomposta de alta calidad, ha ganado importancia tanto en la agricultura urbana, como en la gestión de residuos sólidos urbanos. Para que las lombrices prosperen y puedan producir el abono requerido, es fundamental que el entorno en el que se encuentran permanezca bajo condiciones ambientales adecuadas, particularmente en cuanto a la temperatura y la humedad. Las lombrices son organismos muy sensibles que exigen de un monitoreo constante para evitar cambios bruscos que puedan afectar su salud y rendimiento.

Tradicionalmente, el monitoreo y mantenimiento de las condiciones de temperatura y humedad, ha sido un proceso manual que requiere de atención constante, lo cual puede resultar en un verdadero desafío cuando no es posible estar físicamente presente para realizar estas actividades. En este contexto, con los avances tecnológicos, el internet de las cosas (IoT) ha emergido como una herramienta que permite supervisar y controlar remotamente distintos procesos. Por lo que la integración de estos sistemas en la gestión de camas de cría de lombrices puede ofrecer una solución eficiente para garantizar su bienestar y mejorar la producción de humus.

El presente proyecto tiene como finalidad desarrollar un sistema basado en IoT para el monitoreo y control en tiempo real de variables climatológicas críticas, como la temperatura y la humedad, en una cama de cría de lombriz californiana. Este sistema no solo permitirá supervisar dichas variables, sino también realizar ajustes inmediatos según las necesidades del entorno de las lombrices. Con este enfoque, se busca mejorar la supervivencia de la colonia y optimizar la producción de vermicomposta, aprovechando las ventajas de la tecnología IoT para transformar la gestión tradicional en un proceso automatizado y eficiente.

Para lograr lo anterior, se diseñó e implementó una red de sensores destinada a monitorear las variables mencionadas, así como un sistema de control IoT que responde en función de los datos obtenidos. Esta red de sensores fue instalada en una cama de cría de muestra, con una superficie aproximada de 20 x 30 centímetros y una profundidad de entre 30 y 40 centímetros. Una vez que el sistema estuvo completamente montado, los datos recolectados por los sensores fueron almacenados y analizados mediante una base de datos, lo cual permitió evaluar su comportamiento en condiciones reales. Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas de funcionalidad para validar el desempeño y efectividad del sistema desarrollado.

En este contexto, la pregunta de investigación que orienta el trabajo es: ¿cómo se puede desarrollar un sistema IoT eficaz para el monitoreo y control de las variables de temperatura y humedad en una cama de cría de lombriz californiana?

1.1 Agricultura urbana y periurbana.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), para 2050 prevé que el crecimiento de la población alcanzará

aproximadamente los 9.7 billones de personas en todo el mundo, de las cuales el 70% vivirán en zonas urbanas, en condiciones mayormente de ingresos medios a bajos. Aunado a una crisis agrícola que se enfrenta actualmente por diversas causas y la creciente emergencia a causa del cambio climático, se deben de repensar las distintas formas de producir y distribuir los alimentos (FAO, Rikolto and RUAF, 2022).

La agricultura urbana y periurbana (AUP) involucra la producción de alimentos y otros productos agrícolas dentro y alrededor de las ciudades. Se incluyen diversas prácticas como la jardinería en el hogar, jardinería comunitaria, agricultura comercial y el cultivo de alimentos en instituciones (FAO, Rikolto and RUAF, 2022).

Dentro de los beneficios de la agricultura urbana se tienen una mejor producción (se producen de forma local, reduce costos de transporte y promueve practicas sostenibles); mejor nutrición (se consumen alimentos de temporada, frescos y nutritivos); medio ambiente (promueve la infraestructura verde, biodiversidad, el reciclaje de recursos contribuyendo a la mitigación del cambio climático); calidad de vida (genera empleos, apoya medios de vida, fomenta la inclusión social y la convivencia comunitaria) (FAO, 2007).

1.2 Aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos orgánicos

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), en el mundo se generan alrededor de 2000 millones de toneladas de residuos por año, donde el 50% de los mismos son orgánicos. Tan solo en América Latina se generan alrededor de 200 millones de toneladas al año, de los cuales 100 son residuos orgánicos biodegradables o que se pueden compostar, sin embargo, solo el 1% termina en uso para composta (One Planet - UNESCO, 2023).

Se prevé que, llevando a cabo distintos programas de compostaje, se pueden recuperar o mejorar hasta 6 millones de hectáreas al año para la agricultura regenerativa, orgánica y para producción de alimentos sanos (One Planet - UNESCO, 2023). Comúnmente el abono orgánico proveniente de animales o de desechos orgánicos vegetales de las cocinas, es aprovechado para la agricultura urbana. En Bangladesh la FAO desarrollo un proyecto de 2015 a 2017 en el que se instalaron jardines de techo y en las escuelas, en los que se aplicó vermicomposta desarrollada con desechos de las cocinas para mejorar la composición del suelo y enriquecerlo con nutrientes de manera natural y sin el uso de fertilizantes químicos (Román, Martínez and Pantoja, 2013).

1.3 Beneficios de la vermicomposta.

La vermicomposta es un producto que deriva del proceso por medio del cual se transforman los desechos orgánicos (biodegradación) en composta rica en nutrientes para la tierra, a través de las actividades de la vida diaria de la lombriz de tierra, que comúnmente es de la especie *Eisenia Fetida* o lombriz californiana y otros microorganismos que se encuentran en el hábitat (Qiamudin and Shafiqi, 2024).

Además de mejorar los nutrientes de la tierra, se ha demostrado que la especie *Eisenia Fétida*, es capaz de acelerar la descomposición de colillas de cigarro, no únicamente desechos orgánicos vegetales. En (Daniil et al., 2020) se destaca que las lombrices californianas pudieron mejorar la tasa de descomposición de las colillas de cigarro hasta en un 6%.

1.4 Desafíos del manejo de lombriz californiana en climas extremos.

Los climas extremos son todo un desafío para el manejo de lombrices californianas, pues a través del aumento de las temperaturas y las lluvias irregulares, se afecta su crecimiento, reproducción y supervivencia, ya sea por inundación o falta de humedad, lo que lleva a una reducción considerable de la población y por ende de su producción de humus (Kaka, Opute and Maboeta, 2021). En (Tilikj et al., 2024), se destaca que los climas extremos inducen cambios en las lombrices de tierra, lo que complica su manejo debido a sus respuestas alteradas al estrés que esto les provoca.

1.5 Sistemas de monitoreo y control de variables.

Los sistemas de monitoreo de variables son necesarios para rastrear y analizar distintos parámetros de alguna operación dada. Estos sistemas utilizan diversas tecnologías cada vez más avanzadas, para garantizar la recopilación precisa de datos, detección de fallas y análisis de desempeño, lo que mejora la eficiencia y la seguridad de las operaciones (Linder, 1968).

Los sistemas de monitoreo de hábitats se clasifican en esquemas espaciales (mapeo de campo, teledetección, etc), esquemas no espaciales y cobertura de los hábitats (Lengyel et al., 2008).

Los sistemas de control de variables se encuentran en una gran variedad de aplicaciones en diversos campos, incluidos economía, energía, térmica, gestión del tráfico, etc. Estos sistemas se caracterizan por su capacidad de adaptar y modificar condiciones iniciales de un sistema, a través de acciones de control basadas en condiciones o requisitos específicos (Arsenashvili, 2023).

En un ejemplo, podemos resaltar el ajuste que se hace a un ventilador en función de las mediciones de temperatura que se detectan a través de un sensor, donde el ventilador puede operar diferentes velocidades dependiendo de los límites de temperatura definidos (Hung and Hundt, 2020).

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en esta investigación se orienta al diseño y desarrollo de un sistema IoT para el monitoreo y control en tiempo real de variables críticas de temperatura y humedad en una cama de cría de lombrices de la especia *Eisenia Fétida*. El objetivo es mantener un entorno saludable de la colonia para la producción de vermicomposta, mejorando así el ciclo de conversión de desperdicios vegetales en abono orgánico y de alta calidad. Los pasos metodológicos incluyen

el diseño y selección de sensores, la configuración del sistema IoT, el desarrollo de software de monitoreo y la implementación de pruebas de funcionalidad, con el fin de asegurar la efectividad del sistema en condiciones reales de operación.

2.1 Diseño de la cama de lombrices.

En este caso la carcasa o cama de cría puede ser cualquier caja que contenga el hábitat. Deberá tener suficiente aireación, así como una profundidad mínima de 30 cm, preferentemente de una material aislante y resistente para evitar daños futuros. Al diseño particular de esta investigación, se pretendía agregar un par de tornillos sin fin que promovieran el movimiento del sustrato y con ello la aireación del ambiente como se muestra en la Figura 1. Sin embargo, se observó que los tornillos serían un elemento que obstaculice la manipulación de la red de sensores, por lo que se decidió removerlos.

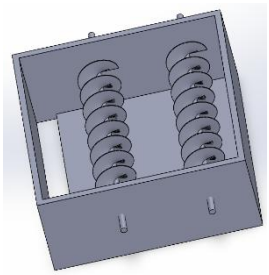


Fig. 1. Diseño original de la cama de cría.

Este diseño cuenta también con un espacio por el cual se pueden recolectar los lixiviados de la vermicomposta, que es un producto muy importante de la misma, ya que es un concentrado natural de nutrientes para las plantas.

Se pretende distribuir la red de sensores en puntos estratégicos de la cama de cría para tomar mediciones lo más homogéneas posible. A forma de prueba se conformó la red de sensores con tres sensores de humedad y tres sensores de temperatura, así como dos ventiladores y un foco térmico para aumentar la temperatura.

2.2 Diseño del sistema de detección de variables.

En la Figura 2, se muestra la selección de los sensores tanto de temperatura como de humedad que se desarrolló para decidir sobre el equipo a adquirir. Esta selección se llevó a cabo a través de la toma de decisiones multivariables utilizando el sistema Promethee (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation, por sus siglas en inglés), la cual arrojó al sensor 1 y 2 como los mejores para materializar el proyecto. Los parámetros que se utilizaron para el análisis de la toma de decisiones fueron el menor costo, el tipo de conexión (1 para alámbrica, 0 para inalámbrica), el tiempo de entrega en cantidad de semanas (2 para menos de 1 y 1 para más de 1 semana), el diseño eléctrico contando con la cantidad de hilos para la conexión (3 para 4 hilos, 2 para 3 hilos y 1 para 2 hilos), el rango de medición donde coincidió que todos tienen un amplio rango de medición. Por lo que el resultado nos da como la mejor opción el Sensor 2, y la segunda mejor opción el sensor 1, que por cuestiones de costo se optó por utilizar el sensor 1.

PROMETHEE

Criteria Type	Indirect	Direct	Direct	Direct	Direct
Weight (W_j)	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1

	CRITERIA NAMES					Rank
ALTERNATIVE NAM		COSTO	Conexión	entrega	eléctrico	medición	
	S.Temp 1	260	1	2	3	1	2
	S. Temp 2	350	1	2	3	1	1
	S. Temp 3	30000	1	2	2	1	3
	S. Temp 4	752	0	2	1	1	4
	S. Temp 5	1000	0	1	1	1	5
	MAX(Xij)	30000	1	2	3	1	
	MIN(xij)	260	0	1	1	0	

Fig. 2. Toma de decisión multicriterio sensores

En cuanto a la topología que llevarán los sensores, se optó por la conexión tipo estrella, ya que será más sencillo conectar los sensores a un Arduino para obtener los datos de temperatura y humedad requeridos.

Así mismo, se determinó que se utilizará un microcontrolador de la familia ESP32 para la obtención, análisis de datos y control del sistema. Esto por la facilidad de conectar la tablilla a un dispositivo móvil vía Wifi para los propósitos ya descritos, la funcionalidad de su procesador, su manejo de datos en tiempo real, así como la versatilidad de poder trabajar con distintas librerías de código abierto para control.

2.3 Desarrollo del Sistema de Monitoreo y Control

La programación del sistema se realizó en Arduino IDE con las librerías para ESP32, se conectaron los sensores y se tomaron lecturas y transfirieron a una base de datos. De igual manera, se conectaron los ventiladores y el foco térmico para el control de la temperatura, así como una bomba sumergible para el control de la humedad.

Cabe mencionar que se trabaja también con una aplicación móvil que sea amigable con el usuario y pueda darle la información de manera sencilla y rápida.

2.4 Estrategia de Pruebas

Habrá que considerar que esta investigación aún se cuenta en curso y no se realizarán todas las pruebas descritas a continuación. La validación del sistema se ejecuta a través de experimentos sencillos para medir los siguientes rubros:

- *Precisión de sensores*. Asegurando que las lecturas estén dentro de un margen de error aceptable, procurando que la tolerancia sea de ±0.5 a 1°C para los sensores de temperatura y entre el 5 y 10% podría rondar en los sensores de humedad.
- *Estabilidad del sistema en tiempo real*. Se ejecutará el sistema por un periodo de tiempo largo, de manera ininterrumpida para verificar frecuencia de errores, inconsistencia en la señal, así como el envío y recepción de datos.
- *Respuesta de cambios al ambiente*. Se simularán cambios bruscos de temperatura y humedad para evaluar la rapidez y precisión con el que el sistema detecta las variaciones generadas para así poder realizar los ajustes necesarios.
- *Comunicación y conectividad*. Se interrumpirá intencionalmente la conexión de red para luego ser restaurada y poder observar la reconexión tanto como que se reanude el envío de datos de manera automática.

- *Acceso y control remoto*. Se llevarán a cabo una serie de pruebas de acceso remoto desde diferentes dispositivos electrónicos con el fin de identificar si los usuarios pueden acceder y controlar el sistema sin fallas en la conexión, ni errores en la aplicación en los ajustes de los parámetros.
- *Respuesta ante situaciones extremas*. Se simulará una emergencia de sobrecalentamiento o una helada, y se observará si el sistema envía las señales de alerta, así como activar los controles predefinidos para dicha acción como activar los ventiladores o el sistema de calentamiento.
- *Manejo del usuario final*. Se realiza una prueba con potenciales usuarios finales que simulen un día de operación del sistema, de tal forma que se observe si los usuarios pueden navegar en la interfaz sin confusión, errores y con facilidad.

En consecuencia, las observaciones y datos obtenidos podrán ser evidencia suficiente para validar la funcionalidad y operación del sistema.

2.5 Análisis de Datos

Se recolectarán los datos obtenidos en bases de datos para poder ser analizados a través de alguna técnica estadística de acuerdo con cada una de las pruebas. En algunas se utilizará un Diseño de Experimentos para verificar la lectura de variables como temperatura y humedad.

En algunas otras se utilizarán muestreos aleatorios y/o estratificados, dependiendo de la naturaleza de la prueba. Finalmente, cuando los usuarios finales utilicen el sistema, se aplicarán encuestas o cuestionarios a estos con la finalidad de encontrar las oportunidades de mejora en el sistema.

Una vez obtenida la información será analizada por medio de herramientas de estadística descriptiva, así como análisis de series temporales para los cambios de temperatura y humedad, y algunos gráficos de control para monitorear la estabilidad del sistema durante periodos prolongados de tiempo en los que esté trabajando sin supervisión.

2.6 Ajuste del Sistema

Toda vez que se tiene la información y el análisis de esta, se realizará una lista de las posibles oportunidades de mejora que se presentaron y se acomodarán por orden de prioridad para realizar las modificaciones pertinentes.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Se obtuvo un sistema de monitoreo y control con tres sensores de humedad del suelo FC-28 y tres sensores de temperatura de sonda Ds18b20, conectado a una placa ESP32.

Las lecturas obtenidas de los sensores de temperatura registran cambios pequeños de hasta 0.06° como mínimo entre una lectura y otra; cumpliendo así con los parámetros esperados de las tolerancias para las lecturas de temperatura.

En el caso de los sensores de humedad, las lecturas cambian en porcentajes aún altos para la tolerancia esperada sobre dichas lecturas.

Se espera que el sistema permita el monitoreo y ajuste de las variables de temperatura y humedad en tiempo real, logrando las mejores condiciones para la cría de lombrices, mejorando la tasa de supervivencia y crecimiento de la colonia.

Al mantener las condiciones de cría ideales, el sistema debería maximizar la producción de humus sólido y lixiviado, ambos ricos en nutrientes, proporcionando así un abono orgánico libre de químicos y de alta calidad para su aplicación en la agricultura urbana.

Con el monitoreo remoto y la capacidad de ajuste automático, se espera la reducción en horas hombre para la supervisión constante, optimizando el uso de los recursos y reduciendo costos operativos en el manejo de la cama de lombrices.

El proyecto busca demostrar que la vermicompostera es una solución viable y sostenible para la gestión de los residuos orgánicos, ayudando a reducir la dependencia de fertilizantes químicos y minimizando el impacto ambiental en el contexto urbano.

Finalmente, se espera que los resultados de este sistema IoT puedan aplicarse o adaptarse a otros escenarios de agricultura urbana, promoviendo prácticas sostenibles de gestión de residuos y producción de fertilizantes naturales a pequeña escala, así como la mejora de jardines y huertos urbanos.

4. CONCLUSIONES

A pesar de estar aún en desarrollo, este proyecto de un sistema basado en IoT para el monitoreo y control en tiempo real de una cama de lombriz californiana, muestra gran potencial para transformar la práctica de la vermicomposta mediante el uso de la tecnología. La implementación de sensores para obtener variables clave como la temperatura y la humedad, y su integración en un entorno IoT, permite mejorar las condiciones de las lombrices, mejorando a su vez la producción de humus y lixiviado, que son fundamentales para la generación de fertilizantes orgánicos de alta calidad. Además de que la aplicación de este sistema puede extenderse a la agricultura urbana, contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles en gestión de residuos orgánicos y mejorando el acceso a productos agrícolas sin químicos y de alta calidad.

Desde un punto de vista ambiental, el proyecto responde a las necesidades de soluciones sostenibles contribuyendo a la reducción de fertilizantes químicos y promoviendo la gestión responsable de residuos orgánicos. El incorporar un sistema IoT permitirá una rápida intervención para prevenir riesgos asociados a las condiciones climáticas extremas que puedan afectar la salud de la colonia de lombrices.

REFERENCIAS

Arsenashvili, A. (2023). Variable Structure Optimal Control Problem for the Economic-Political Systems with Continuous Intermediate Conditions. doi: 10.55896/978-9941-8-5764-5/2023-225-234.

Daniil, I., Korobushkin, P., Garibian, L., Pelgunova, A. & Zaitsev, A. (2020). The earthworm species *Eisenia*

fetida accelerates the decomposition rate of cigarette butts on the soil surface. *Soil Biology & Biochemistry*. doi: 10.1016/J.SOILBIO.2020.108022.

FAO. (2007). Growing greener cities in Africa. First status report on urban and peri-urban horticulture in Africa. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2011). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. Roma: FAO y Mundi-Prensa.

FAO. (2012). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. Roma: FAO y Mundi-Prensa.

FAO, Rikolto and RUAF. (2022). Urban and peri-urban agriculture sourcebook – From production to food systems. Rome: FAO and Rikolto. doi: 10.4060/cb9722en.

Hung, D. K. & Hundt, R. (2020). Variable speed blower control for HVAC systems.

Iberdrola. (s.f.). ¿Qué es un huerto urbano? [online] Disponible en: Iberdrola.

Kaka, H., Opute, P. & Maboeta, M. (2021). Potential Impacts of Climate Change on the Toxicity of Pesticides towards Earthworms. *Journal of Toxicology*. doi: 10.1155/2021/8527991.

Kamalkant, Y., Chatterjee, N., Singh, S., Nayak, S. & Kumar, S. (2024). Sustainable vermicomposting: an eco-friendly approach to boost crop productivity. doi: 10.58532/v3bcag16p2ch1.

Lengyel, S., Kobler, A., Kutnar, L., Framstad, E., Henry, P. Y., Babij, V., Gruber, B., Schmeller, D. S. & Henle, K. (2008). A review and a framework for the integration of biodiversity monitoring at the habitat level. *Biodiversity and Conservation*, 17(14), pp. 3341-3356. doi: 10.1007/S10531-008-9359-7.

Linder, K. C. (1968). Variable monitoring system.

One Planet - UNESCO. (2023). Economía Circular de los residuos orgánicos para la ciudad y el campo. [online] Disponible en: One Planet.

Qiamudin, A. & Shafiqi, S. (2024). Vermicompost: Significance and Benefits for Agriculture. doi: 10.55544/jrasb.3.2.36.

Rajan, M., Tuyishime, V., Shivam, K. & Verma. (2023). Vermicomposting, a key to sustainable agriculture: A review. *Farming and Management*, 8(2), December. doi: 10.31830/2456-8724.2023.fm-128.

Ren, Y., Shen, R., He, Q., Wang, J., Chen, X., Du, W., Tan, Q., Chen, L., Qin, Y., Pu, H., Zhang, L. & Huang, C. (2019). Soil Temperature and Humidity Monitoring System Design for Farm Land Based on ZigBee Communication Technology. *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Science*. doi: 10.12783/DTEEES/ICEPE2019/28932.

Román, P., Martínez, M. P. & Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina.

Shalini, V. B., Maheswari, A. U., Marimuthu, C. & Jeshima, J. (2022). Vermi-Composting using AI in IoT. In *2022 International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC)*, pp. 1489-1493. IEEE.

Tilikj, N., de la Fuente, M., Muñiz, A. B., Martínez-Guitarte, J. L. & Novo, M. (2024). Surviving in a multistressor world: gene expression changes in earthworms exposed to heat, desiccation, and chemicals. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. doi: 10.1016/j.etap.2024.104428.

Veena, G., Sonole, S., Meghana, A. & Shetty, G. (2024). Vermicompost: An integral part in urban agriculture. *International Journal of Research in Agronomy*. doi: 10.33545/2618060x.2024.v7.i8b.1191.

Yadav, K., Chatterjee, N., Singh, S., Nayak, S. & Kumar, S. (2024). Sustainable vermicomposting: an eco-friendly approach to boost crop productivity. doi: 10.58532/v3bcag16p2ch1.

Optimization of food traceability through emerging digital technologies for food security

Pérez Gómez, Alí *, Vela Rosas, Soemi del Carmen **

** Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos, Carretera Antigua a Minatitlán KM 16.5, Reserva Territorial, 96536 Coatzacoalcos, Ver.*
(e-mail: aperezg@itesco.edu.mx, iinf21.svelar@itesco.edu.mx).

Abstract: Poor traceability in the food supply chain represents a significant risk to product safety, quality, and security, in addition to contributing to waste and the emission of pollutants. This research proposes the development and implementation of an intelligent traceability system based on QR code technologies, near field communication (NFC), and the Internet of Things (IoT), enabling real-time monitoring of food origin, transportation, and environmental conditions, including temperature and humidity. Using decision tree algorithms powered by artificial intelligence (AI), the system analyzes operational data, identifies risks, and automates decision-making through immediate alerts when critical thresholds are exceeded. The results of the pilot phase, conducted with an average monthly production of 1/8 ton, revealed a substantial improvement in product quality: the percentage of food that met quality standards increased from 20% to 40%, while returns due to excessive moisture decreased from 5% to 2%. This improvement in traceability and condition control not only optimized product quality but also strengthened the real-time management system, directly impacting operational efficiency. These advances validate the technical and operational feasibility of the proposed system, highlighting its potential to transform traditional practices toward more efficient, secure, and sustainable supply chains. The results obtained demonstrate how the implementation of this technology can improve quality, reduce waste, and ultimately transform the food industry, positioning smart traceability as a key tool for long-term sustainability and food safety.

Keywords: Traceability, Automation, Sustainability, Food safety, Artificial intelligence.

1. INTRODUCCIÓN

La trazabilidad en la cadena de suministro alimentaria es un componente esencial para garantizar la seguridad, la calidad y la inocuidad de los productos. Una gestión deficiente de esta trazabilidad puede derivar en riesgos de contaminación, pérdidas económicas y un impacto ambiental considerable, principalmente debido al desperdicio de recursos. De acuerdo con un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2022), más del 70% del desperdicio alimentario no comestible corresponde a frutas y verduras, lo cual evidencia fallos en los sistemas de control y distribución (Division et al., 2024).

En este contexto, el IoT se posiciona como una tecnología clave para optimizar las cadenas de distribución y mejorar la trazabilidad de los alimentos. La integración de dispositivos inteligentes conectados permite ampliar la vida útil de productos como frutas y verduras, lo que contribuye significativamente a la sostenibilidad del sistema alimentario. Mediante el uso sensores inteligentes, es posible localizar los productos en cada etapa de la cadena de suministro, reducir los tiempos de almacenamiento y tránsito, mejorar las prácticas de cosecha, gestionar de manera eficiente los recursos hídricos e informar a los consumidores sobre el origen, la fecha de producción (Muñiz-López et al., 2021).

Asimismo, tecnologías como los códigos QR y la NFC facilitan el acceso transparente a la información sobre los procesos de producción, almacenada de forma segura en sistemas como blockchain. Esto permite a los consumidores consultar fácilmente los datos relacionados con la cadena de suministro (Rooney, 2021).

Además, el uso de algoritmos de inteligencia artificial como *Random Forest*, una técnica de aprendizaje supervisado basada en la combinación de múltiples árboles de decisión, permite analizar grandes volúmenes de datos para generar modelos predictivos robustos (Zúñiga, 2020). Estas herramientas, en conjunto con el IoT, facilitan la toma de decisiones en tiempo real sobre aspectos logísticos clave como el almacenamiento, transporte y manipulación de alimentos.

En respuesta a estos desafíos, se propone la creación de Ecoloop, una plataforma inteligente de trazabilidad desarrollada bajo el modelo software como servicio (SaaS). Esta solución integra tecnologías emergentes para optimizar la eficiencia operativa, reducir el desperdicio alimentario y asegurar condiciones adecuadas a lo largo de toda la cadena de

suministro. El objetivo es ofrecer una herramienta digital automatizada, equitativa e inclusiva que contribuya al cumplimiento de los estándares de sostenibilidad y seguridad alimentaria.

1.1 Justificación

La limitada trazabilidad en la cadena de suministro alimentaria representa un desafío crítico que compromete la calidad, la seguridad y la inocuidad de los productos, aumentando los riesgos de contaminación, pérdidas económicas y desperdicio de alimentos. Esta situación repercute negativamente en la salud, la eficiencia operativa del sector y el medio ambiente, al desaprovechar recursos valiosos durante la producción, transporte y almacenamiento (Division et al., 2024).

Frente a este panorama, se propone Ecoloop, un sistema inteligente de trazabilidad que integra tecnologías como códigos QR, dispositivos NFC, sensores IoT e inteligencia artificial. Esta solución permite el monitoreo en tiempo real de variables críticas como lo son temperatura, humedad y ubicación, y emplea modelos de árboles de decisión para apoyar la toma de decisiones operativas, optimizando rutas, condiciones de almacenamiento y manipulación de alimentos.

Además, se incorporan técnicas de mitigación de sesgos algorítmicos para asegurar decisiones justas e inclusivas, especialmente en beneficio de pequeños productores organizados mediante iniciativas como NODESS. Esta estrategia fortalece la transparencia en la cadena de suministro, promueve el comercio justo y contribuye a una economía social y solidaria.

En conjunto, este enfoque tecnológico busca transformar la trazabilidad alimentaria hacia un modelo más eficiente, equitativo y sostenible, con beneficios tanto económicos como ambientales.

2. METODOLOGÍA

El problema central abordado es la optimización de la trazabilidad alimentaria en la cadena de suministro, buscando reducir el desperdicio, asegurar la calidad y mejorar la eficiencia logística. Se modela como un problema de optimización con múltiples variables relacionadas con el transporte, el almacenamiento y las condiciones ambientales de los alimentos.

La función objetivo es minimizar el costo logístico y las pérdidas operativas asociadas a productos que no cumplen con los estándares de calidad, como se muestra en la función de Ec. 1.

$$\min C = \sum_{i=1}^{n} (ti + hi + di) \quad (1)$$

donde:

- ti: tiempo de transporte del lote i
- hi : penalización por exceder límites de humedad o temperatura
- di: costo por devolución o pérdida de producto.

Restricciones:

- $hi \leq h_{max}$: humedad dentro del rango permitido,
- $Ti \leq T_{max}$: temperatura máxima permitida durante el trayecto,
- $\tau i \leq \tau i_{max}$: tiempo máximo de entrega,
- $si \in si_{max}$: indicador de si el lote fue entregado en condiciones óptimas.

Dado que se trata de un problema intrínsecamente complejo NP-difícil, se optó por un enfoque heurístico basado en árboles de decisión, orientado a la toma de decisiones en tiempo real sobre condiciones logísticas y de conservación.

.

2.2 Arquitectura tecnológica del sistema

El sistema propuesto, denominado Ecoloop, integra tecnologías digitales emergentes para monitorear y gestionar en tiempo real las condiciones de los productos a lo largo de toda la cadena de suministro.

2.2.1 Dispositivos de sensado y comunicación

Los sensores ambientales LoRaWAN, instalados en unidades de transporte y almacenamiento, permiten registrar variables críticas como temperatura y humedad con una alta frecuencia de muestreo. La transmisión de estos datos se realiza a través de una red LoRa hacia una pasarela conectada a la nube mediante el protocolo MQTT, lo que garantiza un bajo consumo energético y una amplia cobertura. Este esquema de conectividad y trazabilidad tecnológica se puede observar de manera ilustrativa en la Fig. 1, donde se refleja la integración de diversas herramientas digitales aplicadas a la gestión eficiente de la cadena de suministro.



Fig. 1. Ecoloop como trazabilidad mediante QR, NFC y LoRa WAN para optimizar la logística y reducir el desperdicio de alimentos.

2.2.2 Identificación y trazabilidad digital

Cada lote de producto es identificado mediante etiquetas NFC en cada envase de cada producto, los cuales permiten su seguimiento y validación en distintos puntos de control, tanto por operadores como por consumidores y código Qr para la identificación de los datos del cliente.

2.2.3 Plataforma de análisis y gestión

Ecoloop plataforma que integra una base de datos centralizada, encargada de almacenar y procesar los registros generados por los sensores y los sistemas de identificación implementados en la cadena de suministro. Cuenta con un panel de control que permite monitorear en tiempo real las condiciones de los productos y emitir alertas ante cualquier desviación, centralizando información clave para la toma de decisiones como se muestra en la Fig. 2. Además, simplifica y gestiona de forma eficiente la información relacionada con el inventario, la distribución y las condiciones de calidad de cada lote, como se muestra en la Fig. 3.

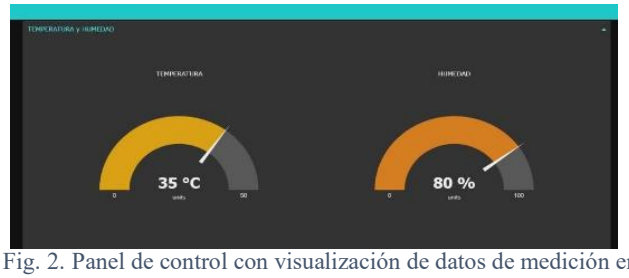


Fig. 2. Panel de control con visualización de datos de medición en tiempo real.

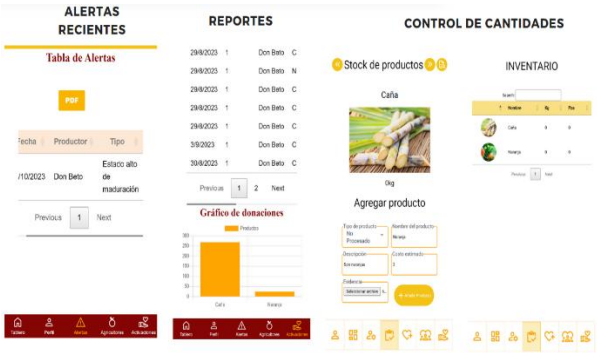


Fig. 3. Plataforma Ecoloop.

La solución fue concebida bajo un modelo de Software como Servicio (SaaS). Este enfoque permite a los usuarios acceder a la plataforma desde cualquier ubicación con conexión a internet, sin necesidad de contar con una infraestructura local compleja. Además, esta arquitectura facilita la escalabilidad según la demanda, permite un mantenimiento centralizado, actualizaciones automáticas y una integración ágil con otros sistemas mediante APIs.

Como parte del enfoque sostenible del sistema, se incorporan contenedores fabricados con fibra de trigo para el transporte de alimentos. Estos envases biodegradables permiten mantener la trazabilidad sin recurrir a materiales contaminantes, contribuyendo a la reducción del uso de plásticos de un solo uso. La Fig. 5 muestra uno de estos contenedores diseñados para integrar funcionalidad logística y compromiso ambiental.



Fig. 5. Contenedor de fibra de trigo Ecoloop para la trazabilidad de los alimentos con empaques de fibras naturales para la reducción contaminantes por las envolturas de un solo uso.

2.3 Procesamiento de datos y soporte a la toma de decisiones

Una vez recolectados, los datos provenientes de sensores IoT y registros logísticos fueron sometidos a un riguroso proceso de preprocesamiento, orientado a garantizar su calidad y representatividad. Este proceso incluyó la detección y eliminación de valores atípicos, la normalización de variables ambientales como temperatura y humedad, y el equilibrio de clases en los conjuntos de datos, a fin de mitigar posibles sesgos en la etapa de entrenamiento de modelos.

Posteriormente, se implementaron algoritmos de aprendizaje supervisado basados en árboles de decisión, siendo Random Forest el modelo seleccionado por su capacidad para manejar datos heterogéneos y generar reglas comprensibles. Estos modelos fueron entrenados para apoyar decisiones operativas clave, como la detección anticipada de lotes en riesgo, la sugerencia de rutas logísticas alternativas y la emisión de alertas ante condiciones inadecuadas de almacenamiento. Aunque no resuelven directamente la función objetivo del problema de optimización general, sí permiten una toma de decisiones adaptativa basada en datos, reduciendo el impacto de eventos críticos y mejorando la eficiencia global del sistema. La plataforma práctica de este enfoque puede observarse en la Fig. 6 y Fig.7, donde se ejemplifica el uso de árboles de decisión en la gestión de condiciones óptimas de almacenamiento.

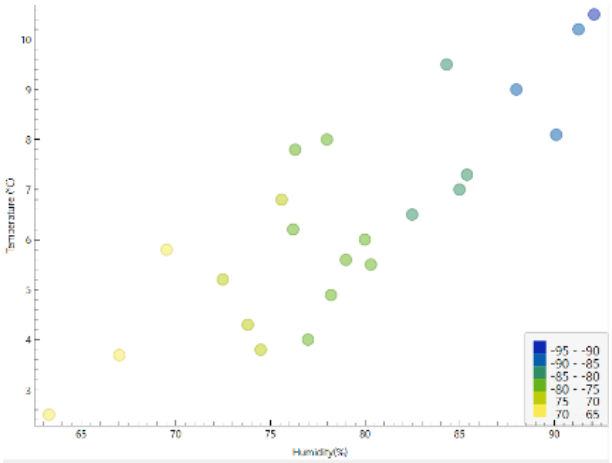


Fig. 6. Toma de decisiones mediante árbol de decisión basado garantizar condiciones óptimas de almacenamiento.

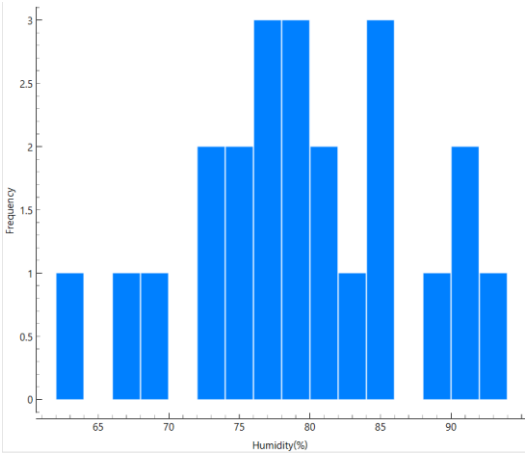


Fig. 7. Representación de las variables para la toma de decisiones.

2.4 Evaluación del sistema

Durante la fase piloto, se implementó un protocolo de evaluación con el objetivo de analizar el desempeño del sistema Ecoloop desde una perspectiva técnica, operativa y económica, utilizando métricas específicas para cada dimensión.

La eficiencia de trazabilidad se midió como la proporción de unidades correctamente identificadas respecto al total procesado Ec. 2. La estabilidad térmica durante el transporte se evaluó mediante la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima registradas Ec. 3. Para cuantificar la afectación por humedad, se calculó la tasa de devoluciones derivadas del incumplimiento de este parámetro Ec. 4. El impacto financiero se expresó como el incremento neto de ingresos mensuales tras la implementación del sistema Ec. 5. Finalmente, la capacidad de respuesta operativa se midió a través del tiempo promedio transcurrido entre la detección de una anomalía y la acción correctiva correspondiente Ec. 6.

$$\text{n} = \frac{n_t}{n} \tag{2}$$

n = Eficiencia de trazabilidad.
n_t = Número de unidades con trazabilidad completa.
n_t= Número total de unidades.

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \ (K). \tag{3}$$

ΔT = Variación de temperatura (en kelvin).
T_{max} = Temperatura máxima registrada.
T_{min} = Temperatura mínima registrada.

$$R_h = \frac{d_h}{n} \tag{4}$$

R_h = Tasa de devolución por humedad.
d_h = Número de unidades devueltas por humedad.
n = Número total de unidades.

$$\Delta I = I_{post} - I_{pre} \tag{5}$$

ΔI = Aumento de ingresos netos mensuales.

I_{post} = Ingresos después del piloto.

I_{pre} = Ingresos antes del piloto.

$$T = t_{respuesta} - t_{evento} \tag{6}$$

T = Tiempo medio de respuesta ante una alerta.

t_{evento} = Momento en que se detecta el evento crítico.

$t_{respuesta}$ = Momento en que el sistema responde.

Con base en los indicadores clave utilizados para evaluar el desempeño del sistema de trazabilidad implementado, se obtuvieron resultados significativos que reflejan su eficacia operativa.

$$\text{n} = \frac{n_t}{n} = \frac{900}{1000} = 0.9\ (90\%)$$

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} = 30 \circ C - 15 \circ C = 15 \circ C$$

$$R_h = \frac{d_h}{n} = \frac{20}{1000} = 0.2\ (2\%)$$

$$\Delta I = I_{post} - I_{pre}$$

$t_{respuesta}$ = 5 min

La eficiencia de trazabilidad alcanzó un 90%, lo que significa que 900 de cada 1000 unidades contaban con información completa. La variación de temperatura durante el proceso fue de 15 °C, un factor clave para mantener la calidad. La tasa de devolución por humedad se redujo a un 2%, reflejando una mejora significativa en el control de condiciones. Además, el tiempo medio de respuesta ante alertas críticas fue de 5 minutos, lo que permite acciones rápidas para evitar pérdidas. Estos indicadores reflejan un sistema efectivo que optimiza la trazabilidad y mejora la gestión en la cadena de suministro.

2.5 Escalabilidad y mejora continua

El diseño del sistema Ecoloop responde a un enfoque modular y escalable, lo que permite su adaptación progresiva a diversos contextos operativos y requisitos técnicos como plantas industriales, centros logísticos, empresas de transporte y distribución, cooperativas agrícolas, entre otros sectores que demandan monitoreo en tiempo real, trazabilidad y una gestión optimizada de inventarios sin necesidad de realizar modificaciones estructurales significativas.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Durante un periodo de dos meses consecutivos, se llevó a cabo una fase piloto de implementación de la plataforma Ecoloop en un entorno operativo real, con una producción promedio mensual de 1/8 de tonelada de alimentos, como parte del proceso de validación, se realizaron pruebas piloto en el

Banco de Alimentos Región Olmeca, ubicado en Coatzacoalcos, Veracruz, México, con el objetivo de evaluar la funcionalidad de la plataforma Ecoloop en un entorno operativo real. Estas pruebas permitieron ajustar los parámetros técnicos y logísticos, así como validar la efectividad del sistema de trazabilidad en la gestión de alimentos con alto contenido de humedad.

Durante el diagnóstico inicial, se observó que la producción mensual promedio alcanzaba a un 1/8 de tonelada de alimentos. Sin embargo, el análisis de calidad reveló que el 80% de esa producción no cumplía con los estándares requeridos, mientras que solo el 20% alcanzaba los niveles aceptables para su distribución óptima. A esto se sumaba un problema crítico, únicamente el 5% de los alimentos producidos eran realmente utilizables debido al exceso de humedad, lo que reflejaba una ineficiencia severa en la conservación y manejo postcosecha.

Estos datos pusieron en evidencia la necesidad de una intervención tecnológica que permitiera optimizar las condiciones de trazabilidad, mejorar el control ambiental en la cadena logística y aumentar la proporción de alimentos que pudieran cumplir con los criterios de calidad exigidos por el mercado. La implementación de una plataforma de monitoreo inteligente se proyectó como una respuesta estratégica ante estos indicadores de bajo rendimiento y alta pérdida de producto.

Esta estimación permite dimensionar el potencial impacto económico de la plataforma, al mejorar tanto la calidad del producto como la eficiencia del proceso logístico, contribuyendo directamente a la sostenibilidad y rentabilidad del sistema.

Antes de la intervención, solo el 20% de los productos cumplían con los estándares de calidad, mientras que el 80% restante presentaba condiciones no aptas para comercialización bajo dichos estándares. Además, debido al exceso de humedad, apenas el 5% de la producción resultaba utilizable.

Tras la integración del sistema de trazabilidad inteligente y la aplicación de algoritmos de árboles de decisión, se observó una mejora significativa en los indicadores clave: el porcentaje de alimentos que cumplían con los estándares de calidad se elevó del 20% al 40%, mientras que los retornos por alta humedad disminuyeron del 5% al 2%.

El uso del algoritmo Random Forest mejoró significativamente la capacidad del sistema para identificar patrones complejos en los datos operativos, permitiendo una detección más precisa y temprana de condiciones críticas que afectan la calidad de los alimentos. Esto facilitó una toma de decisiones más rápida y basada en evidencia, reduciendo los riesgos de pérdidas y mejorando la estabilidad del proceso productivo.

Además, la robustez del modelo frente a datos ruidosos y su capacidad para manejar múltiples variables simultáneamente fortalecieron la confiabilidad del sistema, generando mayor confianza en los operadores y promoviendo una gestión más eficiente y proactiva en la cadena de suministro alimentaria.

Estos resultados, obtenidos durante las pruebas piloto realizadas en un lapso de dos meses, evidencian la eficacia de la solución para optimizar la trazabilidad, reducir pérdidas y estabilizar el proceso productivo en condiciones reales. Como parte del fortalecimiento del presente enfoque, se plantean futuras estrategias de investigación orientadas a ampliar la duración de los estudios para validar la sostenibilidad de los resultados a largo plazo, así como replicar la solución en distintos entornos geográficos y operativos para evaluar su adaptabilidad. También se propone explorar la incorporación de sensores más avanzados, técnicas de inteligencia artificial de mayor precisión y métodos de analítica predictiva multivariable que permitan anticipar con mayor exactitud eventos críticos. Estas estrategias permitirán robustecer el sistema, aumentar su escalabilidad y generar evidencia empírica más amplia sobre su impacto en la cadena de suministro alimentaria.

3.1 Impacto y viabilidad

La solución propuesta demuestra un impacto tangible y una alta viabilidad técnica y operativa en el contexto de la trazabilidad alimentaria. Ecoloop, desarrollado como una plataforma inteligente bajo el modelo SaaS, integra tecnologías emergentes como el IoT, identificación digital a través de NFC y códigos QR, junto con un sistema de análisis de datos en tiempo real.

Uno de los elementos clave para su viabilidad técnica es el uso de algoritmos de aprendizaje automático basados en árboles de decisión, específicamente el modelo Random Forest. Este algoritmo fue seleccionado por su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos heterogéneos y generar reglas de decisión claras y comprensibles. A través del análisis de variables como temperatura, humedad, tiempo de exposición y condiciones logísticas, el modelo permitió anticipar situaciones de riesgo, como el deterioro por exceso de humedad o fallas en el almacenamiento, y recomendar acciones correctivas en tiempo real. Esta capacidad de generar decisiones adaptativas basadas en evidencia contribuyó significativamente a la eficiencia del sistema, mejorando la toma de decisiones operativas sin necesidad de intervenciones humanas constantes.

La plataforma fue validada en condiciones reales durante una prueba piloto en el Banco de Alimentos Región Olmeca, en Coatzacoalcos, Veracruz, México. En este entorno, se logró aumentar la proporción de alimentos que cumplían con los estándares de calidad, pasando de un 5% a más del 25%, lo que derivó en un incremento del 40% en los ingresos netos mensuales. Estos resultados reflejan la capacidad de Ecoloop para mejorar tanto la trazabilidad como la rentabilidad, reduciendo significativamente las pérdidas por deterioro y devoluciones. Además, el monitoreo continuo y la interoperabilidad del sistema con herramientas logísticas y comerciales fortalecen su capacidad de adaptación a distintos escenarios productivos.

Ecoloop no solo representa un avance tecnológico, sino una respuesta estructurada a desafíos persistentes en el sistema alimentario, como el desperdicio por falta de trazabilidad, la baja digitalización y la ausencia de mecanismos de decisión automatizados. Su impacto positivo en la eficiencia operativa, la transparencia en la cadena de suministro y la sostenibilidad ambiental lo posiciona como una solución viable y replicable para otras regiones y sectores agrícolas que enfrentan problemáticas similares.

4. CONCLUSIONES

La fase piloto del sistema de trazabilidad inteligente mostró avances relevantes en la mejora de la calidad operativa dentro de la cadena alimentaria. La proporción de productos que cumplían con los estándares de calidad aumentó del 20% al 40%, mientras que los retornos por condiciones de humedad excesiva disminuyeron del 5% al 2%, evidenciando una mayor estabilidad en los procesos de almacenamiento y transporte.

El uso de algoritmos de árboles de decisión permitió generar respuestas automáticas basadas en datos en tiempo real, lo que optimizó la toma de decisiones operativas. Asimismo, la incorporación de técnicas para mitigar sesgos en los datos contribuyó a mejorar la precisión de los modelos y asegurar predicciones más equitativas. Estos resultados confirman el impacto positivo de integrar herramientas de inteligencia artificial y tecnologías digitales en entornos logísticos de alimentos.

Dado el éxito de esta primera fase, se plantea como siguiente paso la expansión del modelo a otros centros de distribución y contextos alimentarios, explorando su aplicación en diferentes tipos de productos y condiciones ambientales. Además, el enfoque adoptado abre nuevas oportunidades de investigación en el desarrollo de modelos predictivos más robustos y adaptativos para la gestión sostenible de cadenas de suministro.

REFERENCIAS

Division, I.A.E., Forbes, H., Peacock, E., Abbot, N. & Jones, M., 2024. *Food waste index report 2024: Think eat save: tracking progress to halve global food waste*. Available at: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45230 [Accessed 2 Feb. 2025].

FAO, 2022. *La FAO y el PNUMA instan a adoptar medidas colectivas para reducir la pérdida y el desperdicio de alimentos y proteger el medio ambiente*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Available at: https://www.fao.org/newsroom/detail/FAO-UNEP-agriculture-environment-food-loss-waste-day-2022/es [Accessed 2 Feb. 2025].

Muñiz-López, H.S., Uresti-Marín, R.M. & Castañón-Rodríguez, J.F., 2021. Uso de las tecnologías de la información y la comunicación como estrategia para reducir el desperdicio de frutas y verduras. *CienciaUAT*, 16(1), pp.178–195. https://doi.org/10.29059/cienciauat.v16i1.1528

Navarro, P.E.L., 2021. México y la seguridad alimentaria: el uso de las TIC para un etiquetado digital en alimentos. *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, 1(158), p.763.

United Nations Environment Programme, 2024. *Food waste index report 2024*. Available at: https://catalogue.unccd.int/1679_FoodWaste.pdf [Accessed 2 Feb. 2025].

Muñiz-López, H. S., Uresti-Marín, R. M., & Castañón-Rodríguez, J. F. (2021). Uso de las tecnologías de la información y la comunicación como estrategia para reducir el desperdicio de frutas y verduras. *CienciaUAT*, 178-195. https://doi.org/10.29059/cienciauat.v16i1.1528

Rooney. (2021, 26 enero). *Application of NFC in the Field of Food Traceability*. Tarjeta de RFID, Tarjeta de Proximidad de Huayuan RFID, el Fabricante RFID. https://www.rfidhy.com/es/application-of-nfc-in-the-field-of-food-traceability/

Zúñiga, J. J. E. (2020). Aplicación de algoritmos Random Forest y XGBoost en una base de solicitudes de tarjetas de crédito. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, *21*(3), 1-16. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21.3.022

Distributed Ledger Technologies for the Public Sector: A Methodological Approach for Implementation.

Orihuela Hernández Vladimir *, Ortiz Hernández Javier **, Hernández Pérez María Yasmín*, González Serna Juan Gabriel******

Departamento de Ciencias de la Computación
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Cuernavaca, Morelos México
e-mail: d23ce172@cenidet.tecnm.mx, javier.oh@cenidet.tecnm.mx**, yasmin.hp@cenidet.tecnm.mx**, gabriel.gs@cenidet.tecnm.mx*****

Abstract: Distributed Ledger Technologies (DLTs), particularly blockchain technologies, are emerging as tools with the potential to significantly transform the public sector. This article explores how the strategic adoption of DLTs can restore citizens' trust in their governments through greater transparency, immutability, and decentralization of information. It examines technical elements for understanding this technology and user-centric interaction models, as well as specific points where implementing DLTs in public administration could generate substantial benefits. It highlights the lack of formal implementation methodologies and frameworks that enable effective and sustainable adoption of these technologies. It concludes with a phased methodological proposal that facilitates the integration of DLTs in the public sector to fully leverage their transformative potential.

Keywords: Distributed Ledger Technology, Blockchain, Public Sector, Government, Decentralized Identity, Self-Sovereign Identity, Methodology, Framework.

1. INTRODUCCION

En el panorama actual de la administración pública, la transformación digital emerge como un vector fundamental para la optimización de procesos, la mejora de la eficiencia y el fortalecimiento de la confianza ciudadana (OSPI 2018). En este contexto, las Tecnologías de Libro Mayor Distribuido (DLT, por sus siglas en inglés), incluyendo la ampliamente conocida cadena de bloques (blockchain), han suscitado un interés creciente debido a su potencial para revolucionar la manera en que las entidades gubernamentales gestionan la información y realizan transacciones (Antoniucci 2024)

La naturaleza intrínsecamente distribuida, inmutable y transparente de las DLT presenta oportunidades significativas para el sector público. Estas tecnologías posibilitan la creación de registros compartidos y consensuados entre múltiples partes, eliminando la necesidad de intermediarios centralizados y fortaleciendo la seguridad y la trazabilidad de los datos (Collosa 2022). Aplicaciones potenciales abarcan desde la gestión de registros civiles y la administración tributaria hasta la contratación pública y la verificación de identidades digitales (Allende 2020), ofreciendo la promesa de una mayor transparencia, una reducción de la burocracia y un incremento en la rendición de cuentas.

A nivel internacional, diversos gobiernos y organizaciones han explorado y adoptado las DLT en iniciativas piloto y proyectos concretos. El caso de Estonia, con su principio de "sólo una vez" (Once Only Principle, OOP) y el uso de plataformas de intercambio seguro de datos ejemplifica el potencial de estas tecnologías para mejorar la eficiencia administrativa (Smenzin 2022). De igual forma, iniciativas en el ámbito de la contratación pública, así como la Infraestructura Europea de Servicios Blockchain (EBSI) para la creación de servicios públicos transfronterizos (Antoniucci 2024), demuestran la creciente adopción y el reconocimiento del valor agregado de las DLT en el sector gubernamental. La iniciativa Blockchain HACKMX en México también buscaba crear una red mexicana de cadena de bloques para innovar la prestación de servicios públicos de manera descentralizada (Luna 2020).

No obstante, la implementación de las DLT en el sector público no está libre de desafíos. Cuestiones relativas a la interoperabilidad entre diferentes redes y protocolos, la escalabilidad para gestionar grandes volúmenes de transacciones, la claridad en las definiciones y los conceptos jurídicos asociados, así como la adecuación a los marcos legales y regulatorios existentes que aún requieren una atención exhaustiva (Antoniucci 2024). La falta de una regulación armonizada puede suponer un freno para la adopción generalizada de estas tecnologías (Foussard 2023). Asimismo, la evaluación de los beneficios, costos y riesgos asociados a la introducción de las DLT en el contexto específico de los servicios públicos se erige como un aspecto crítico para la toma de decisiones informada (Cagigas 2023).

Ante este panorama, la necesidad de una aproximación metodológica robusta y bien definida para la implementación de las DLT en el sector público se vuelve imperante. Si bien existe un creciente cuerpo de literatura que explora las aplicaciones y los beneficios potenciales de estas tecnologías (Collosa 2022)., se requiere una guía sistemática que considere

las particularidades del entorno gubernamental, los diferentes tipos de servicios públicos y las necesidades de los diversos actores involucrados (administración, funcionarios y ciudadanos) (Cagigas 2023).

El presente artículo pretende aportar al lector una aproximación metodológica para la implementación de las DLT en el sector público, a través de un análisis de las características de las DLT, los desafíos y oportunidades identificadas en la literatura, así como de casos de uso reales y marcos de referencia que permita a los responsables de la toma de decisiones en las administraciones públicas planificar, ejecutar y evaluar la adopción de estas tecnologías de manera efectiva y estratégica. Esta aproximación metodológica se articulará en torno a dimensiones clave como la tecnológica, la socioeconómica, la organizacional-cultural y la institucional (legal y política) (Cagigas 2023), buscando ofrecer una guía integral para la materialización del potencial transformador de las DLT en el ámbito gubernamental.

2. LAS DLT, LA CONFIANZA Y LA DESCENTRALIZACIÓN DEL SECTOR PÚBLICO.

En el ámbito del sector público, las DLT-Blockchain son conceptualizadas como un cambio de paradigma con el potencial de redefinir la confianza y la descentralización en la gestión de datos y procesos. Esta tecnología, intrínsecamente descentralizada, ofrece un modelo de seguridad sin la necesidad de intermediarios centralizados, fomentando así la confianza entre las partes involucradas.

En relación con la confianza las DLT la potencian y fomentan en las operaciones y la información dentro del sector público. La naturaleza distribuida de blockchain elimina la necesidad de intermediarios centralizados, permitiendo transacciones directas y verificables entre participantes. Esta característica es la que permite que la confianza no se deposite en una única autoridad, sino que se deriva de la propia tecnología y de la distribución de la información entre múltiples nodos.

La inmutabilidad de los registros en una DLT asegura que una vez que la información se registra y verifica, no puede ser alterada, lo que incrementa la fiabilidad de los datos para los participantes. Esta característica es crucial en el sector público, donde la integridad de los datos es fundamental. Por ejemplo, en la contratación pública, la trazabilidad y la transparencia que ofrece blockchain pueden generar mayor confianza en los procedimientos. Además, la capacidad de autenticar a los participantes en una red blockchain contribuye a la confianza en las interacciones digitales. Pauletto (2021) señala que la principal ventaja de DLT es la construcción de confianza ofreciendo una alternativa a la legalización de documentos, lo que podría reducir costos para los ciudadanos.
En cuanto a la descentralización, se hace énfasis en que las blockchain operan como un registro distribuido y descentralizado. Esta arquitectura implica que la información se mantiene y verifica a través de una red de nodos en lugar de depender de una autoridad central. En el contexto del sector público, esta descentralización puede facilitar la democratización de procesos y aumentar la transparencia al hacer los registros accesibles a múltiples partes interesadas (Collosa 2022).

3. COMPONENTES TECNOLÓGICOS DE LAS DLT

De manera general, los componentes tecnológicos de las DLT son las *bases de datos distribuidas* sincronizadas a partir de *protocolos de consenso* y que hacen uso de *algoritmos hash y criptografía asimétrica* para el registro y/o acceso a la información, lo cual nos garantiza la integridad de la información y el no repudio (Fig. 1).

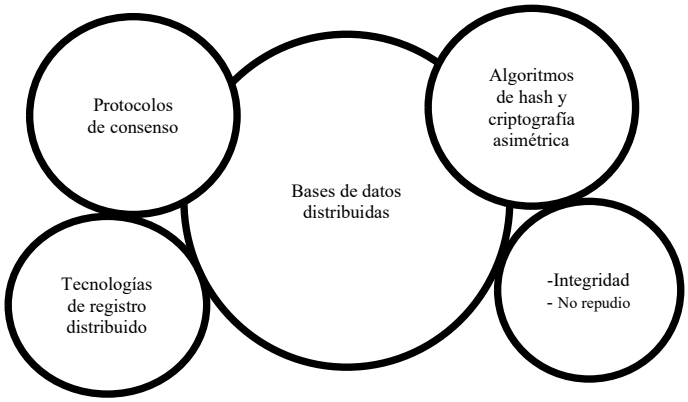


Fig. 1. Las DLT y sus componentes (Aldeco 2022)

3.1 Protocolos de consenso

El consenso en una DLT se refiere al proceso de lograr un acuerdo entre los participantes en cuanto al estado correcto de los datos en el sistema. El consenso lleva a que todos los nodos compartan exactamente los mismos datos de manera sincronizada. Un algoritmo de consenso, por lo tanto, hace dos cosas: asegura que los datos en el libro mayor sean los mismos para todos los nodos de la red y, a su vez, evita que actores malintencionados manipulen los datos, ver tabla 1.

Algoritmo	Funcionamiento
Prueba de trabajo (PoW)	Los nodos resuelven un problema matemático computacional para crear nuevos bloques. Se usa para Bitcoin
Prueba de participación (PoS)	Los nodos participan en la validación de las transacciones. Se usa en la red Ethereum 2.0
Prueba de autoridad. (PoA)	Requieren la aprobación de la mayoría de los nodos "autoridades" para que un bloque sea creado. Se usa en Hyperledger

Tabla 1. Algunos algoritmos de consenso

3.2 *Blockchain*

De los tipos de DLT que han cobrado mayor relevancia son las denominadas blockchain que son un tipo de base de datos distribuida, la cual se caracteriza por su estructura de bloques relacionados en los que se registran transacciones de manera cronológica o lineal haciendo uso para cada transacción de funciones criptográficas y criptografía asimétrica para la autentificación. (Fig. 2)

El desarrollo generado a partir de la propuesta de emisión de "una versión puramente electrónica del dinero que permitiera transferir de manera confiable valor entre entes sin una autoridad financiera de por medio" (Nakamoto 2008), abrió el espectro de aplicaciones financieras descentralizadas a partir del valor dado a una representación digital de activos, en este caso bajo el nombre de bitcoin.

Aun cuando a este desarrollo lo sucedieron muchas implementaciones de blockchain, la aparición de la red Ethereum marca un hito importante ya que su desarrollo permite la programación de contratos inteligentes abriendo con esto un amplio espectro de posibles aplicaciones (Butrerin 2015).

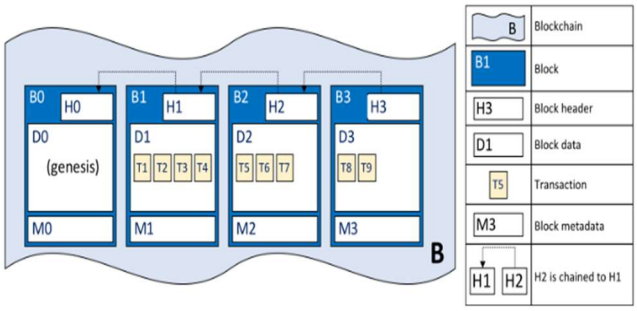


Fig. 2. DLT-blockchain. Hyperledger (2023)

3.3. *Contratos inteligentes*.

Los contratos inteligentes proporcionan el lenguaje de las transacciones que permiten modificar el estado de la DLT, pueden facilitar el intercambio y la transferencia de cualquier cosa de valor como acciones, dinero, contenido, propiedad o servicios entre partes involucradas en una transacción (Schwentker 2017).

3.4 Tipos de implementación de las DLT.

Son dos los tipos de implementación de tecnologías de libro mayor distribuido:

- Las de tipo permisionadas. Son aquellas en las que los participantes están debidamente autentificados y autorizados para participar en la red.

- Las de tipo no permisionadas. Son las que no requieren de ningún tipo de autorización para participar, es decir, cualquiera puede unirse a la red, así como escribir y leer transacciones. Bajo este esquema se desconocen los actores del sistema, lo que significa que podría haber algunos actores maliciosos.

3.5 Carteras digitales (Wallets)

Las carteras digitales son el acceso a los bienes digitales, estas pueden ser desde un dispositivo electrónico hasta una aplicación web o móvil, nos permiten interactuar, hacer transacciones o registros dentro de una DLT específica. Existe una variedad muy amplia de carteras digitales para DLT e independientemente de con cual se trabaje todas incorporan mecanismos de seguridad para su interacción mediante el uso de criptografía asimétrica, a través del uso de claves públicas y privadas entre los usuarios lo cual garantiza la seguridad y anonimato en el registro de las transacciones en la DLT según sea el caso (Rojo 2019).

4. SISTEMAS DE IDENTIDAD DIGITAL.

Los sistemas de identidad digital comparten muchas similitudes con los sistemas de identidad basados en papel, pero con sus propias características. La llegada y expansión del mundo digital hace necesario que tengamos una representación digital de nuestra identidad de manera adecuada sobre quiénes y qué somos. En ese sentido, el acceso a la información en una DLT se da a partir de carteras digitales (Figura 3)

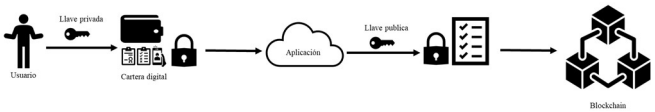


Fig. 3. Acceso a una DLT a partir de carteras digitales elaboración propia

4.1. Identidad Digital Autosoberana (SSI).

El modelo SSI tiene como marco de referencia un esquema que han denominado triángulo de confianza, a partir de Identificadores Descentralizados (W3C 2022). La figura 4 muestra los flujos técnicos clave (emisión, retención y verificación) de credenciales en el modelo SSI y cómo puede realizarse una verificación sin la necesidad de "contactar" al emisor. Sus elementos son:

- *Titular:* Entidad que recibe, conserva y administra credenciales verificables, pueden ser suyas o de otros (por ejemplo, la relación padre-hijos). Utiliza para la gestión de estas credenciales utiliza las carteras o agentes digitales.
- *Emisor:* Entidad que realiza declaraciones sobre otra entidad mediante la emisión de credenciales verificables. Firmará y empaquetará digitalmente las declaraciones en credenciales verificables y luego las emitirá a los titulares.
- *Verificador:* Entidad que recibe y verifica Credenciales Verificables de un titular, a veces en forma de Presentaciones Verificables que contienen únicamente afirmaciones necesarias para una verificación particular de una o varias Credenciales Verificables.
- *Registro de datos verificables:* Sistema que cumple la función de mediar en la creación y verificación de identificadores, claves y otros datos relevantes, como identificadores descentralizados, claves públicas de emisores, registros de revocación, etc. Estos pueden ser registros distribuidos, bases de datos centralizadas existentes y bases de datos descentralizadas.
- *Identificadores descentralizados (DID).* Identificadores únicos a nivel mundial para habilitar SSI.
- *Credenciales verificables (VC):* Credenciales criptográficamente seguras, respetuosas de la privacidad y verificables para habilitar SSI.
- *Carteras/Agentes Digitales:* Son herramientas para que los titulares posean Credenciales Verificables y se conecten/comuniquen con emisores y verificadores.

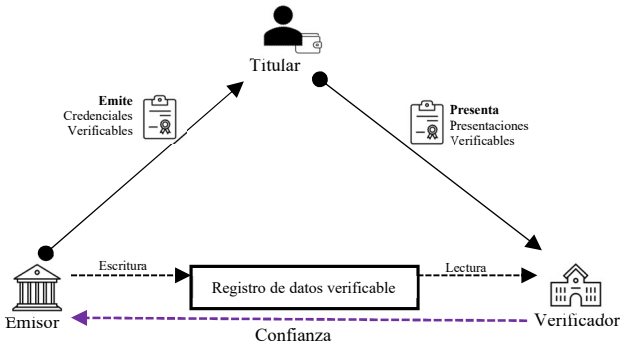


Figura 4. Triangulo de confianza SSI (Preukschat 2021)

5. MARCO METODOLÓGICO PROPUESTO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS DLT EN EL SECTOR PÚBLICO.

Si bien las DLT prometen beneficios significativos en términos de transparencia, seguridad y eficiencia, su adopción requiere una evaluación exhaustiva de múltiples dimensiones (Cagigas 2023) que influyen en su viabilidad y su impacto real. Se proponen cinco fases iterativas para abordar la implementación de las DLT en el sector público:

Fase 1: Evaluación y Diagnóstico Multidimensional:

Esta fase inicial se centra en comprender el contexto específico del sector público donde se pretende implementar la DLT. Se deben analizar detalladamente las siguientes dimensiones:

Dimensión Tecnológica:

- *Evaluación de la infraestructura existente:* Analizar la infraestructura tecnológica actual, su capacidad y su compatibilidad con las soluciones DLT.
- *Requisitos de interoperabilidad:* Identificar la necesidad de interoperabilidad con otros sistemas y plataformas existentes o futuras. La falta de estándares y regulación técnica puede dificultar la comunicación entre diferentes redes DLT.
- *Necesidades de escalabilidad***:** Evaluar el volumen de transacciones y datos que la solución DLT deberá soportar, considerando los desafíos de escalabilidad inherentes a algunas arquitecturas DLT.
- *Estándares técnicos:* Investigar la existencia y aplicabilidad de estándares técnicos y regulatorios que puedan facilitar la adopción y la interoperabilidad.

Dimensión Socioeconómica:

- *Análisis costo-beneficio:* Realizar una evaluación detallada de los costos de implementación y operación de la DLT frente a los beneficios esperados, como la reducción de la burocracia y el aumento de la eficiencia. Se debe considerar el costo inicial de la inversión en la tecnología.
- *Evaluación del valor público:* Determinar cómo la implementación de DLT contribuirá a la creación de valor público, considerando la mejora de los servicios, el aumento de la transparencia y la reducción de la corrupción.
- *Análisis de los stakeholders:* Identificar a los principales actores involucrados (ciudadanos, funcionarios públicos, empresas, etc.) y evaluar su disposición y capacidad para adoptar la nueva tecnología. La falta de conocimiento y habilidades puede generar resistencia.

Dimensión Organizacional-Cultural:

- *Análisis de las prácticas de trabajo:* Comprender los flujos de trabajo y los procesos organizacionales existentes que se verán afectados por la implementación de DLT.
- *Evaluación de la actitud de los funcionarios:* Analizar la disposición y la resistencia al cambio por parte de los funcionarios públicos, así como la necesidad de capacitación y desarrollo de nuevas habilidades. La tecnología blockchain es aún desconocida dentro de la administración.
- *Estrategias de gestión del cambio:* Definir estrategias para facilitar la adopción de la DLT a nivel organizacional, abordando aspectos de comunicación, capacitación y participación de los empleados.

Dimensión Institucional (Legal y Política):

- *Análisis del marco legal y regulatorio:* Evaluar el marco legal y regulatorio vigente a nivel nacional e internacional que pueda afectar la implementación de DLT. La falta de claridad jurídica es un reto importante (Foussard 2023).
- *Identificación de incertidumbres legales:* Determinar las posibles incertidumbres jurídicas relacionadas con la aplicación de conceptos legales tradicionales a un entorno digital descentralizado. Se requiere una profunda reflexión sobre el significado de ideas establecidas en un mundo digital descentralizado.
- *Evaluación del apoyo político:* Analizar el nivel de apoyo político para la adopción de DLT en el sector público, considerando las iniciativas y estrategias gubernamentales existentes.

Fase 2: Diseño y Planificación:

Esta fase se enfoca en el diseño de la solución DLT y la planificación de su implementación.

- *Definición de casos de uso específicos:* Seleccionar casos de uso concretos en el sector público donde la DLT pueda aportar valor significativo, como la contratación pública, la gestión de la identidad digital o el registro de activos (Allende 2020).
- *Desarrollo de la arquitectura tecnológica:* Diseñar la arquitectura de la solución DLT, incluyendo la elección del tipo de DLT (pública, privada, permisionada), el mecanismo de consenso y los protocolos de interoperabilidad. Se debe considerar la posibilidad de utilizar redes permisionadas para mayor control y cumplimiento normativo.
- *Definición del modelo de gobernanza:* Establecer las reglas y los mecanismos de gobernanza para la red DLT,

incluyendo la gestión de nodos, la validación de transacciones y la resolución de disputas (Erbguth 2018).
- *Estrategias de gestión de datos:* Definir cómo se gestionarán los datos en la DLT, abordando aspectos de privacidad, seguridad y acceso. Es crucial garantizar altos estándares de seguridad en la protección de la privacidad de los usuarios.
- *Planificación de la implementación:* Elaborar un plan detallado de la implementación, incluyendo los recursos necesarios, los cronogramas y los indicadores de rendimiento (KPIs).

Fase 3: Implementación y Desarrollo Piloto

Esta fase implica la puesta en marcha de proyectos piloto para probar la viabilidad y el impacto de la solución DLT en un entorno controlado.

- *Desarrollo del prototipo:* Construir un prototipo funcional de la solución DLT para el caso de uso seleccionado.
- *Implementación de piloto:* Desplegar el prototipo en un entorno real o simulado, involucrando a los stakeholders relevantes.
- *Recolección de datos:* Recopilar datos relevantes para evaluar el desempeño del piloto en las dimensiones tecnológica, socioeconómica, organizacional-cultural e institucional.

Fase 4: Evaluación Multidimensional

Esta fase consiste en analizar los resultados del proyecto piloto utilizando el marco de evaluación definido en la Fase 1 y los KPIs establecidos en la Fase 2.

- *Análisis de los resultados tecnológicos:* Evaluar el rendimiento de la DLT en términos de escalabilidad, interoperabilidad, seguridad y eficiencia.
- *Análisis del impacto socioeconómico:* Medir el valor público generado, los costos incurridos y la aceptación por parte de los stakeholders.
- *Análisis de los cambios organizacionales y culturales:* Evaluar el impacto en las prácticas de trabajo, la actitud de los funcionarios y la efectividad de las estrategias de gestión del cambio.
- *Análisis del cumplimiento normativo:* Verificar el cumplimiento del marco legal y regulatorio vigente e identificar posibles obstáculos legales.

Fase 5: Escalabilidad y Adopción:

Con base en los resultados de la evaluación, esta fase se centra en la escalabilidad de la solución DLT y su adopción a mayor escala en el sector público.

- *Refinamiento de la solución:* Ajustar la arquitectura, el modelo de gobernanza y las estrategias de gestión de datos con base en las lecciones aprendidas del piloto.
- *Desarrollo de estrategias de escalabilidad:* Definir planes para extender la implementación de la DLT a otros casos de uso y a diferentes niveles de la administración pública.
- *Promoción de la adopción:* Implementar programas de capacitación y sensibilización para fomentar la adopción de la DLT por parte de funcionarios y ciudadanos.
- *Colaboración y estandarización:* Fomentar la colaboración entre diferentes entidades públicas y privadas para promover la interoperabilidad y el desarrollo de estándares.
- *Adaptación del marco legal y regulatorio:* Trabajar en la adaptación del marco legal y regulatorio para facilitar la adopción a gran escala de las DLT en el sector público.

Consideraciones Transversales

A lo largo de las fases de esta metodología, es crucial considerar los siguientes aspectos transversales:

- *Interoperabilidad y Estándares:* La necesidad de garantizar la interoperabilidad entre diferentes plataformas DLT y sistemas existentes es fundamental para evitar la creación de silos de información. El desarrollo y la adopción de estándares técnicos y de datos son esenciales.
- *Marco Legal y Regulatorio:* Un marco legal claro y adaptable es un requisito indispensable para la adopción generalizada de DLT en el sector público. Se deben abordar las incertidumbres legales y garantizar el cumplimiento de normativas como la protección de datos.
- *Gestión del Cambio y Cultura Organizacional:* La resistencia al cambio y la falta de comprensión de la tecnología pueden ser barreras significativas. Las estrategias de gestión del cambio, la capacitación y la comunicación son esenciales para una adopción exitosa.
- *Participación Ciudadana y Valor Público:* La implementación de DLT debe orientarse a la creación de valor público y a la mejora de la relación entre el gobierno y los ciudadanos. La participación de los ciudadanos en el diseño y la evaluación de las soluciones DLT puede aumentar la confianza y la aceptación.
- *Seguridad y Protección de Datos:* Garantizar la seguridad de la información y la protección de los datos personales es primordial en cualquier implementación de DLT en el sector público. Se deben implementar medidas robustas para prevenir accesos no autorizados y garantizar la confidencialidad e integridad de los datos.

6. IMPLEMENTACIÓN EN EL SECTOR PÚBLICO Y TRABAJO FUTURO

Derivado de esta propuesta de marco metodológico para la implementación de las DLT en el sector público y para evaluar con base a las fases reportadas, se ha llevado la propuesta a la Agencia de Transformación Digital del Gobierno del Estado de Morelos, quienes fungen como unidad de firma electrónica de la Administración Pública Estatal con el fin de implementar un caso de uso piloto (RIJOGEM 2024).

Se propone a la Agencia de Transformación Digital la elaboración de un proyecto de inversión para abordar la metodología propuesta, en particular para las fases dos y tres donde la definición de la arquitectura tecnológica y los casos

de uso especifico, requieren de recursos tanto humanos como tecnológicos y de infraestructura.

Para la implementación de la capa de registro distribuido se propone el marco de desarrollo Hyperledger debido a lo robusto de esta DLT de tipo permisionada (Androulaki 2018). Para el mecanismo de interacción del usuario con la DLT se propone implementar el modelo de identidad descentralizada o identidad auto soberana (SSI), poniendo la identidad del usuario en el centro (Preukschat 2021). A partir de estos dos elementos es posible tener casos de uso pensados en la interacción del usuario basada en la confianza bajo el modelo de la figura 5.

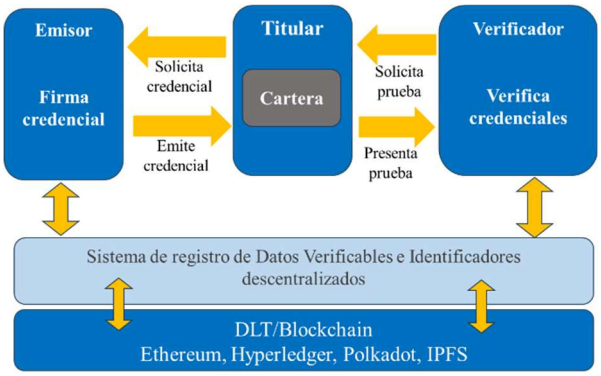


Figura 5. Modelo de Identidad Auto soberana usando DLT

6. CONCLUSIONES

La implementación de DLT en el sector público representa una oportunidad importante para mejorar la eficiencia, la transparencia y la confianza en las instituciones gubernamentales. Sin embargo, su adopción exitosa requiere una metodología estructurada y multidimensional que considere los aspectos tecnológicos, socioeconómicos, organizacionales-culturales e institucionales.

Aun cuando no se identifica una metodología universalmente estandarizada específicamente para el diseño e implementación de libros mayores distribuidos (DLT) en el sector público, se han desarrollado marcos, guías y enfoques metodológicos que pueden adaptarse para la implementación de este tipo de proyectos.

El modelo de identidad digital descentralizada de las personas o de identidad auto soberana con el uso de blockchain como mecanismo de validación de la información presentada a partir de credenciales verificables e identificadores descentralizados, son un elemento de innovación para una interacción transparente y segura en la esfera del sector público

REFERENCIAS

Aldeco (2022), https://youtu.be/bW3Ondc8bQM?si=D9HlNZ-0VrxnMc5p&t=2054

Antoniucci (2024), Blockchain y la seguridad de la información en América y Europa. https://revistas.fcu.edu.uy/index.php/informaticayderecho/article/view/4740/4161

Schwentker (2017), ¿What is blockchain technology? [hyperledger], Hyperledger, EU de https://bit.ly/3v4V5jG

Alex Preukschat, Drummond Reed. (2021) Self-Sovereign Identity. Ed. Manning. ISBN 9781617296598 páginas 7, 8, 2

Allende López (2020), Identidad digital autogestionada: El futuro de la identidad digital: Autogestión, billeteras digitales y blockchain. https://publications.iadb.org/es/identidad-digital-auto-gestionada-el-futuro-de-la-identidad-digital-auto-gestion-billeteras

Androulaki (2018). Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains. https://arxiv.org/pdf/1801.10228

Butrerin Vutelin (2015), https://ethereum.org/es/whitepaper/

Cagigas, D. (2023), Blockchain in government: toward an evaluation framework. https://doi.org/10.1080/25741292.2023.2230702

Collosa (2022), Casos de uso de la tecnología Blockchain para mejorar el sector público. https://observatorioblockchain.com/blockchain/casos-de-uso-de-la-tecnologia-blockchain-para-mejorar-el-sector-publico/

Erbguth, (2018), Towards Governance and Dispute Resolution for DLT and Smart Contracts, https://ieeexplore.ieee.org/document/8663721

Foussard, R. (2023). Blockchain y lo contratos del Sector Publico. https://repositorio.comillas.edu/rest/bitstreams/620395/retriev

Gonzalez Luna. (2020), La tecnología blockchain y su impacto en el sector público en México. Análisis del caso Blockchain HACKMX. https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000800753/3/0800753.pdf#page=2.15

Hyperledger(2023), LedgerDocs. Disponible en: https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.5/ledger/ledger.html#blockchain (consultado 20 de abril 2025)

Nakamoto Satoshi (2008).Bitcoin: Un Sistema de Efectivo Electrónico Usuario-a-Usuario, https://bitcoin.org/files/bitcoin-paper/bitcoin_es_latam.pdf

OSPI (2018), Aplicaciones de Blockchain en el Sector Público. https://www.ospi.es/export/sites/ospi/documents/informes/IECISA_Informe_Blockchain-version-final-online.pdf

Pauletto Christian (2021), Blockchain in international e-government processes: Opportunities for recognition of foreign qualifications. https://doi.org/10.1016/j.resglo.2020.100034

RIJOGEM (2024). Reglamento interior de la jefatura de la oficina de la gubernatura del Estado de Morelos. (2024), http://marcojuridico.morelos.gob.mx/archivos/reglamentos_estatales/pdf/REGINTGUBERNATURA.pdf

Rojo, M. I. (2019). Blockchain: fundamentos de la cadena de bloques. Ediciones de la U. https://elibro.net/es/lc/itzacatepec/titulos/127086

Smenzin Silvia. (2022). Blockchain-based application at a governmental level: disruption or illusion? The case of Estonia. https://doi.org/10.1093/polsoc/puac014

W3C Consortium.(2022). https://chapters.w3.org/hispano/2022/07/identificadores-descentralizados-ya-son-recomendacion-w3c

Development of a Web-Based Information System for Strategic Decision-Making in Integrative Centers

Priego Clemente, Antonio[1], Hernandez Arias, Clemente[2], Diaz Villanueva, Felix[3], Arias Peregrino, Victor Manuel[4], Romellon Cerino, Mario José[5]

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Villahermosa. Departamento de Sistemas y Computación. Villahermosa - Frontera Km. 3.5 Ciudad Industrial Villahermosa, Tabasco México, (e-mail: antonio.pc@villahermosa.tecnm.mx[1], clemente.hernandeza@villahermosa.tecnm.mx[2], felix.dv@villahermosa.tecnm.mx[3], victor.ap@villahermosa.tecnm.mx[4], mario.rc@villahermosa.tecnm.mx[5])

Abstract: The project focuses on the development and implementation of a web-based information system aimed at improving strategic decision-making within the Integrative Centers of Tabasco, Mexico. Its main objective is to provide reliable, up-to-date, and accessible data on key community aspects such as potable water services, transportation, medical assistance, and education. The system is designed to streamline the consultation and management of this data, enhancing the efficiency of public administration and resource allocation. To achieve this, the system was built using modern web technologies including PHP and the Yii2 framework, with PostgreSQL as the database engine and Bootstrap for responsive user interface design. The development followed a modular approach that includes user interface creation, consultation modules, and an information collection form based on CRUD operations. The interface was structured to allow multi-level navigation through state, municipal, and integrative center data, facilitating quick access to both official statistical data and locally gathered information. As part of the system's functionality, dynamic data visualizations and infographics were implemented to support decision-making processes. Results obtained so far indicate a significant improvement in information accessibility and user interaction, as well as an increased capacity for data analysis at various administrative levels. The platform allows decision-makers to identify regional trends and needs with greater precision, enabling timely and evidence-based responses to community demands. Furthermore, the project promotes transparency, collaboration, and technological innovation in public service delivery. The success of this initiative sets a precedent for future digital tools aimed at improving governance and social development in similar contexts.

***Keywords*:** Information system, Web application, Integrative centers, Strategic planning, Data visualization.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la disponibilidad de información fiable, accesible y organizada en tiempo real constituye uno de los pilares fundamentales para la gestión eficiente de los asuntos públicos. Sin embargo, en contextos institucionales como el del estado de Tabasco, la carencia de herramientas tecnológicas integradas ha representado una limitante crítica en la capacidad de los responsables de políticas públicas para diagnosticar con precisión los problemas sociales, priorizar acciones y asignar recursos estratégicamente. Esta ausencia de soluciones digitales ha dificultado la toma de decisiones informadas, sobre todo en escenarios marcados por vulnerabilidad, marginación o rezago social.

La recopilación, análisis y visualización de datos clave para la formulación e implementación de políticas públicas representa, en este contexto, uno de los principales desafíos para la Coordinación General de Centros Integradores en Tabasco. Es por ello que, se ha definido como asunto prioritario la necesidad de contar con un resumen conjunto de información y una plataforma tecnológica centralizada. Esta plataforma debe facilitar el acceso unificado a datos críticos sobre condiciones básicas de infraestructura urbana, servicios de salud, educación, movilidad y programas sociales. La inexistencia de tal sistema restringe severamente la capacidad de los tomadores de decisiones para identificar zonas prioritarias y diseñar intervenciones adecuadas (INEGI, s.f.; Universal, 2023).

En este sentido, el presente estudio se enmarca en el ámbito de los sistemas de información aplicados al sector público y al desarrollo territorial. Desde el enfoque teórico, se fundamenta en el reconocimiento de que las tecnologías de la información constituyen una herramienta esencial para promover la transparencia institucional y el progreso social (Proyecto SCITab, 2022).

Con base en esta visión, se diseñó y desarrolló el sistema web SCITab (Sistema de Consulta de Información de los Centros Integradores de Tabasco), empleando tecnologías modernas como PHP, el framework Yii2, PostgreSQL para la gestión de bases de datos y Bootstrap para una interfaz gráfica responsiva. El objetivo central es integrar datos oficiales y locales en una herramienta analítica intuitiva que permita generar visualizaciones geoespaciales interactivas (Qiang & Proyecto Yii, 2023; Grupo de Desarrollo Global PostgreSQL, 2024; Equipo Bootstrap, 2024).

Actualmente, SCITab ofrece una interfaz funcional que permite navegar a través de distintos niveles administrativos —estatal, municipal, centro integrador (IC) y localidad—, mediante formularios de recolección de datos y vistas dinámicas. Su implementación ha evidenciado un papel operativo, adaptativo y con alto potencial para influir positivamente en la toma de decisiones gubernamentales en diversos contextos sociales y geográficos.

1.1 Centros Integradores

Los Centros Integradores en México han sido diseñados como puntos centrales para coordinar servicios públicos y brindar atención directa a comunidades rurales, indígenas o altamente marginadas. Una estrategia histórica del gobierno mexicano para descentralizar la provisión de servicios y fortalecer el vínculo estado-ciudadanos (Lifeder 2022; Proyecto SCITab 2022), esta iniciativa.

En Tabasco, los Centros Integradores son esenciales para el acceso a servicios básicos en localidades apartadas, por lo que tener el estado de estos centros actualizado y preciso ha sido una prioridad para la administración pública eficiente. Pero hasta hace poco, recopilar esta información requería procesos manuales o herramientas no centralizadas, lo que dificultaba realizar un análisis integral de sí. Esta complejidad resaltó la necesidad de una solución tecnológica de primera clase que fuera capaz de automatizar, integrar y visualizar estos datos de manera perspicaz y funcional.

1.2 ¿Por qué el Acceso a la Información es Importante para la Planeación de Interés Público?

Para que la planeación pública sea efectiva, los datos deben estar organizados, ser confiables y estar al día, y deben brindar una imagen clara de las condiciones de la población. Basadas en información precisa, se pueden diseñar políticas basadas en evidencia, distribuir recursos equitativamente y evaluar el impacto de los programas públicos (INEGI, 2018).

Sin embargo, en este artículo del 2023 publicado en la revista "Universal" (disponible en https://www.universaljournal.org/article/10.5329/uni.2022.2250), mencionan que dentro de las instituciones gubernamentales uno de los mayores problemas derivados de esa fragmentación de la información es el mismo hecho de que se evita tener una imagen completa para abordar el problema y no será posible encontrar una solución. Esto es aún más preocupante en el contexto de los Centros Integradores, que necesitan información en tiempo real sobre infraestructura, servicios, programas sociales y contexto socioeconómico. Debido a que no existe un sistema digital para recopilar esta información, la visibilidad alrededor del monitoreo del impacto y la detección de tendencias se reduce (Proyecto SCITab, 2022).

En este sentido, los sistemas de información web como SCITab podrían surgir como una forma potencialmente inventiva de abordar estas limitaciones. Estas herramientas permiten la consulta en tiempo real de información estructurada de diversos niveles administrativos, aumentan la eficiencia operativa institucional, consolidan la transparencia y promueven la gestión basada en datos.

El desarrollo de tecnologías de integración y visualización de datos es, por tanto, un momento decisivo en la promoción de una visión de planificación pública contemporánea, integrada y equitativa basada en el bienestar social.

2. METODOLOGÍA

El sistema de consulta SCITab se desarrolla mediante un enfoque metodológico establecido por la ingeniería de software para desarrollar basado en el modelo incremental y adaptativo. Este enfoque se aplicó con éxito en desarrollos incrementales y verificaciones funcionales de cada subsistema, asegurando la garantía de calidad durante el desarrollo del software y una incorporación gradual de funcionalidades.

La investigación vincula una necesidad informativa específica de la Coordinación General de los Centros Integradores del estado de Tabasco, para diseñar una solución tecnológica que integre la información de diferentes fuentes (oficiales y locales) en una plataforma accesible, estructurada y dinámica. Esta herramienta tiene como objetivo mejorar la toma de decisiones públicas, permitiendo la consulta interactiva de datos relevantes de varios niveles territoriales (Proyecto SCITab, 2022).

La fase de recopilación de información se centró en dos formas de obtener datos: una fue acercarse a los datos oficiales obtenidos por el Sistema de Consulta de Información Censal (SCINCE) del INEGI (INEGI, s.f.), y la segunda fue recopilando datos directamente en el campo con la ayuda de la Coordinación General y las autoridades municipales y delegacionales. La selección incluyó ciertos municipios y centros integradores en el sistema debido a algunos criterios, como la disponibilidad de datos, la relevancia de la operación y la importancia a nivel geográfico.

La recolección de datos en campo representó un proceso logístico complejo, dado que implicó la coordinación con autoridades municipales, delegaciones locales y personal técnico de la Coordinación General de Centros Integradores. Se utilizaron formatos estructurados de captura, alineados a los criterios establecidos por el sistema SCINCE, y se aplicaron

entrevistas dirigidas y recorridos físicos por zonas seleccionadas. Entre los principales desafíos enfrentados estuvieron la dispersión geográfica de las localidades, la conectividad limitada en zonas rurales y la necesidad de capacitación rápida al personal operativo para el uso correcto de dispositivos móviles y plataformas digitales durante el levantamiento. La calidad de los datos fue verificada mediante validación cruzada con registros oficiales disponibles y retroalimentación continua por parte de los actores locales.

Para materializar esta propuesta metodológica, fue necesario definir una arquitectura tecnológica robusta y seleccionar cuidadosamente las herramientas de desarrollo que garantizaran la funcionalidad, escalabilidad y accesibilidad del sistema. A continuación, se describe la estructura técnica que sustenta al SCITab y los recursos utilizados en su implementación.

2.1 Arquitectura del Sistema y Herramientas Utilizadas

Para lograrlo, la arquitectura de SCITab se desarrolló de acuerdo con el patrón de desarrollo Model-View-Controller (MVC), que es ampliamente conocido por su capacidad para separar las preocupaciones de las aplicaciones web. Esta estructura permite una mejor organización del código fuente, facilitando su mantenimiento, mejora de funcionalidad y componentes reutilizables (Qiang & Proyecto Yii, 2023).

El sistema está escrito utilizando el lenguaje PHP y el Framework Yii2, ya que es el marco más estable, flexible y potente para gestionar bases de datos de alto nivel. PostgreSQL fue seleccionado para la gestión de bases de datos por su rendimiento, escalabilidad y soporte nativo para consultas geoestadísticas (PostgreSQL Global Development Group, 2024). En términos de interfaz de usuario, se utilizaron HTML5, CSS3 y Bootstrap, los cuales aseguran un diseño responsivo, haciéndolo accesible desde múltiples dispositivos. Además, JavaScript, jQuery y el plugin DataTables también fueron integrados, siendo estas últimas herramientas las que permitieron la creación de una experiencia interactiva para la consulta y visualización dinámica de datos (Equipo Bootstrap, 2024; Fundación jQuery, 2023; DataTables, 2024).

```php
class SiteController extends Controller
{
    public function actionIndex()
    {
        return $this->render(
            'index'
        );
    }
}
```

Figura 1: Controlador de Site

```php
<head>
  <link rel="stylesheet" href="<?= Yii::$app->request->baseUrl ?>/css/sidebar.css">
</head>

<div class="card card-nav">
  <div class="card-head p-2 px-3">
    <h6><b>Centros integradores</b></h6>
  </div>
  <!-- ... -->
  <div class="card-body">
    <ul class="nav-list">
      <?php if (empty($dataRCentroIntegrador)) : ?>
        <p>No hay centros integradores disponibles.</p>
      <?php else :
        // var_dump($dataRCentroIntegrador);
        //die();
      ?>

        <ul class="nav-list">
          <?php foreach ($dataRCentroIntegrador as $centro) : ?>
            <li>
              <a href="<?= Url::to(['/centro-integrador/index']); ?>?clvcii=<?php echo htmlentities($centro['clave_cii']) ?>&mun=<?php echo $id ?>">
                <?php echo htmlentities($centro['nombre_cii']) ?>
              </a>
            </li>

          <?php endforeach; ?>
        </ul>
      <?php endif; ?>
    </ul>
  </div>
  <!-- ... -->
</div>
```

Figura 2: Funcionamiento de sidebar_municipio.php

Sin embargo, este conjunto tecnológico no solo fue ágil de manera ponderada capaz de ejecutar el sistema en modo simulado, sino que también fue compatible entre plataformas y permitió una representación gráfica. La arquitectura permite a los usuarios institucionales visitar datos de diferentes compartimentos de la administración—estado, municipalidad, centro integrador y localidad—sin perder rendimiento o complejidad de navegación.

2.2 Desarrollo y Proceso de Implementación Modular

La implementación del sistema se puede dividir principalmente en tres módulos fundamentales, a saber, la interfaz de usuario, los módulos de consulta y el módulo de recopilación de información. La naturaleza modular de la arquitectura permitió un proceso de desarrollo controlado y dinámico, donde cada componente fue validado independientemente antes de ser incluido en el sistema general.

En el primer paso, se diseñó una navegación jerárquica para que el usuario pueda navegar por la información a lo largo de las rutas lógicas desde el nivel estatal al nivel local. Después de esto, se añadieron tarjetas con información, barras de menú lateral expandibles y paneles de navegación para mejorar la comprensión de los datos y la experiencia del usuario.

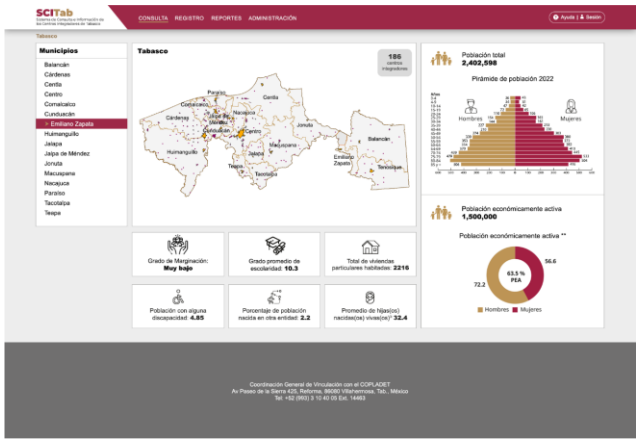


Figura 3: Diseño de la interfaz

Realizamos pruebas funcionales e integrales de cada módulo para su operación. Se estableció una conexión directa a través de los modelos en los modelos de Yii2, por lo que hasta ahora se realizó una búsqueda general sobre los datos censales y la información recopilada en el campo a través del módulo de consulta conectado directamente a la base de datos. Por otro lado, en el módulo de recopilación de información se integró el módulo CRUD (Crear, Leer, Actualizar y Borrar), permitiendo la gestión completa del ciclo de vida de los registros con validaciones automáticas, ediciones de contenido y pruebas de integridad (DataTables, 2024).

Este enfoque modular también permitió al equipo de desarrollo tener un control más exacto de la evolución del sistema e integrar mejoras con mejor eficiencia, así como reaccionar a las observaciones generadas por los usuarios durante las pruebas de validación. Por lo tanto, SCITab se refuerza como una herramienta robusta, adaptable y centrada en el gobierno, que se enfoca en las necesidades de los tomadores de decisiones en contextos administrativos complejos.



Figura 4: Presentación del contenido a nivel localidad

Respecto a la validación del sistema, actualmente se está llevando a cabo un proceso de pruebas con usuarios finales, particularmente personal técnico de nivel municipal y estatal involucrado en la gestión de los Centros Integradores. El enfoque de validación incluye pruebas funcionales, encuestas de usabilidad basadas en el estándar SUS (System Usability Scale), así como entrevistas semiestructuradas orientadas a evaluar la facilidad de navegación, la utilidad de los módulos, y la capacidad para generar visualizaciones e interpretaciones relevantes. Entre los criterios clave de éxito se encuentran: la reducción en el tiempo de acceso a la información crítica, la satisfacción del usuario con la interfaz, y la precisión en la integración de fuentes de datos. Los resultados preliminares de estas validaciones han sido positivos, aunque se identificaron áreas de mejora que ya están siendo consideradas para futuras iteraciones del sistema.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

El sistema SCITab cambia la forma en que se organiza, consulta y visualiza la información relacionada con los Centros Integradores del estado de Tabasco. Fue muy impresionante cómo los analistas crearon una interfaz de usuario limpia y fluida que es jerárquica desde el estado hasta la localidad. Esta disposición permite a los usuarios institucionales recopilar rápidamente información esencial, como la disponibilidad de servicios básicos, las condiciones de la infraestructura y la cobertura de programas sociales.

Un ejemplo concreto del impacto de SCITab en la toma de decisiones ocurrió durante la planeación del programa de rehabilitación de caminos rurales en el municipio de Tacotalpa. Al integrar los datos locales obtenidos en campo con las estadísticas oficiales sobre acceso vial, el sistema permitió identificar zonas con mayores rezagos en conectividad. Esta información fue utilizada para priorizar rutas en función de la densidad poblacional, conectividad entre localidades y nivel de marginación. De forma similar, en el municipio de Jalpa de Méndez, los datos visualizados sobre servicios de salud permitieron reubicar una brigada médica temporal a una zona con menor cobertura reportada, lo que resultó en un aumento del 40% en consultas atendidas durante el trimestre posterior.

El proyecto tuvo un resultado significativo en la integración de dos fuentes de datos clave: los datos del censo oficial proporcionados por el INEGI y los datos locales recopilados por la Coordinación General de Centros Integradores con las autoridades municipales. Esta integración en una única plataforma tecnológica ha permitido realizar análisis comparativos, así como validación y enriquecimiento de información mediante la intersección de datos oficiales y territoriales.

En cuanto a la consulta de datos, los módulos que contienen tablas dinámicas se construyeron a través de la biblioteca DataTables, lo que mejoró significativamente la experiencia del usuario, ya que podían filtrar, ordenar columnas y realizar búsquedas específicas entre grandes cantidades de datos. Esta capacidad es una mejora significativa respecto a los enfoques convencionales, donde la gestión ascendente y descendente se realiza a través de diversos documentos o formatos fijos.

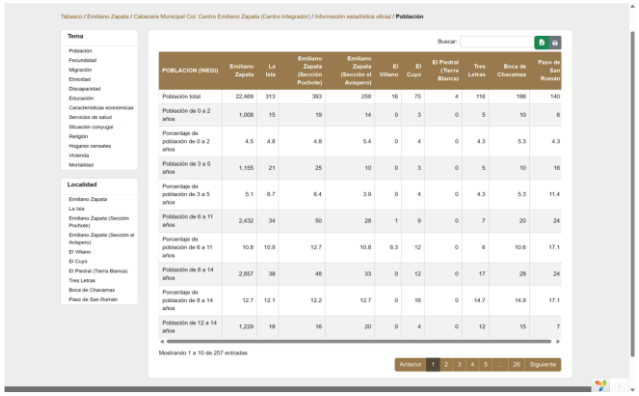


Figura 5: Presentación de los datos a través de DataTables

Asimismo, creamos visualizaciones gráficas como infografías y mapas temáticos que dan una visión clara y cercana de indicadores importantes. Estas representaciones sirven para mejorar la detección de patrones, correlación e identificación de necesidades regionales, factores que son cruciales para la organización efectiva de la programación territorial.

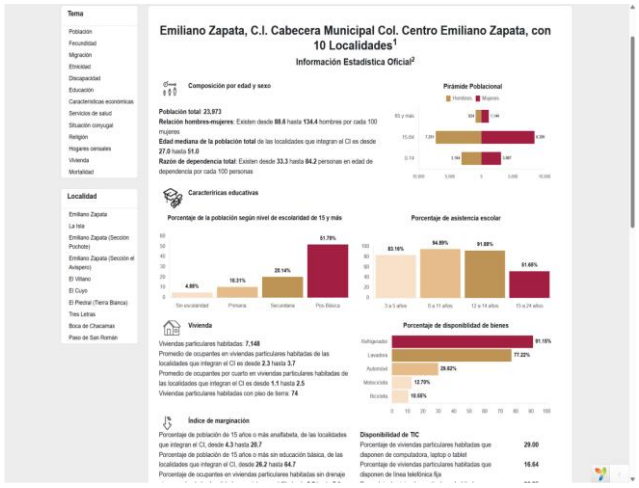


Figura 6: Presentación de los datos a nivel infografía (Centro Integrador)

Sin embargo, la validación operativa del sistema todavía se está llevando a cabo con los usuarios finales. Funcionalidades como capas ejecutivas automáticas y capas geográficas más detalladas están en desarrollo. Beneficios similares incluyen extender la profundidad en el análisis técnico y permitir el seguimiento de indicadores a lo largo del tiempo.

En comparación con enfoques convencionales y herramientas y/o sistemas similares desarrollados y empleados para asistir la administración pública, SCITab tiene ventajas significativas en términos de usabilidad, beneficios relacionados con los datos debido al fondo heterogéneo de los mismos y beneficios de contextualización relacionados con el aspecto regional. Por otro lado, se han identificado algunas limitaciones, como la dependencia de la calidad de los datos recopilados manualmente por los cuerpos municipales, y la necesidad de capacitación adecuada para los usuarios institucionales para utilizar adecuadamente todas las funcionalidades disponibles del sistema.

A diferencia de herramientas anteriores, como hojas de cálculo fragmentadas, bases de datos estáticas o informes PDF que circulaban entre dependencias sin estandarización, SCITab centraliza la información en una plataforma interactiva, georreferenciada y actualizable. Esta centralización elimina la duplicidad de datos, permite el análisis transversal entre sectores (salud, educación, transporte) y agiliza los tiempos de consulta. En contraste con soluciones comerciales como SIG estatales o plataformas privadas utilizadas en otros contextos, SCITab fue diseñado específicamente para la realidad de los Centros Integradores de Tabasco, con énfasis en la conectividad limitada y necesidades de usuarios con baja experiencia digital. Esta adecuación ha sido clave para su adopción operativa inicial.

En el futuro, una línea de mejora importante para SCITab es la integración de tecnologías basadas en inteligencia artificial (IA), particularmente para el reconocimiento automático de patrones, predicción de necesidades territoriales y sugerencia de acciones estratégicas. Esta integración podría realizarse utilizando modelos de aprendizaje supervisado para pronosticar la demanda de servicios públicos con base en tendencias históricas, o técnicas de clustering no supervisado para identificar regiones con comportamientos sociales o económicos similares. Herramientas como TensorFlow, scikit-learn o Microsoft ML.NET serían viables para construir prototipos funcionales que operen dentro del backend del sistema. Asimismo, el uso de modelos de series temporales (ARIMA, Prophet) podría contribuir al seguimiento y anticipación de indicadores clave como acceso a servicios, movilidad o cobertura médica.

Para implementar estos componentes, sería necesario diseñar una arquitectura modular que incorpore motores analíticos basados en IA como servicios complementarios, sin comprometer el rendimiento del sistema actual. Además, la generación de modelos personalizados por municipio o región podría facilitar decisiones descentralizadas basadas en datos específicos del territorio. Estas capacidades avanzarían el sistema SCITab de una plataforma de consulta a una herramienta de gobernanza predictiva, elevando su potencial estratégico y operativo dentro de la administración pública.

4. CONCLUSIONES

En este sentido, la construcción del sistema SCITab es un paso importante hacia la modernización de los procedimientos para la consulta, análisis y visualización de información territorial en los Centros Integradores del estado de Tabasco. Tales iniciativas permitieron la construcción de una plataforma tecnológica de trabajo muy escalable, integrada con datos de fuentes oficiales y encuestas locales para mejorar la toma de decisiones estratégicas en la administración pública.

El sistema proporciona acceso ágil y organizado a información clave, respaldado por una navegación intuitiva y jerárquica, que es una de sus principales contribuciones. Esta intervención es una característica clave que permite contextualizar y guiar el diseño de estrategias fundamentadas en teoría/evidencia para mejorar la capacidad estatal. Finalmente, la implementación para crear visualizaciones interactivas y tablas dinámicas utilizando DataTables, un software de código abierto ha demostrado su eficacia para ordenar grandes bases de datos y exponerlas a perfiles no técnicos.

Aunque el sistema actual todavía está en una etapa de evolución continua, los hallazgos presentes indican un gran potencial de reproducibilidad en otras regiones del país que enfrentan problemas similares de fragmentación de datos en el dominio público. Las futuras fases incluyen explorar funcionalidades como informes ejecutivos automatizados, la interoperabilidad con los sistemas institucionales existentes y una línea de capacitación técnica para los usuarios finales para maximizar el impacto y la adopción de la herramienta.

Esto también establece nuevas vías de investigación sobre el uso de tecnologías emergentes (como la I.A.) para prever necesidades locales y reconocer patrones complejos. De manera similar, se sugiere que el efecto del sistema necesita evaluarse con respecto a la eficiencia económica a través de la asignación de recursos y la efectividad de políticas impulsadas a través del ámbito digital.

En conclusión, SCITab es un ejemplo de cómo la tecnología puede alinearse con el desarrollo social y la gobernanza pública, si se articula adecuadamente; un enfoque escalable e innovador centrado en el bienestar de las comunidades.

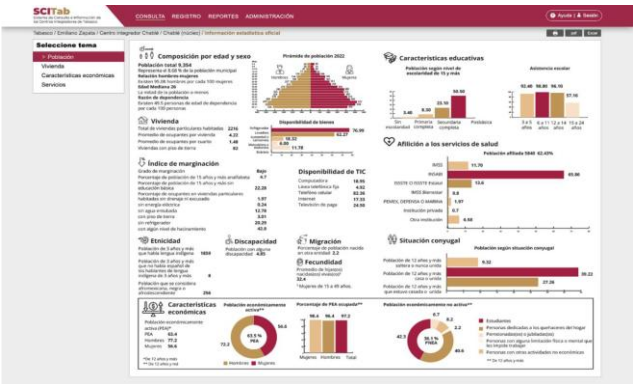


Figura 7: Infografía nivel localidad

REFERENCIAS

Bootstrap Team. (2024). *Bootstrap v5.3 Documentation*. Bootstrap Official Website. Disponible en: https://getbootstrap.com/docs/5.3/getting-started/introduction/

DataTables. (2024). *DataTables Documentation*. SpryMedia Ltd. Disponible en: https://datatables.net/manual/

Guía Rápida SCINCE 2020. (n.d.). *Sistema para la Consulta de Información Censal*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: https://gaia.inegi.org.mx/scinceayuda/index.html

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). *ENADID. Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica*. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enadid/2018/doc/dc_enadid18.pdf

jQuery Foundation. (2023). *jQuery API Documentation*. jQuery Foundation. Disponible en: https://api.jquery.com/

Lifeder. (2022, 18 agosto). ¿Qué es la localidad? Características principales. *Lifeder.com*. Disponible en: https://www.lifeder.com/localidad/

PostgreSQL Global Development Group. (2024). *PostgreSQL 16 Documentation*. PostgreSQL Official Documentation. Disponible en: https://www.postgresql.org/docs/

Proyecto del Sistema de Centros Integradores (SCITab). (2022, julio). Gobierno del Estado de Tabasco. Disponible en: https://tabasco.gob.mx/sites/default/files/users/planeacion_spf/PUNTO_8_PROYECTO_CENTROS_INTEGRADORES.pdf

Qiang, Q., and The Yii Project. (2023). *The Definitive Guide to Yii2*. Yii PHP Framework. Disponible en: https://www.yiiframework.com/doc/guide/2.0/en

Universal, R.E. (2023, 26 enero). La importancia de contar con el INEGI. *El Universal*. Disponible en: https://www.eluniversal.com.mx/opinion/fernando-diaz-naranjo/la-importancia-de-contar-con-el-inegi/

De Estadística y Geografía, I.N. (n.d.). *Quiénes somos*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Disponible en: https://www.inegi.org.mx/inegi/contenido/ins_servicio.html

"Optimization of the cassava chip and bagasse drying process using the DMAIC methodology focused on Six Sigma"

Valdés Álvarez Alejandra C.*Hernández Sánchez Luis Alberto González González Eric*****

Tecnológico Nacional de México/ ITS de Ciudad Serdán Puebla, México (Tel: 800 841 9270 ext. 126; e-mail: avaldez@cdserdan.tecnm.mx, lhernandezs@cdserdan.tecnm.mx y egonzalez@cdserdan.tecnm.mx).

Abstract: This paper describes the optimization of the drying process, including the analysis of the variables in the process, with the aim of contributing to the reduction of its fluctuation. It also aims to establish a quality standard for the cassava chips and bagasse, and ultimately to standardize the hours spent in the drying process.

Keywords: Bagasse, Cassava, Optimization, Six sigma.

1. INTRODUCCIÓN

Como parte del avance tecnológico, se han establecido líneas de investigación sobre enzimas que sirven para la nutrición y salud animal, el presente trabajo se especifica en el área de secado de bagazo y astilla de yuca, por medio de la implementación de la metodología DMAIC enfocado a Seis sigma, dado que esta herramienta según Goetsch, D. L., & Davis, S. B. (2014) en su libro denominado Quality Management for Organizational Excellence: Introduction to Total Quality, menciona que "Six Sigma es una estrategia de mejora de procesos que combina metodologías estadísticas con un enfoque estructurado de resolución de problemas, buscando minimizar la variabilidad y mejorar la calidad de los productos o servicios."

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa en la que se realizó el trabajo, actualmente desarrolla enzimas de calidad que se usan para la alimentación de ganado, a pesar de que es una empresa de talla internacional presenta problemas que desea resolver, los cuales, son los siguientes:

Problema 1. Se tienen variabilidad en el tiempo de secado de astilla y bagazo. Este tiempo fluctúa desde 3 hrs. de secado hasta 9.5 hrs. como máximo, este es un problema grave porque afecta la producción programada, además de que ocasiona un mayor consumo de gas, electricidad, pero la principal razón por la cual es vital controlar esta variabilidad es porque del tiempo depende la recuperación de producto seco. Entre más tiempo lleva el proceso disminuye el producto seco por hora.

Problema 2. No está estandarizada la cantidad de recuperación de producto seco. Porque a pesar del tiempo invertido en el proceso no se tienen las cantidades esperadas, esto se debe a que no se cuenta con un rango de rendimiento del silo secador. Al ser un equipo que fue elaborado por trabajadores de la empresa, no se tiene un rendimiento especificado por el fabricante, y esto se convierte en un problema para el proceso.

Problema 3. Se tiene un cuello de botella en el secador, ya que es una fase en la cadena de producción de polvos secos más lenta que las otras fases (tarda de 5 a 6 horas como promedio en secar astilla y de 4 a 5 horas en promedio para secar bagazo), con un tiempo de abastecimiento y descargue de producto seco de una hora. El secador, es uno de los equipos vitales que permite obtener la materia prima seca, para su molienda, cribado o mezclado y de este modo obtener los productos finales.

Problema 4. Se tiene una alta posibilidad de generarse un accidente. Si no se tiene un buen secado de astilla y bagazo da como resultado que en el siguiente proceso que es el molido se genere una fricción en la malla, que si no es detectado por el operador puede incendiarse el producto, esto es una pérdida para la empresa y un riesgo para los operadores que están cerca.

2. MEDOLOGÍA

2.1 FASE DE DEFINIR.

El propósito de la fase de definición es que se conozcan los requerimientos del cliente, así como entender claramente cuál es el estado actual y la condición a cambiar del proceso. Con esto en mente, se forma un equipo de trabajo (equipo seis sigma) cuyos esfuerzos se encuentran enfocados en problemas que son importantes y dentro del control del equipo. El equipo está conformado por operadores del silo secador, supervisores del proceso de yuca representantes de todas, además de un líder del proyecto del área de yuca, supervisor de mantenimiento y jefe de área las salidas. Además de que se definen las fronteras o límites de mantenimiento y jefe de Área las salidas.

Algunas de las actividades que se realizaron en esta primera fase fueron: Preparar un prospecto de proyecto; entender la relación entre proveedores-entradas-proceso-salidas-clientes; identificación de los requerimientos del cliente; desarrolló del objetivo del proyecto; y formar el equipo de trabajo. Se empezó con la realización de un SIPOC (Proveedores-Entradas-Proceso-Salidas-Clientes), con la finalidad de verificar que las entradas al proceso estén de acuerdo con el proceso.

A continuación, se describe cada parte que compone el SIPOC:

Proveedores: En el proceso de secado de astilla y bagazo, se cuenta con proveedores de tronco de yuca que es la materia prima del proceso, el astillador procesa esos troncos y se obtiene astilla húmeda que es abastecida al silo secador, la

prensa extrusora se encarga de exprimir la astilla y producir bagazo que de igual manera es abastecido en el Silo.

(Input -Entradas/ Insumos) Las materias primas y/o información que desencadenan el proceso: Astilla Húmeda y Bagazo Húmedo.

P (Process -Procesos-): Es el conjunto de tareas que se realizan para poder transformar la materia prima en un producto final.

Primer paso abastecimiento: El abastecimiento del secador se realiza de dos métodos diferentes:

•El Método 1, es mediante el astillador, el cual, es colocado frente al silo secador girando la garganta de este equipo en dirección a la puerta del secador.

•El Método 2, para abastecer el secador es mediante jumbos llenos de bagazo, los cuales, son ingresados por la puerta del silo y de igual manera se debe esparcir el producto sobre la malla del secador para su posterior secado.

Segundo paso primer tiempo de secado: Inicia el secado de la materia prima, con aire precalentado que puede llegar a temperaturas de 140°C, por seguridad solo se utiliza en este primer proceso de secado temperaturas de 120°C - 135 °C.

Tercer paso: Enfriamiento del Silo Secador. Se requiere de un tiempo de enfriamiento para poder ingresar al secador y voltear la astilla que es el siguiente paso.

Cuarto paso: Volteado de Astilla o Bagazo. El silo secador es de cama fija por lo que se necesita que la materia prima sea removida para poder lograr un secado uniforme y evitar el riesgo de que el bagazo o la astilla ardan.

Quinto paso: Segundo tiempo de secado. Se emplean temperaturas de 115°C - 95 °C. Por seguridad ya que la mayor parte de la materia prima está seca y es más alta la posibilidad de incendio. Aquí es donde termina el proceso de secado de astilla o bagazo, con el cual, se redujeron los niveles de e-coli, una bacteria dañina si es consumida por animales de granja, ya que la humedad que es el medio donde se propaga esta bacteria, así mediante este método se logra que el producto final tenga la calidad requerida por el cliente y sin contaminación.

Sexto paso: Termina el proceso de secado. El operador debe realizar una autoinspección en la que determina si su astilla o bagazo ya están secos.

Séptimo paso: Enfriamiento de silo secador. Este es el último paso para poder descargar el producto, este tiempo es de aproximadamente 15 min para poder llegar a una temperatura de 30 °C y no sea un riesgo para la salud del operador.

Octavo paso: Descarga de producto. Este se realiza de manera manual, el operador realiza el vaciado de producto del secador en jumbos que posteriormente son pesados y llevados al molino.



Figura 1. SIPOC

(Output) Salida: Producto seco. Astilla seca con nivel de humedad del 4 - 6 %. Bagazo seco con nivel de humedad de 4 - 6 %.

(Customers) Clientes: El cliente es interno y se considera como la molienda, pero del proceso de secado depende de la calidad final de los productos que se envía a México, Estados Unidos de América e Irlanda.

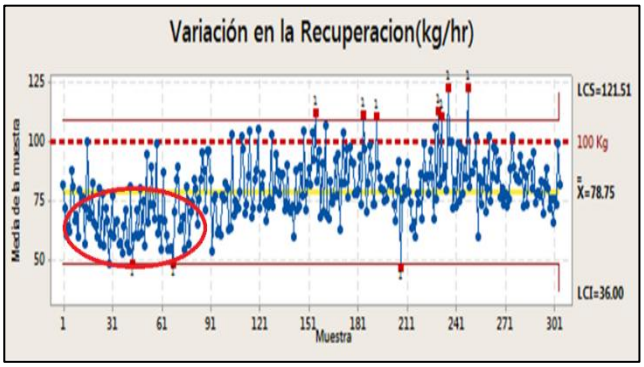


Figura 3. Recuperación de producto seco, etapa antes.

2.2 FASE DE MEDIR.

Según Gitlow, HS, Levine, DM y Popovich, EA (2005), el propósito de la fase de medición es contar con una métrica que indique la magnitud de la diferencia existente entre el estado actual y el deseado del proceso. En el proceso de secado de astilla y bagazo, la métrica aplicada fueron los kilogramos por hora de producto seco recuperado. Para esta etapa se llevó a cabo un registro de media del proceso, que es de 78.755 kg, teniendo como mínimo 37.778 y un máximo de 135.385 (figura 2), el proceso de secado es un cuello de botella,(es la actividad más lenta del proceso de elaboración de polvos) del cual depende el proceso de molienda que es más eficiente, la inversión de tiempo, energía y combustible exigen que el secado se realice de una manera más rápida y obtenido producto completamente seco, existe una oportunidad de mejora y eliminar o reducir esas variaciones lo que daría como resultado una optimización del proceso de secado. El proceso de secado es realizado por una persona por turno, el proceso es de manera manual en la que el secado del para poder determinar que operadores son los más afines al equipo.

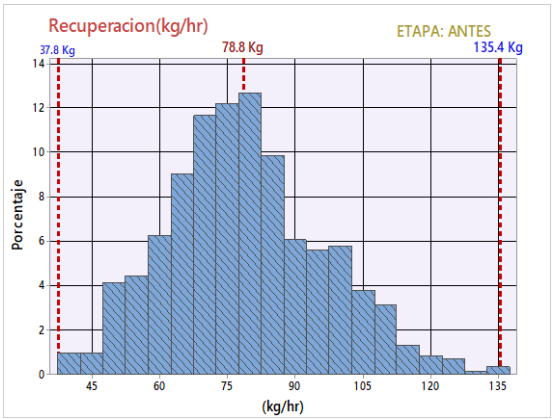


Figura 2. Recuperación de producto seco, etapa antes.

Tiempo total de secado

La recuperación de producto seco se tiene la relación entre tiempo y cantidad recuperada donde entre más aumente el tiempo menor recuperación existe, todo esto observado en la base de datos. Los costos de un proceso son una parte fundamental para poder visualizar el impacto que representan para la empresa. El optimizar el proceso de secado tendría como beneficio a corto y largo plazo una reducción en costos de secado, aprovechando al máximo los recursos con los que cuenta el proceso.

Etapa: Antes	
Cantidad de producto Seco (KG)	238909
Litros de Gas Consumido	98495.44
Kg Secados/ Litro de Gas Consumido	2.42 kg Secados/ Litro de Gas

Tabla 1. Etapa de antes

El nivel sigma inicial del proyecto fue de 1.40 el cálculo se realizó mediante el siguiente método.

Tabla 2. Nivel de seis sigma antes

Determinar el número de oportunidad de defectos por unidad	**D=**	1
Determinar el número de unidades procesadas	**N=**	607
Determinar el número total de defectos.	**O=**	324
Calcular defectos por oportunidad	$DPO = \frac{D}{N \times O} =$	.534
Calcular Rendimiento	**R= (1-DPO)*100 =**	46.62
Buscar el nivel sigma del proceso en la tabla sigma		**1.40**

2.3 FASE DE ANÁLISIS

El propósito de la fase de análisis fue obtener y analizar datos que determinen qué causa(s) puede(n) estar evitando el cumplimiento del estado deseado del proceso (Pyzdek, T., & Keller, P. A, 2023).

Algunas actividades que se realizan en la fase de análisis son: analizar objetivamente (con valores numéricos) la variación del proceso; identificar las variables de entrada al proceso que influyen en su fluctuación. Así como entender el efecto que cada una de ellas provoca en el proceso. Se elaboró un gráfico de serie de tiempo para poder comprender el comportamiento que siguen las recuperaciones del producto seco por hora en la fase inicial del proceso. La zona encerrada en el ovalo rojo representa recuperaciones por debajo de la media del proceso lo que significa que el proceso es deficiente, además de tener una inestabilidad que provoca ciertos picos que tocan la zona de los limites inferiores y superiores de la media dando como resultado que se tengan datos atípicos mayores y menores de la media. La línea de tiempo graficada representa una visión general de cómo se encontraba el proceso inicial y poder dirigir los esfuerzos en la disminución de la variabilidad y optimizar el proceso aplicando mejoras que incluyen estandarización de proceso.

El silo secador tiene una capacidad para poder secar astilla o bagazo de 1400 kg como máximo, sin embargo, con estos niveles de carga es difícil que se obtenga un secado uniforme, y gran parte del producto se encuentra húmedo y requiere de un mayor tiempo de secado, consumiendo más gas y no obtenido la recuperación esperada.

2.4 FASE DE MEJORA

Según Herrera Acosta, R., & Fontalvo Herrera, T. (2011), esta etapa describe como un proceso crítico para optimizar el desempeño de los procesos organizacionales. Identificadas las causas que provocaban las bajas recuperaciones de producto seco en el proceso, se tienen que implementar mejoras que permitan solucionar o disminuir el impacto que tiene estas causas.

Establecimiento de un rango de rendimiento: El rendimiento en un proceso permite medir su desempeño, para el proceso secado el rango de rendimiento fue establecido de 95-100 kg considerado por los operadores como una meta que lleva conjuntar esfuerzos para alcanzar este nivel de recuperación.

Para el rendimiento de producto seco por hora la fórmula es la siguiente:

$$Rendimiento: \frac{Kg\ secos}{Horas\ secadas}$$

Fórmula 1. Cálculo para obtención del rendimiento

Las horas de secado del proceso no eran monitoreadas en tiempo real cuando el proceso de secado iniciaba y cuando este terminaba por lo que se producía un error en el control, ya que la recuperación de producto seco tiene relación con el tiempo, con la elaboración de un formato permite controlar ese tiempo de secado con colaboración de los operadores y supervisor.

Con este formato se lleva un mejor control de las horas del proceso de secado, se necesitó un compromiso de los operadores y supervisores para revisar por turno que fuera llenado correctamente. Este formato es de apoyo para poder vaciar los registros de tiempo en el FWAC078 de yuca ya que forma parte de AQS y no puede ser oficiado o llenado por personal no autorizado.

Temperaturas de secado:

El proceso de secado se realiza con aire precalentado a temperaturas que llegan a alcanzar 140 grados, pero la mala manipulación de estas temperaturas ocasiona que el proceso dure más o menos tiempo se realizaron pruebas pilotos de secado con las temperaturas que se observan en la figura 4 que funcionó como ayuda visual en el silo secador.



Figura 4. Temperatura promedio de secado

Con las temperaturas observadas en la imagen anterior se alcanzó estandarizar la media del proceso de secado a 4 horas teniendo en cuenta que el tiempo de secado tiene un enfriamiento de 15- 20 minutos, este tiempo no se puede

eliminar o disminuir sino se realiza una modificación en el equipo, lo cual es una limitación de la mejora**.**

Operadores con poca experiencia en el proceso de secado: Todos los empleados adquieren conocimiento detallado de las diferentes tareas en su plan de trabajo, lo que significa que podrán compensar bien el ausentismo. Sin embargo, en el proceso de secado resulta difícil poder realizar esta rotación ya que no se adquiere la experiencia y afinidad en el equipo secador, teniendo como consecuencia las bajas recuperaciones de producto. La mejora implementada es elegir tres operadores con años de experiencia y con recuperaciones por encima de la media inicial del proceso, para que estos capacitaran a otros tres que habían realizado operaciones ocasionales del silo secador, pero con habilidades en otros equipos. La capitación consistió en los siguientes pasos que se encuentran en la figura siguiente.

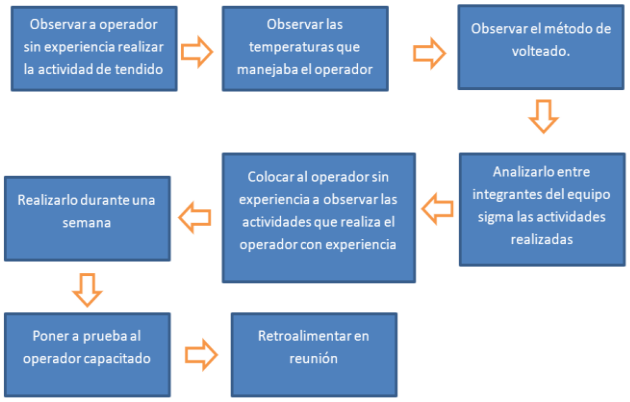


Figura 5. Capacitación.

Seguridad Industrial

La seguridad es importante en las actividades que se realizan en cualquier proceso de producción, en el área de yuca existen diversos equipos que son considerados como de riesgo alto, por tener partes en movimiento y en las que puede quedar atrapado el operador, para el silo secador que es un equipo que no presenta ninguna parte en movimiento se consideró como riesgo el modo en el cual, el operador realizaba su ingreso al equipo ya que se hacía con el apoyo de un banco que tenía un diferencia de altura de 94 cm con respecto a la entrada del secador donde el operador tenía que realizar un salto para poder alcanzar la base del banco-maya de secador. Lo que era una condición insegura que pudo haber provocado algún incidente o accidente poniendo en riesgo la salud del operador. Aunque no era un factor que estuviera relacionado directamente con la optimización de secado, se logró mejorar esa condición insegura generando una orden de trabajo para que se adquiriera un nuevo banco el cual ahora tiene solo una diferencia de 17 cm con respecto a la entrada del secador, con esto se logra disminuir riesgo de una caída y haciendo más rápido el acceso al secador.



Figura 6. Antes y después de banco de ascenso al secador

2.5 FASE DE CONTROL

Es la última fase de la metodología DMAIC donde las mejoras implementadas en la fase anterior se les da un seguimiento por parte de los que integran el equipo Seis Sigma (Antonio, J., 2006), asegurando que el nuevo estado del proceso continúe siempre con la filosofía de la mejora continua. Sin un correcto seguimiento del proceso se tiene el riesgo de que regrese a su estado inicial. Una herramienta empleada para poder ejecutar ciertas acciones de control y que dieron resultados un AMEF.

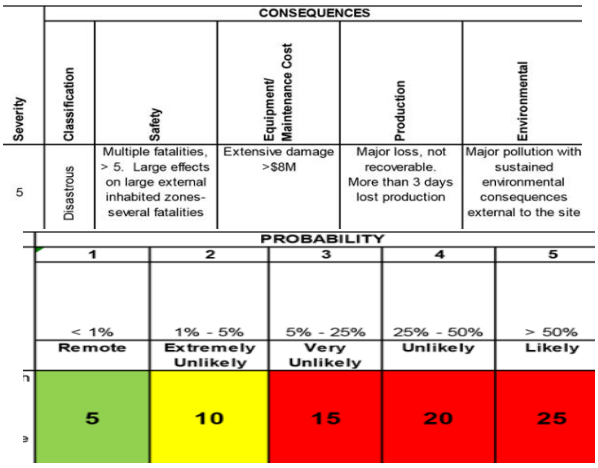


Figura 7. AMEF

En la siguiente tabla se encuentras otras acciones que se implantaron y se siguen aplicando en el proceso de secado.

Acciones de mejora y control
Rango de carga de producto Húmedo de 1000 a 1100 kg.
Operadores con mayor afinidad y conocimiento sobre el funcionamiento en Silo Secador.
Control de Horas de Secado.
Compromiso por operadores y supervisores de mantener el proceso en recuperaciones iguales o mayores a la media obtenida en la mejora.

Figura 8. Acciones de mejora y control.

2.6 CONCLUSIONES

Los beneficios obtenidos al aplicar la metodología DMAIC en el proceso de secado fueron los siguientes:

Aumento de recuperación de producto seco: el principal problema en el proceso de secado fue la baja recuperación de producto seco por hora, lo que provocaba que no se aprovecharan los recursos, y un retado al cumplir con órdenes de producción. Las acciones implementadas en la fase de mejora y su seguimiento en la etapa de control, representaron que se lograra de una media inicial de 78.75 kg/hrs a 88.59 kg / hr, es decir un aumento de 9.840 kg más por hora de secado que significa un 12.50 % más de producto seco disponible por cada lote secado.

Reducción de horas de secado.

La primera hora aumento de las temperaturas de secado: al tener una mayor temperatura en el aire precalentado, se evapora rápidamente el agua contendida en los trozos de yuca o bagazo, consumiendo una menor cantidad de tiempo para lograr la reducción de humedad en el material. Segunda operadores capacitados en la manipulación del equipo secador que incluye: Experiencia en tendido de astilla o bagazo, mejora en el volteado del producto y conocer el funcionamiento del silo secador. Con las dos mejoras anteriores se obtuvo que se

pasara de tener una media de tiempo de secado de producto de 5.12 horas a 4.41 horas lo que representa un 13.87%, de esta manera se reducen los costos de producción de secado y aumenta la disponibilidad de producto seco por hora. Esto se observa en la siguiente gráfica.

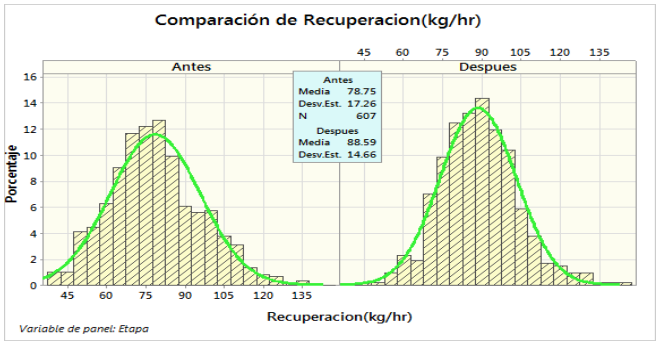


Figura 9. Comparación de recuperación

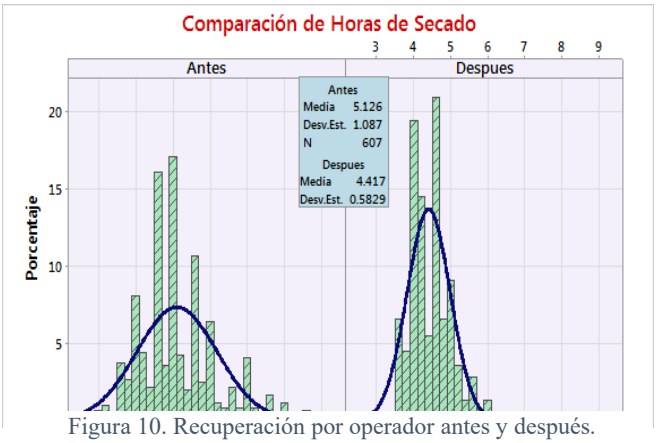


Figura 10. Recuperación por operador antes y después.

Capacitación de operadores

Los operadores con experiencia en el secado de producto fueron los encargados en realizar dicha capacitación de los operadores sin experiencia, logrando formar un equipo de operadores especializados para realizar el secado de astilla y bagazo de esta manera obtener recuperaciones por encima de la media inicial del proceso.

En la siguiente grafica se observa cómo es que los operadores que habían realizado un número menor de secados que los operadores con experiencia después de haber recibido la capacitación, empezaron a tener recuperación por encima de la media inicial del proceso, así como poder alcanzar el nivel de los operadores expertos en secado, lo que significa que se logró un compromiso de alto nivel por parte de operadores y apoyo de supervisores para llegar al nivel esperado.

Comparación de nivel sigma inicial y después.

Las mejoras implementadas en el proceso de secado tuvieron como beneficio aumentar el nivel sigma del proceso y su rendimiento. Lograr un aumento de nivel sigma no resulta fácil si la variable principal a mejorar es la mano de obra, ya que siempre se presenta una resistencia al cambio, la metodología DMAIC enfocada a seis sigma permite formar equipos de trabajo los cuales se comprometen y comparten la misma meta, es decir se tiene un conjunto de esfuerzos con un mismo fin.

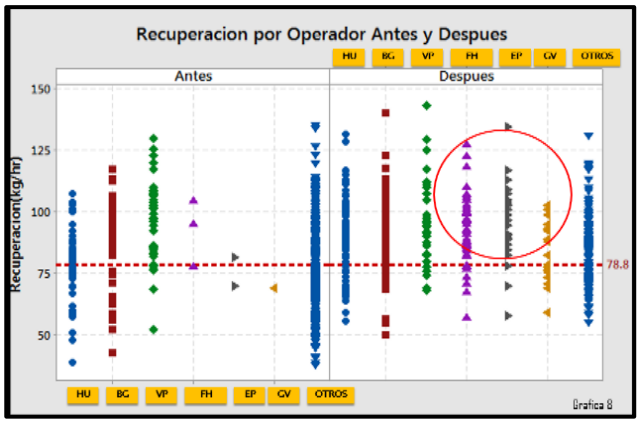


Figura 11. Recuperación por operador antes y después.

En la siguiente tabla se puede observar de manera detallada los beneficios obtenidos en el proceso.

SEGUIMIENTO		
Concepto	Etapa: Antes	Etapa: Después
Recuperación (KG/HR)	78.755 kg/hrs	88.594 kg/ hrs.
Tiempo (HR)	5.12 hrs	4.41 Hrs.
Nivel Sigma	1.40 σ	2.15 σ
Rendimiento	46.62 %	73 .53 %
Aumento de Rendimiento		26.91 %

Figura 12. Nivel sigma, antes y después.

Aumentar la disponibilidad de producto seco por hora, disminuir las horas de secado se ve reflejado en un aumento de .75 nivel sigma, lograr que un proceso alcance un nivel de 6 sigma tarda en promedio 5 años partiendo de nivel 3 sigma, realizando esta comparación si el proceso de secado tenía un nivel 1.40 y su comportamiento de ir aumentando 1.5 sigma por año en 2 años el proceso alcanzaría 3.40 y en un año más estaría en 5.9 ; en 2 años se alcanzaría lo que en 5 años se logra en proyectos seis sigma. Cuando un proceso se vuelve lento y tarda demasiado en dar resultados, se pierde interés por parte de los miembros que participan en la ejecución de este tipo de proyectos.

El que un proceso genere rápidamente resultados motiva a que los miembros del equipo sigma se involucren de una mejor manera y adquieran un compromiso de alto nivel. El proceso de secado es definitivamente caro ya que emplea una gran cantidad de litros de gas consumido por lotes secados, teniendo en cuenta que hoy en día el precio de este tipo de combustible es alto y año con año aumenta poder impactar en esta variable era sumamente importante.

La mayoría de mejoras implica una inversión de capital para mejorar las condiciones del equipo, herramienta o del proceso entero el contar con limitantes en el proyecto realizado era

necesario alcanzar un beneficio en capital, que es lo que una empresa busca al aprobar proyectos de mejora en sus procesos. Para el proceso de secado se obtuvieron los siguientes beneficios en capital. El ahorro alcanzando en el proceso de secado es de $ 13,277.89 por mes y un total de para la etapa después de $ 66, 389 pesos que es igual a haber ahorrado 10,000 litros de gas.

Además de que se generó una disponibilidad de producto en el mercado de 13,000 kilogramos, considerando que todo este producto se comercializa en estados unidos y su valor es en dólares, las ganancias generadas por las ventas son significativas y generan un gran impacto para las finanzas de la empresa.



Figura 13. Costos, antes y después.

La implementación de la metodología Seis Sigma en una empresa representa una estrategia poderosa para mejorar la calidad, reducir costos y aumentar la eficiencia operativa. Al centrarse en la reducción de la variabilidad en los procesos y en la eliminación de defectos, Seis Sigma permite tomar decisiones basadas en datos y enfocar los esfuerzos en las áreas de mayor impacto para el negocio.

Además, al involucrar a todos los niveles de la organización mediante roles claramente definidos (como Green Belts, Black Belts y Champions), Seis Sigma fomenta una cultura de mejora continua y compromiso con la excelencia. En consecuencia, las empresas que aplican adecuadamente esta metodología pueden lograr ventajas competitivas sostenibles, mejorar la satisfacción del cliente y obtener un retorno de inversión significativo.

En resumen, Seis Sigma no solo es una herramienta para resolver problemas, sino una filosofía empresarial que impulsa el cambio positivo, la innovación y el crecimiento a largo plazo.

REFERENCIAS

Antonio, J. (2006). Seis Sigma para procesos de servicio. Revista de Gestión de Procesos Empresariales, 12 (2) (2006). Seis Sigma para procesos de servicio. Business Process Management Journal, 12 (2), 234–248. https://doi.org/10.1108/14637150610657558

De Koning, H., y De Mast, J. (2006). Una reconstrucción racional del revolucionario libro de cocina de Six - Sigma. Revista Internacional de Gestión de la Calidad y la Fiabilidad. (2006). Una reconstrucción racional del revolucionario libro de recetas de Seis Sigma. Revista Internacional de Gestión de la Calidad y la Confiabilidad, 23 (7), 766–787. https://doi.org/10.1108/02656710610672443

George, ML, Rowlands, D., Price, M. y Maxey, J. (2005). El manual de bolsillo de Lean Six Sigma: una guía de referencia rápida para casi 100(2005). El manual de bolsillo de Lean Six Sigma: Una guía de referencia rápida con casi 100 herramientas para mejorar la calidad, la velocidad y la complejidad de los procesos. McGraw-Hill.

Gitlow, HS, Levine, DM y Popovich, EA (2005). Gestión de calidad: desmitificada. McGraw - Hill Professional.(2005). Gestión de calidad: desmitificada. McGraw-Hill Professional.

Henderson, KM, y Evans, JR (2000). Implementación exitosa de Seis Sigma: Benchmarking de General Electric Company. Benchmarking: An International Journal, 7 (4), 260–281. https://doi.org/10.1108/14635770010378972

Herrera Acosta, R., & Fontalvo Herrera, T. (2011). *Seis Sigma: Un enfoque práctico*. Barranquilla, Colombia: Corporación para la Gestión del Conocimiento Asesores del 2000.

Laureani, A. y Antony, J. (2012). Factores críticos de éxito para la implementación efectiva de Lean Sigma: Resultados de un estudio empírico y agenda para futuras investigaciones. Revista Internacional de Lean Six Sigma, 3 (4), 274–283. https://doi.org/10.1108/20401461211284743

Pyzdek, T., & Keller, P. A. (2023). *The Six Sigma Handbook, Sixth Edition: A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels*. McGraw Hill.

Pande, PS, Neuman, RP y Cavanagh, RR (2000). El método Seis Sigma: Cómo GE, Motorola y otras empresas líderes están optimizando su rendimiento. McGraw-Hill.

Post-Quantum Digital Signature Model for Blockchain Using Xmss and Merkle Trees

García Reyes René*, Ortiz Hernández Javier*, Hernández Aguilar José Alberto**, Mijarez Castro Rito***, Hernández Pérez Yasmín*

*TecNM CENIDET Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México. E-mail: {d21ce036@cenidet.tecnm.mx, javier.oh@cenidet.tecnm.mx, yasmin.hp@cenidet.tecnm.mx}

** Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Facultad de Contaduría, Administración e Informática (FCAeI), Cuernavaca, Morelos, México. E-mail: {jose_hernandez@uaem.mx}

*** Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), Cuernavaca, Morelos, México. E-mail: {rito.mijarez@ineel.mx}

Abstract: The fast-paced evolution of quantum computing is throwing some serious curveballs at the cryptographic systems we rely on today, especially in cutting-edge technologies like blockchain. Popular algorithms, like ECDSA for digital signatures, could find themselves vulnerable to quantum attacks, particularly those outlined by Shor and Grover. This pressing issue has sparked a race to find quantum-resistant cryptographic solutions that can maintain the integrity and authenticity of data across distributed networks. In this paper, we introduce the initial design and implementation of a post-quantum digital signature model based on XMSS (eXtended Merkle Signature Scheme), which is a NIST-approved framework built to fend off quantum threats. Our proposed model integrates XMSS with Merkle trees to safeguard transactions in a simulated blockchain setting. We detail the technical architecture, covering key generation, signing, and verification processes, and we've developed a proof of concept using open-source tools. Early results suggest that XMSS could be a strong contender against current algorithms, boasting benefits in quantum resistance and simplicity. However, there are still hurdles to overcome, such as signature length and limited key usage. We also explore potential enhancements, including more efficient variants and how to adapt these solutions to real-world blockchain networks. This research adds to the ongoing conversation about moving towards more secure cryptographic methods as we step into the post-quantum era.

Keywords: Blockchain, Quantum Computing, Post-Quantum Cryptography, XMSS, Digital Signature, Merkle Trees.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente y cada vez más intensa preocupación por la computación cuántica ha generado un movimiento significativo y de gran relevancia hacia el desarrollo de nuevas y innovadoras aplicaciones en Blockchains que sean Cuántico-Resistentes. Este desarrollo es importante debido a que ya incluso existe un intenso y acelerado movimiento por parte de diversas empresas líderes en tecnología que se están dedicando a la investigación y creación de computadores cuánticos.

Estos computadores son capaces de romper en teoría, de manera rápida, todas las claves públicas que han sido generadas a través del famoso algoritmo RSA de Factoring y también por el algoritmo ECC de Logaritmo Discreto. Estos algoritmos, que son ampliamente utilizados en la encriptación de datos sensibles, son comúnmente conocidos como algoritmos cuánticos de Shor. Este nombre se debe a que utilizan un método específico a través de la descomposición prima en logaritmos discretos para llevar a cabo esta delicada tarea con gran eficiencia. Por esta razón crucial y urgente, es de suma importancia que debemos desarrollar nuevas y avanzadas aplicaciones que aseguren y mantengan la confidencialidad de todos los datos, así como la autenticidad de toda la información que se maneja en el ámbito digital y tecnológico contemporáneo. (Bernardi-Espín and Quimiz-Moreira2024)

2. ANTECEDENTES

El almacenamiento en Blockchain se basa en criptográfica computacionalmente impracticable o muy costosa de romper, permitiendo la decodificación fácil de contenido utilizando clave de actualización, proporcionando los recursos de recuperación más importantes para prevenir el ejercicio no

autorizado de tales derechos o las facilidades sencillas para proteger la propiedad digital.

Al incluir firma y comprobación, receptores de información siempre poseen la calidad del Blockchain y garantizan propiedades auditables para verificar emisiones y actualizaciones. (Salmerón, 2024)

Los sistemas de blockchain, al prevenir la invalidez o robo de nuestras operaciones e información, aseguran ransomware, también conocido por chantaje digital. La criptografía de firma digital exige calcular el hash de los datos, garantizar integridad y firmarlos usando su llave privada, forma indirecta signos autores mediante el requerido comprobar que secretos firmados pública. Su aplicación usual en redes transacciones para transferir divisas, también mayormente mediante un transporte seguro, independiente, destino proveniente de razón fuerza pública, usa fin mantener se identidad de firma. (Arcos Muñoz, 2023)

2.3. BLOCKCHAINS Y SU IMPORTANCIA

La cadena de bloques se basa en una estructura de datos de nodos enlazados con referencias a hash de bloque, donde cada nodo contiene un número de transacciones y contadores para la generación de nuevos nodos, añadiendo la propiedad de inmutabilidad a lo almacenado. A los nodos enlazados en la cadena de bloques se les asigna una huella digital, eliminando la necesidad de contar con un servidor en el que almacenar la información, a través de su carácter descentralizado. (Zapata & Robles, 2024)

Los principales beneficios de su implementación incluyen la reducción de costos, a través de un sistema económico, veloz y digital. Al tratarse de un sistema distribuido, permite a los usuarios validar por sí mismos el estado de su información, eliminando la burocracia de terceros, que minimiza el riesgo a errores humanos al trabajar con un registro único y verificado. La cadena de bloques es una tecnología inmune, en principio, a ataques interiores y exteriores, protegiendo la información almacenada gracias a sus algoritmos criptográficos y almacenamiento en nodos distribuidos. (Zapata & Robles, 2024)

Los blockchains pueden clasificarse como públicos, en los cuales cualquier individuo puede participar y acceder a la información que maneja la red que los soporta, o como privados, que limitan la visibilidad y validación de las transacciones a un grupo selecto de miembros. Los blockchains con permisos son aquellos que admiten exclusivamente a un conjunto específico de usuarios para su funcionamiento, lo que les permite censurar operaciones públicas en caso de que alguno de los usuarios requeridos no esté involucrado en una transacción llevada a cabo en el blockchain. (Zapata & Robles, 2024)

2.2. AMENAZAS DEL CÓMPUTO CUÁNTICO

La computación cuántica se basa en postulados diferentes a la computación convencional. Este nuevo paradigma funciona a través de partículas subatómicas denominados cúbits. Las operaciones de los cúbits permiten lograr mejoras en algoritmos, ya que pueden estar en múltiples ubicaciones al no ser considerados como un 0 o un 1, sino como los dos a la vez mediante el principio de superposición y el principio de enredo cuántico. (Ramírez Puertas, 2022)

La computación cuántica plantea desafíos que conllevan a la vulneración de la confidencialidad de la información en el contexto de la computación clásica. Esto implica la capacidad de descomponer algoritmos criptográficos mediante el uso del algoritmo de factorización cuántica. (Bernardi-Espín and Quimiz-Moreira2024)

En el contexto del esquema de firma digital basado en bytes, se puede afirmar que dicho esquema no presenta vulnerabilidades frente a un ataque individual. Sin embargo, se halla expuesto si se aplica un sistema que eleva la seguridad a partir de 47.155 bytes. Cuando se supera la capacidad de almacenamiento de 1.396.089 bytes, el sistema se revela claramente vulnerable ante un ataque cuántico. Por ende, es incuestionable que la potencial implementación de ordenadores cuánticos y dispositivos de almacenamiento de cúbits comprometerá los sistemas de criptografía, independientemente de su nivel de calidad. (Señor Sánchez, 2021)

2.3. FIRMAS DIGITALES Y SU ROL EN LA SEGURIDAD

Las firmas digitales son una de las herramientas criptográficas más importantes que existen actualmente, formando la base de la mayor parte de la seguridad en la infraestructura pública. De forma similar a las firmas manuscritas, que permiten verificar la autenticidad del firmante, las firmas digitales aseguran automáticamente la no repudio, en virtud de la naturaleza matemática que representa una firma de este tipo. Generalmente el más común de estos algoritmos utiliza el uso de un hash, así como el cifrado asimétrico, para firmar un bloque de datos con una longitud corta.

Las firmas digitales deben cumplir con, al menos, tres propiedades:

1. Se puede generar una firma que verifica como válida para un documento en específico.
2. No existe manera de firmar un documento sin tener acceso a la clave privada del firmante.
3. Dados un par de claves y un mensaje que tiene una firma válida, nunca existe forma de encontrar una firma válida para un mensaje distinto.

Debido a estas características es que las firmas digitales son el estándar para autenticar mensajes, documentos y muchos otros tipos de información digital.

Las firmas digitales son el centro de la mayoría de las prácticas de autenticación y firma de documentos electrónicos. Antes de firmar cualquier tipo de mensaje, la persona firmante verifica

la identidad de la parte que recibe el mensaje, en virtud de que el mensaje viene de la persona que dice ser. Posteriormente, el firmante genera el hash del mensaje, lo firma, y esa firma digital es enviada a la contraparte firmante. El receptor valida la firma digital generada por el firmante, el mensaje es enviado al destinatario, y cuando el destinatario recibe el mensaje, puede verificar que el mensaje no ha sido alterado gracias al estándar de la firma digital que se envía. (San Miguel Martín, 2023)

3. MODELO PROPUESTO

En el presente documento se propone el desarrollo de un modelo de almacenamiento y firma digital en Blockchains Cuántico-Resistentes que utiliza el algoritmo de firma XMSS y árboles de Merkle. Este modelo se propone realizar una adopción para el almacenamiento y firma digital en Blockchains cuántico-resistentes. Para la implementación de XMSS, nos basamos en la implementación XMSS.

El árbol de Merkle consiste de un árbol de datos que tiene dos hojas que se combinan con una función hash utilizando un árbol binario completo. Los datos en sí son insertados en las hojas, y las combinaciones de las hojas hacia arriba en el árbol se combinan hasta un solo hash, llamado Merkle Root. Como cada combinación de cada par de nodos en cada nivel se llama un Merkle Path o Merkle Proof, mientras la raíz merkle representa todo el árbol. La ruta de Merkle, o la prueba Merkle identifica una hoja en el árbol merkle, mostrando que la hoja pertenece al árbol. La ruta merkle puede determinar si una hoja es parte de un árbol Merkle. Aunque la prueba Merkle no retorna el contenido de prueba. (Sánchez C.R, 2022)

El almacenamiento está basado en sistemas de alto rendimiento de almacenamiento en servidores Cloud host que ofrecen almacenamiento a un bajo costo gracias al hiper-escale y a la utilización de innovadoras tecnologías de software y sistemas. La propuesta asegura que los datos requeridos son parte del árbol. (Del-Pozo-Punal & García-Carballeira)

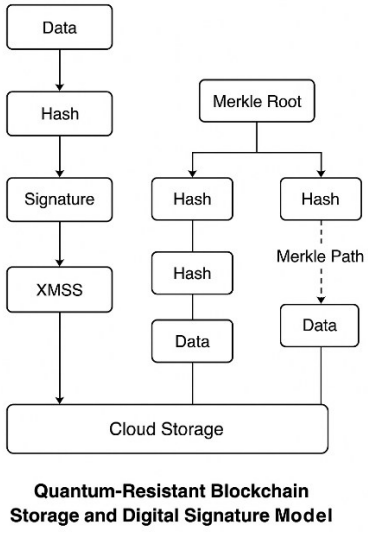


Fig. 1. Modelo propuesto, elaboración propia.

3.1. Operación de XMSS

La implementación del esquema de firma digital post-cuántica XMSS (eXtended Merkle Signature Scheme) requiere una infraestructura computacional con capacidades adecuadas tanto a nivel de hardware como de software, debido a la alta demanda de recursos en operaciones como la generación de claves, la construcción de árboles de Merkle y la ejecución repetitiva de funciones hash criptográficas.

Para llevar a cabo los experimentos, se empleó un servidor basado en una distribución de Linux Ubuntu 22.04 LTS, equipado con un procesador AMD Ryzen 7 5800X de 8 núcleos y 16 hilos, 32 GB de memoria RAM DDR4 a 3200 MHz, una unidad de almacenamiento NVMe M.2 PCIe 4.0 de 1 TB Samsung y una GPU NVIDIA RTX 4060 ASUS Overclocked Edition de 8 Gbs de Vram. Esta última permitió explorar la aceleración por hardware mediante el uso de tecnologías de cómputo paralelo como CUDA, optimizando tareas altamente paralelizables como el cómputo masivo de funciones hash, aspecto fundamental en la generación y verificación de firmas digitales basadas en estructuras de árbol binario.

El uso de GPU no es algo nuevo ya que hoy en día aparte de estar de moda, es por una buena razón ya que varios estudios han demostrado que la utilización de unidades de procesamiento gráfico puede mejorar significativamente el rendimiento de algoritmos criptográficos post-cuánticos, especialmente en esquemas basados en hash como XMSS o SPHINCS+, gracias a la eficiencia de la ejecución paralela (Ghosh et al., 2021; Hülsing et al., 2020).

En este sentido, la arquitectura empleada demostró ser adecuada para ejecutar las operaciones fundamentales de XMSS, permitiendo la firma y verificación de mensajes individuales en tiempos de ejecución aceptables. Asimismo, la incorporación de la GPU abre la posibilidad de escalar el modelo hacia escenarios de mayor concurrencia, como redes blockchain con múltiples solicitudes simultáneas de firma, verificación y actualización de estado.

En la siguiente tabla se muestra el listado de componentes a nivel de software adicionales, especialmente las librerías para XMSS y Arboles de Merkle con el uso de GPU NVIDIA. Como dato adicional en AMD Radeon son otro tipo de librerías y esta mas limitado en el aspecto de documentación.

Librerías para XMSS y Árboles de Merkle con soporte GPU (NVIDIA)				
Librería	**Lenguaje**	**Descripción**	**Ventaja Principal**	**Soporte GPU NVIDIA**
liboqs + CUDA bindings	C/C++	Open Quantum Safe incluye XMSS y se puede compilar con soporte para CUDA.	Rendimiento criptográfico mejorado en hardware con GPU.	Con soporte CUDA manual

PyTorch	Python	Framework para cómputo tensorial.	Operaciones hash y árbol paralelizables como tensores.	Nativo con torch.cuda
CuPy	Python	Alternativa a NumPy que corre sobre CUDA.	Procesamiento vectorizado paralelo (ideal para hashing masivo).	Totalmente en CUDA
Numba (con CUDA)	Python	Compilador JIT de Python con soporte explícito para funciones CUDA.	Permite escribir kernels personalizados para hashing o Merkle trees.	requiere configuración manual
HashLib4GPU *(custom)*	C++/CUDA	Implementación de funciones hash como SHA-2 en CUDA.	Útil para proyectos personalizados donde se desee paralelizar hashing.	orientado a criptografía hash
TensorFlow (experimental)	Python	Aunque es más usado en IA, puede aplicar funciones hash paralelas.	Uso para simulaciones de árboles hash paralelos.	Limitado, pero posible con GPU
Rust + CUDA crates	Rust	Librerías en Rust como cust permiten ejecutar kernels CUDA.	Seguro, rápido y excelente para hashing de bajo nivel.	Con configuración avanzada

Tabla 1. Librerías sugeridas y utilizadas para las pruebas, elaboración propia.

En esta segunda tabla se agregan las librerías para el uso de arboles de Merkle, ya no son compatibles en su mayoría con GPU y solo CPU para tener contemplado. Solo Rust Merkle Tree y sha256tree solo tienen soporte por GPU vía CUDA crates y CuPy/Numba.

Librerías para Árboles de Merkle			
Librería	**Lenguaje**	**Descripción**	**Ventaja Principal**
pymerkle	**Python**	Construcción y verificación de árboles de Merkle.	Ligera, rápida y fácil de usar en pruebas y simulaciones.
merkletreejs	**JavaScript**	Árbol de Merkle en JS, usado comúnmente en DApps y sistemas Ethereum.	Amplio soporte en entornos blockchain web, y pruebas de inclusión fáciles.
go-merkle	**Go**	Árboles de Merkle para sistemas escritos en Golang.	Alto rendimiento y buena compatibilidad con redes como Tendermint o Cosmos.
Rust Merkle Tree	**Rust**	Implementación optimizada para blockchain como Solana.	Seguridad, rendimiento y paralelismo natural del ecosistema Rust.
sha256tree	**Python**	**Árbol de Merkle basado en SHA-256.**	Compatible con sistemas como Bitcoin, fácil de adaptar para análisis.

Tabla 2. Librerías sugeridas y utilizadas solo para Merkle, elaboración propia.

4. ANÁLISIS DE SEGURIDAD

A medida que avanza el desarrollo y la inclusión de computadoras cuánticas en redes secuenciales, los ataques a modelos deben aumentar su complejidad para cumplir con el principio de desarrollo sostenible que toda infraestructura de comunicación de datos digital posea. Aquí se ve como el modelo propuesto es resistente al cómputo cuántico en los niveles generales niveles de almacenamiento de datos, firma digital y tratamiento de datos con dispositivos de almacenamiento masivo, transporte y terminación.

Destacamos que el modelo propuesto debe ser resistente al cómputo cuántico mostrando similitudes de resistencia al propio cómputo clásico. En la sección correspondiente al modelo de almacenamiento se muestra que cumple con la resistencia al cómputo cuántico siguiendo la premisa que copia secreta que es imposible de adivinar cual se encuentra en la mayoría de arreglos. (Palacios-Razo and Sun2024)

El modelo de firma digital también es resistente teóricamente al cómputo cuántico siguiendo la misma línea que la mayoría de signos de firma digital a pesar de que el mismo, aunque probando el algoritmo clásico decisión que el propio modelo clásico es resistente. Reseñando que el tratamiento de datos formalizado en el presente modelo se encuentra en medio de dos fases de almacenamiento. La evaluación sobre el mismo por cómputo cuántico no se encuentra fácil habida cuenta por donde es relanzado el algoritmo a probar y las pruebas pasadas no cumplen con las premisas que observamos de cara a la mayoría de algoritmos. (Hernández Encinas, 2024)

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Las pruebas experimentales del esquema de firma digital post-cuántica XMSS (eXtended Merkle Signature Scheme)

permitió evaluar la viabilidad operativa del modelo propuesto en entornos reales de computación, especialmente aquellos orientados a su integración en redes blockchain. Para ello, se diseñó un entorno de pruebas con capacidad técnica mínima para enfrentar las elevadas demandas computacionales que implica este tipo de criptografía, particularmente en la generación de claves, construcción de árboles de Merkle y ejecución intensiva de funciones hash seguras. Cabe mencionar que se utilizó Ubuntu para estas pruebas, es algo tardado ya que en un inicio se hicieron en Windows 11 y es mas lento y hay muchas limitantes a nivel se software, paquetes, librerías, motivo por el cual se descartó.

5. CONCLUSIONES

La implementación de firmas digitales post-cuánticas como XMSS, junto con estructuras criptográficas como los árboles de Merkle, puede beneficiarse enormemente del uso de tecnologías de cómputo paralelo a través de las GPU de NVIDIA. Aunque muchas bibliotecas actuales no ofrecen soporte nativo para el procesamiento acelerado por hardware, frameworks como CuPy, PyTorch y Numba permiten adaptar y optimizar operaciones difíciles, como funciones hash y la generación de nodos en árboles binarios.

Esta integración no solo acorta los tiempos de cómputo, sino que también permite escenarios de mayor concurrencia, lo cual es especialmente importante en entornos blockchain que requieren altas demandas de verificación y seguridad. La combinación de las herramientas adecuadas con una arquitectura de hardware robusta permite escalar estos esquemas criptográficos hacia aplicaciones reales que sean seguras y eficientes.

Como recomendaciones y sugerencias finales se sugiere lo siguiente:

Compatibilidad limitada: muchas bibliotecas de criptografía post-cuántica y herramientas relacionadas están mejor optimizadas para sistemas Linux/Unix. Esto podría generar complicaciones adicionales en Windows, especialmente cuando se trata de compilar dependencias nativas en C/C++.

Uso de GPU y CUDA: si la intención es aprovechar la aceleración con GPU NVIDIA, se necesitará instalar correctamente los controladores de NVIDIA, el toolkit CUDA y, en muchos casos, WSL2 (Windows Subsystem for Linux), ya que algunas bibliotecas y scripts asumen que estás en un entorno tipo Unix.

Por otro lado, se recomienda encarecidamente usar Ubuntu 22.04 LTS como sistema operativo base para este tipo de proyectos funcione lo mejor posible ya que su estabilidad y soporte extendido (hasta 2032) lo hacen ideal para investigaciones a largo plazo. También ofrece una gran compatibilidad con herramientas científicas, criptográficas, controladores de GPU y bibliotecas como OpenSSL, PyTorch, NumPy.

REFERENCIAS

Bernardi-Espín, E. O., & Quimiz-Moreira, M. A. (2024). Incidencia de la computación cuántica en los algoritmos criptográficos. Código Científico Revista de Investigación, 5(1), 627-650. itslosandes.net

Hernández Encinas, L. (2024). Futuros Estándares de la Criptografía Postcuántica.

Salmerón, G. H. (2024). Desarrollo de Sistema Criptográfico basado en Curvas Elípticas para Firmas Digitales. uaq.mx

Arcos Muñoz, N. (2023). Modelo de identidad digital para documentos administrativos mediante firma electrónica y BlockChain. udistrital.edu.co

Zapata, P. A. M. & Robles, C. A. P. (2024). Tecnología blockchain y mecanismos de lucha contra la corrupción. JUEES. uees.edu.ec

Ramírez Puertas, P. (2022). Introducción a la computación cuántica y sus aplicaciones. uca.es

Señor Sánchez, J. (2021). Aplicación de sistemas post-cuánticos a la seguridad en nodos de internet of things. upm.es

San Miguel Martín, P. (2023). Diseño y desarrollo de un algoritmo eficiente y seguro de firma digital ECDSA para su uso en protocolos blockchain.upm.es

Sánchez, C. R. (2022). Blockchain: Funcionamiento y pertinencia en sectores públicos y privados. Interconectando Saberes. uv.mx

Del-Pozo-Puñal, E., Garcia-Carballeira, F., Camarmas-Alonso, D., & Calderón, A. (2024, junio). Evaluación del rendimiento de un sistema de ficheros para sistemas IoT. XXXIV Jornadas del Paralelismo (JP23/24), A Coruña, Galicia, España. https://doi.org/10.5281/zenodo.12094742

Ríos Reyes, Jairo Aldair, Vásquez Chiclayo, Renzo Yanpier, & Mendoza de los Santos, Alberto Carlos. (2023). MÉTODOS EMERGENTES DE AUDITORÍA EN INTEGRIDAD DE DATOS EN LA NUBE: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LAS ÚLTIMAS TENDENCIAS. Investigación & Desarrollo, 23(1), 107-116. Epub 31 de julio de 2023.https://doi.org/10.23881/idupbo.023.1-8i

Palacios-Razo, L., & Sun, G. (2024). Avances de la computación cuántica en México. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, *12*(23), 51-58. https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.11467

Hülsing, A., Rijneveld, J., & Kamp, M. (2020). SPHINCS+: Submission to the NIST post-quantum cryptography standardization project. Retrieved from https://sphincs.org/

Ghosh, A., Sinha, A., & Mandal, A. (2021). "GPU Acceleration of Hash-Based Post-Quantum Signature Schemes". IEEE Transactions on Computers, 70(10), 1643–1656.

Estimation and Recording of Visual Depth Using a Camera and a Point Laser.

Jiménez Díaz, Gilberto *, Sólis Sánchez, Luis *, Castañeda Miranda, Celina*, Martínez Blanco, Rosario, Moreno Lucio, Mireya, Olvera Olvera, Carlos, Aguilar Ríos, Jazmín

** Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica,Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas", Zacatecas 98000, Mexico.*
e-mail: gilberto.jimenez, lsolis, celina@uaz.edu.mx.

Abstract: *The present work addresses one of the fundamental methodologies for capturing three-dimensional spatial information, applying geometric triangulation techniques. Calculations are used to estimate the visual depth of the optical field, employing mixed techniques for capturing points in space, which are then transformed into three-dimensional coordinates. The system used for data acquisition consists of a parallel array of a CMOS sensor housed in a commercial camera and a long-range laser diode with a wavelength of 532 nm. A green luminous point is projected onto a surface, and its position is recorded on video using the camera, performing a point-by-point scanning process. Subsequently, through video and image processing, a cloud of digitized spatial points is obtained, which is then transformed into spatial coordinates in the X, Y, Z planes using algebraic operations. With this spatial data, coordinates are established that can describe the depth of field in terms of distance, and thus determine the position of each point in space, referenced in relation to the optical center of the camera axis. As a result of this work, the geometric study and the principles of application for exploration, registration, scanning, and spatial reconstruction are presented.*

Keywords: Sensor, point cloud, laser.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de barrido láser se utilizan cada vez más para tareas de registro y análisis de estructuras o geometrías utilizando métodos fotogramétricos y topográficos, presentando al usuario una representación en un cumulo de puntos llamada nube de puntos, se han venido utilizando en una diversidad y gama de aplicaciones como los son: metrología, levantamientos topográficos, construcción, ingeniería inversa. Una nube de puntos escaneada puede parecer tener una resolución espacial muy alta en virtud de un intervalo de muestreo. La resolución espacial real puede ser mucho menor si la anchura del haz es grande en relación con el intervalo de muestreo, será de importancia poder establecer los parámetros que contengan la correcta relación, para así obtener una resolución adecuada con Lichti (2019) mencionando este tipo de relación, y con Bernardini et al. (1999) desarrollaron el algoritmo Ball-Pivoting para mejorar la reconstrucción tridimencional. La actual investigación está encaminado al análisis de la metodología para la captura de puntos coordenados en X, Y, Z, con un sensor CMOS de una cámara comercial y un láser puntualde largo alcance, siendo de especial interés las que resulten de difícil acceso para un equipo especializado o bien para un usuario ya sea en espacios exteriores e interiores, facilitando la captura de perfiles geometricos para su posterior análisis y reproducción digital. Las funciones básicas que definen una tarea de escaneo en tres dimenciones, es registrar una nube digital de puntos coordenados en los planos geométricos, para luego hacer la reconstrucción y mostrar el perfil geometrico de alguna estructura. Por lo tanto, el escáneo dada la configuración física y, tarea consignada, podría ser: fijo, móvil, de contacto o medición indirecta y, por la metodología usada para el registro de datos del espacio tridimencional, podría ser, tiempo de vuelo, diferencia de fase, o bien detección de campo electromagnético a su vez, dada estas configuraciones y metodologías se puede englobar entonces en sistemas pasivos o activos, siendo los pasivos los sistemas que capturan imágenes y no requieren de un punto de referencia proyectado y, los activos como los sistemas de proyección dado un sistema de referencia proyectado fijo, dentro de las metodologías de registro se aplican técnicas de geometría óptica de triangulación o bien de emisión y recepción de señales los autores Melendreras Ruiz, Marín Torres y Sánchez Allegue (2022) ha usado estas descripciones para referirse a los diferentes sistemas.

2. DESARROLLO

El modelo básico para el proceso de transformación del mundo a una imagen se puede establecer dadas las coordenadas

$(X, Y, Z) \rightarrow (x, y)$ donde el primer grupo de coordenadas corresponde a un punto en el escenario tridimensional y el segundo conjunto de coordenadas, correspondientes a un plano imagen. Tomando en consideración de que el eje z está alineado al plano de coordenadas global. Siendo que, para obtener dicha transformación, es necesario realizar relaciones trigonométricas, se obtiene que:

$$\frac{x}{\lambda} = \frac{X}{Z-\lambda} \qquad (1)$$

y además:

$$\frac{y}{\lambda} = \frac{Y}{Z-\lambda} \qquad (2)$$

considerando que el centro del plano imagen ésta en el origen $(0,0,\lambda)$, donde λ es la distancia focal del plano imagen a la lente. Con las Ec. 1 y Ec. 2 anteriores se obtiene :

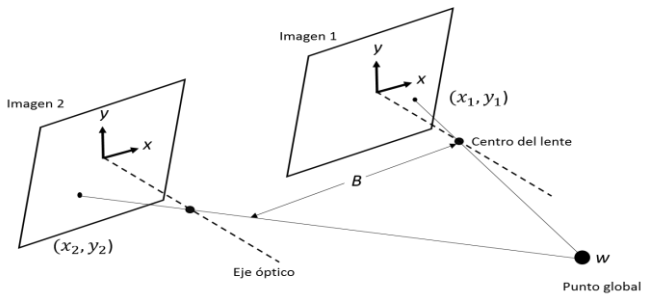
$$x = \frac{\lambda X}{\lambda - Z} \qquad (3)$$

además:

$$y = \frac{\lambda y}{\lambda - Z} \qquad (4)$$

Por lo tanto, ahora se puede conocer la correspondencia en entre algún punto en el escenario 3D, y su correspondiente en el plano imagen (x, y).

Dadas las relaciones geométricas anteriores, se considera entonces una metodología en la que intervienen dos puntos de vista observando hacia uno sólo, a este proceso se le denomina estereoscopía, que consiste fundamentalmente en tener un mismo punto w del plano en X, Y, Z proyectado en dos imágenes diferentes obteniendo entonces coordenadas en (x_1, y_1) y (x_2, y_2) en imagen 1 e imagen 2 respectivamente, así como se aprecia en la siguiente diagrama, véase figura 1.



1.- Modelo estereoscópico

3. OBJETIVO

El objetivo de este método es conocer las coordenadas (X, Y, Z) del punto w, planteando para este sistema las siguientes formulaciones donde

$$X_1 = \frac{x_1}{\lambda}(\lambda - Z_1) \qquad (5)$$

y además,

$$X_2 = \frac{x_2}{\lambda}(\lambda - Z_2) \qquad (6)$$

y Tomando en cuenta que la separación entre las cámaras, y que la coordenada Z de w son la misma referencia de coordenadas en las dos imágenes entonces se tiene:

$$X_2 = X_1 + B \qquad (7)$$

Y también con:

$$Z_2 = Z_1 = Z \qquad (8)$$

Donde a B se denomina como la distancia de la línea base, entre las dos cámaras, las consideraciones que este método implica es que las dos cámaras son iguales y que el sistema de ubicación del plano X, Y del sistema global están alineados al plano x, y del plano imagen para cada una de ellas. Aplicando la igualdad se obtiene la ecuación:

$$X_1 = \frac{x_1}{\lambda}(\lambda - Z) \qquad (9)$$

para obtener la coordenada de Z o profundidad se sustituyen e igualan las ecuaciones para obtener la ecuación

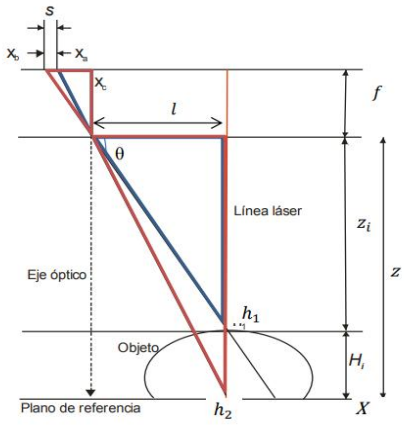
$$X_1 + B = \frac{x_2}{\lambda}(\lambda - Z) \qquad (10)$$

Por último, haciendo restas se llega a la siguiente solución,

$$Z = \lambda - \frac{\lambda B}{x_2 - x_1} \qquad (11)$$

Este procedimiento de análisis permite ahora asentar que conociendo las coordenadas x_2 y x_1 en la imagen y estableciendo la distancia entre los sensores en su línea base y conocida la distancia focal λ es posible calcular el valor de Z en el punto w. El conocimiento sobre el manejo del modelo estereoscópico ha permitido que se puedan plantear diferentes aplicaciones, proponiendo soluciones para casos muy específicos, ya sea a nivel comercial, para uso industrial o personal siendo que González y Woods (2018) han presentado una actualización de su obra clásica sobre procesamiento de imagen y relaciones trigonométricas espaciales que en este trabajo hemos tomado los conceptos de sobre dicho tema.

Dentro de los métodos de adquisición del valor de profundidad óptica, que aplica el trabajo de investigación con Felipe, C.R. (2013), el cual establece que a partir del modelo geométrico de proyección de imagen, véase figura 2, y planteando que con una cámara y un láser de luz estructurada lineal, es posible determinar la altura de un objeto, siendo esta la diferencia entre el punto proyectado en el plano imagen, con respecto a un segundo punto que contiene un desface con respecto al primer punto, si este desface existe entonces habrá una diferencia de profundidad por lo tanto esa será la altura del objeto.



2.- Planteamiento geométrico para un modelo mono cámara con un láser lineal.

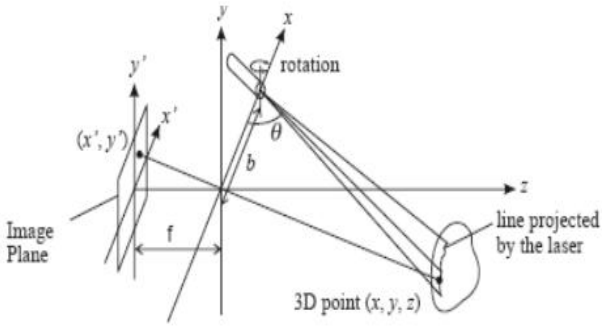
Como base de análisis planteado en la figura 2, se tiene que, al proyectar el haz de luz láser lineal sobre un objeto este denota un desplazamiento del punto h_1 en relación a h_2 con respecto al plano de referencia lo que se formula como la ecuación

$$s = x_a - x_b \qquad (12)$$

determinando entonces que x_a , x_b se ubican en la posición de la línea proyectada sobre el plano imagen. Dado este fenómeno, entonces se puede llegar a la relación de la altura h_1 , logrando que el cálculo quede como:

$$h_1 = \frac{z\,(x_b - x_a)}{x_b - x_c} \qquad (13)$$

con la ecuación anterior se logra encontrar la altura real de un objeto a lo largo del plano imagen a partir de los pixeles proyectados. Del siguiente trabajo con Peiravi, A. & Taabbodi, B. (2010) que infiere sobre las técnicas de triangulación láser, y propone un tipo de geometría basado en el arreglo utilizado como en la imagen de la figura 3, haciendo hincapié en un método que combina dos láseres de luz estructurada con diferente frecuencia, que visualmente se aprecian como luz láser roja y luz láser verde.



3.- Sistema de triangulación.

Para la obtención de la nube de puntos se precisa como en otros casos de estudio, poder determinar un punto de interés en el espacio tridimensional, siendo de vital importancia la profundidad de campo. Este proyecto reporta con el análisis las siguientes formulaciones siendo:

$$x = \frac{bx'}{f\cot\theta - x'} \qquad (14)$$

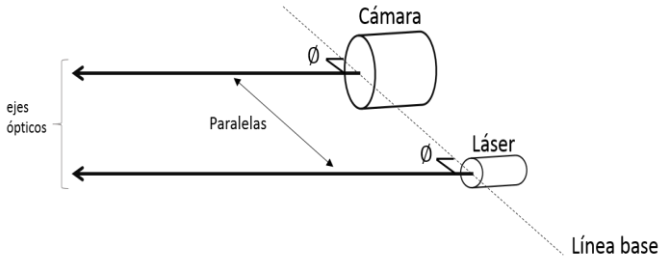
además,

$$y = \frac{by'}{f\cot\theta - x'} \qquad (15)$$

y también,

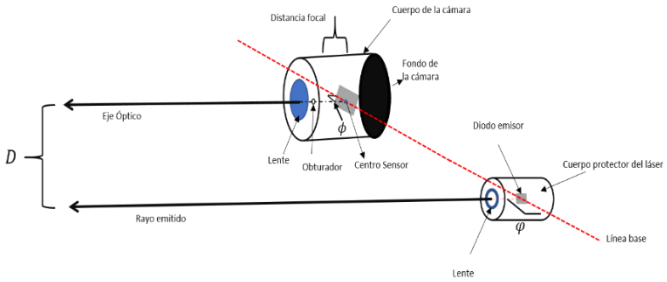
$$z = \frac{bf'}{f\cot\theta - x'} \qquad (16)$$

donde b es la base, θ es el ángulo del láser y f es la distancia focal, dadas entonces las definiciones de las coordenadas en el mundo siendo que Peiravi y Taabbodi (2010), en su estudio ya referido, hace incapie en la importancia de usar esta metodología, entonces se conocer la ubicación del punto de interés proyectado a el plano imagen, para su posterior análisis digital. Teniendo un sensor CMOS y un láser de 530nm, se formula la posibilidad de obtener, la dimensión que represente la profundidad de campo visual. Para tal fin, se parte de un arreglo con la cámara y el láser, estableciendo la configuración como en la figura 4, la cámara estará en paralelo al láser haciendo coincidir los puntos de recepción y emisión respectivamente a lo largo de la misma línea del plano. Ambos elementos ubicarán sus puntos ópticos en perpendicular con el plano base, como se aprecia en la figura 4, conformando un diagrama de posiciones.



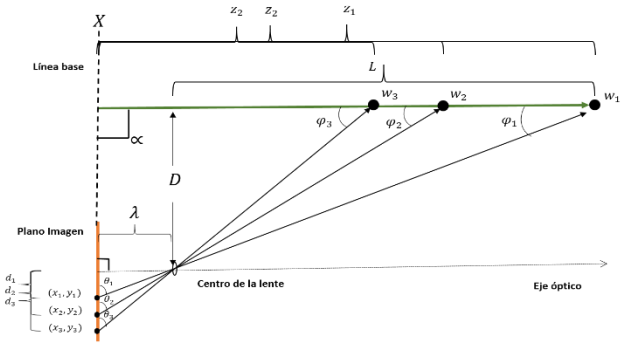
4.- Diagrama de formulación de posiciones, cámara y láser.

En dónde Ø definen el ángulo con la línea base en relación al eje óptico, tanto en la cámara como en el láser respectivamente. El láser, compuesto con un diodo emisor de 530nm que emite un rayo colimado, es necesario que se encuentre en perpendicular con respecto a la línea base y muestra la relación del ángulo Ø, sabiendo que esté debe de ser de 90º grados con respecto a línea base.



5.- Condiciones del arreglo propuesto

Dado el arreglo de láser y cámara, como se observan en la figura 5, se puede plantear las condiciones de análisis de geometrías y dimensiones para los cálculos analíticos en la cámara, tomando como referencia la figura 6, se tiene que D es la distancia en entre el centro óptico y el centro del rayo láser emitido siendo que el ángulo $\propto$,es de 90º con respecto a la línea base. Para una mejor perspectiva y su posterior análisis, se pueden apreciar en la figura 6, donde se puede definir la distancia focal λ, así como las coordenadas (u, v). los factores anteriores son parámetros intrínsecos que se pueden obtener al aplicar el proceso de calibración a la cámara



6.- Relación geométrica del sistema cámara y láser

donde X es el eje del marco global, W_1 es el punto en el espacio tridimensional, D es la distancia entre el sensor y el rayo láser proyectado partiendo de la ubicación del lente, λ es la distancia focal, d es la distancia que hay del centro del sensor a la coordenada (x, y) en el plano imagen del punto proyectado, la línea punteada, es la línea base que indica la linealidad que existe entre el sensor de la cámara y el rayo láser proyectado, con las referencias anteriores, se calculará por trigonometría, Z y los ángulos θ_i, φ_i, resultando las siguientes relaciones trigonométricas:

$$\tan \varphi_i = \frac{D}{Z} \qquad (17)$$

además,

$$L_i = \frac{D}{\operatorname{Cos} \varphi_i} \qquad (18)$$

de la figura 5, en la que muestra la variación de profundidad descrito por Z_1, Z_2, Z_3, por la posición de un objeto en el plano tridimensional representado en W_1, W_2, W_3, respectivamente, esto proporciona una coordenada (x_i, y_i) para cada punto proyectado sobre el plano imagen, obteniendo la variable d_i y conociendo λ se puede calcular el ángulo con:

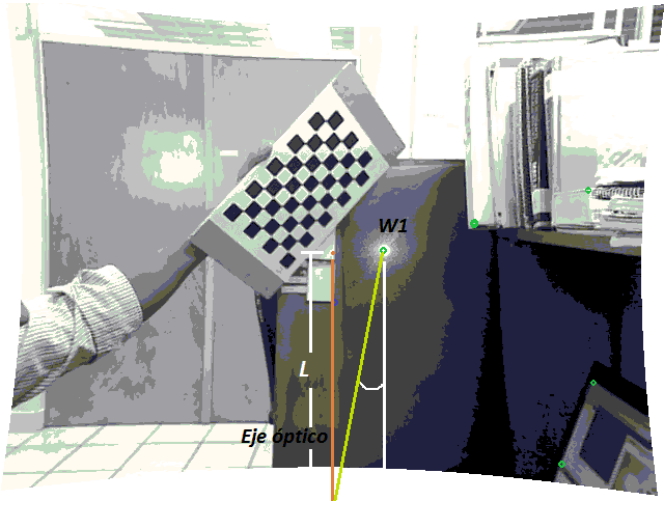
$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{d_i}{\lambda} \qquad (19)$$

y por lo tanto se calcula el valor de:

$$\varphi_i = 180 - 90 - \theta_i \qquad (20)$$

Y la distancia Z o profundidad se determina con

$$Z_i = L_i + \lambda \qquad (21)$$



7.- Imagen procesada digitalmente.

El proceso para determinar la profundidad óptica implica hacer procesamiento de imagen para hacer corrección de la deformación del lente, una vez obtenida la imagen las condiciones algebraicas se aplican teniendo la referencia de los puntos de interés que se describen en el análisis matemático hecho anteriormente, se puede ubicar el punto W, en el eje x para obtener el punto d_1 y sabiendo λ y D, se calcula y obtiene Z.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un método para estimar la profundidad óptica, basado en la triangulación geométrica que se dispone en un arreglo de un sensor CMOS y un diodo láser de 532nm. La precisión de las medidas obtenidas depende de la calibración de la cámara, así como de la resolución en pixeles, y del valor de profundidad que se quiere estimar; es importante mencionar que existe una relación óptica entre la resolución y la profundidad a calcular. El hecho de usar un láser requiere de un protocolo de seguridad que debe aplicarse según los estándares ANSI Z136.1 12.2 antes de comenzar a operar con el láser. Además, se asume que el eje de la cámara es paralelo al eje del sensor, en caso de no poder garantizarlo se requiere

de un proceso de rectificación que permita garantizar dicho paralelismo, de no obtenerse se verá reflejado en los objetos que difieran en distancias de profundidad considerables, dando esto un error de cálculo. En el futuro, se integrará un sistema Pan-Tilt con el que se pretende llevar a cabo el barrido del punto láser en dos direcciones, horizontal y vertical. Lo anterior generará una malla virtual de puntos coordenados en los planos x, y, z que permitirán, por software de apoyo en reconstrucción 3D, obtener digitalmente la característica física del elemento u objeto escaneado. Además, se puede hacer registro de manera indirecta y a distancias seguras para el usuario, optimizando el trabajo para el registro, y disminuir el riesgo de accidente al momento de capturar geometrías, además de que podrá ser dirigido a áreas muy específicas al acoplarse el sistema pan-tilt para lograr el barrido puntual.

Lichti, D.D. (2019) *The Impact of the Distribution of Observations on Terrestrial Laser Scanner Self-Calibration Quality*, ResearchGate. Disponible en: ResearchGate

Bernardini, F., Mittleman, J., Rushmeier, H., Silva, C. & Taubin, G. (1999) *The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction*, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 5(4), pp. 349-359. Disponible en: NYU Scholars

Melendreras Ruiz, R., Marín Torres, M.T. & Sánchez Allegue, P. (2022). *Comparative Analysis Between the Main 3D Scanning Techniques: Photogrammetry, Terrestrial Laser Scanner, and Structured Light Scanner in Religious Imagery: The Case of The Holy Christ of the Blood*. Journal on Computing and Cultural Heritage, 15(1), pp. 1-23. Disponible en: ScienceGate.

González, R.C. & Woods, R.E. (2018) *Digital Image Processing*, 4th edn. Pearson. Disponible en: Google Scholar

Felipe, C.R. (2013) *Sistema de Reconstrucción 3D Multicámara*. Tesis de Maestría, Centro de Investigaciones en Óptica A.C, León, Gto., México.

Peiravi, A. & Taabbodi, B. (2010) *A Reliable 3D Laser Triangulation-based Scanner with a New Simple but Accurate Procedure for Finding Scanner Parameters*, Marsland Press Journal of American Science, 6(5), pp. 80-85. Disponible en: ResearchGate

Using Process Products for Business Process Integration

Eyzel Aritzu Valencia Tapia*. Olivia Graciela Fragoso Díaz*
Juan Carlos Rojas Pérez*. Nimrod González Franco*.
** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*
Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México.

(e-mail: {m23ce086, olivia.fd, juan.rp, nimrod.gf}@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: This study presents the design and implementation of a technological solution to automate deliverables in the processes of a financial organization in Mexico, with the primary objective of improving operational efficiency and strategic alignment through structured results. The research focuses on generating key deliverables such as credit assessment reports, digital contracts, and automatic notifications to validate process execution and improve their traceability. A modular architecture was developed consisting of six web services built with Python and Node.js, integrated with a PostgreSQL database for information management. The system was designed to optimize credit application flows, ensuring standardized results while maintaining flexibility for adaptation to other domains. Testing with Postman validated the functionality, data accuracy, and consistency of the generated deliverables. The results confirmed that the services correctly produce and record outputs, accessible to authorized users, improving process control and reducing manual intervention. The proposed approach demonstrates that automating deliverables rather than focusing solely on process transitions improves standardization, execution quality, and organizational agility by providing verifiable results at each stage. The findings suggest that this methodology not only optimizes operational performance but also offers a scalable framework applicable to other sectors requiring structured process validation. The study highlights how automating deliverables significantly contributes to optimizing operational efficiency, strengthening process transparency, and fostering a culture of continuous improvement within organizations.

Keywords: Business Process, Web Services, Integrating Business Process, Automatization, Products.

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo empresarial, los procesos de negocio son el corazón que impulsa las operaciones y asegura que las organizaciones funcionen de manera eficiente y efectiva [3]. Una empresa, independientemente de su tamaño o sector, está compuesta por una serie de actividades interconectadas que, cuando se gestionan adecuadamente, permiten alcanzar objetivos estratégicos y satisfacer las necesidades de los clientes. Los procesos de negocio son precisamente estas secuencias de tareas y actividades diseñadas para transformar insumos en resultados valiosos, ya sea un producto, un servicio o una experiencia [3].

Al definir, estandarizar y optimizar los procesos de negocio, las organizaciones pueden mejorar su eficiencia, productividad y competitividad, adaptarse a los cambios del mercado, y ofrecer un mejor servicio a sus clientes, para lograr esto, la integración de procesos de negocio es un factor clave. Al conectar las diferentes áreas y funciones de una empresa, la integración asegura que los datos fluyan sin problemas, que las decisiones se tomen con información precisa y que los recursos se utilicen de manera óptima. Además, mejora la experiencia del cliente, reduce errores y permite a la empresa adaptarse rápidamente a los cambios en el entorno empresarial [4].

Cuando las organizaciones tienen documentados sus procesos de negocio, estos describen cuales son los atributos de sus productos. Sin embargo, hay tareas que no se llevan a cabo de acuerdo con el proceso y por lo mismo los resultados se generan de manera incorrecta [5].

El propósito de este trabajo es diseñar e implementar una solución tecnológica basada en servicios web que permita automatizar la generación de productos o entregables en procesos de negocio, con el fin de validar la ejecución de actividades clave, garantizar la disponibilidad de resultados estructurados, y fortalecer la integración operativa en una organización financiera.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

La literatura revisada se clasifica en cinco grupos principales: Integración por Datos o Base de Datos, RPA (Robotic Process Automation), Blockchain, Sistemas y Gestión de la Cadena de Suministro (SCM).

2.1. Bases de Datos o Datos.

El trabajo que se considera relevante es de Popoola et al., 2024, los autores explican que los analistas de negocios utilizan varias herramientas y procesos para facilitar la integración entre las necesidades comerciales y las soluciones tecnológicas, los autores resaltan la importancia de la integración de procesos de negocio para mejorar la eficiencia organizacional mediante datos y bases de datos

estructuradas, por lo anterior, los autores sugieren que los analistas de negocio son actores clave en este proceso.

2.2. RPA (Robotic Process Automation).

En el estudio realizado por (König *et al.*, 2020) se examina cómo la integración de RPA con la Inteligencia Artificial (IA) puede transformar la gestión de procesos de negocios. Los autores subrayan la relevancia de combinar estas tecnologías para alcanzar una automatización inteligente, y proponen un marco orientado a optimizar las operaciones mediante procesos más eficientes y precisos. En su investigación, se describe la implementación de un sistema de Automatización Inteligente de Procesos (IPA) que integra RPA con IA, con el propósito de mejorar y automatizar procesos empresariales en distintas industrias a través de la conexión con bases de datos.

Por otro lado, (Rosemann *et al.*, 2024) abordan la evolución del Business Process Management (BPM) frente a los desafíos actuales, destacando su adaptación a las tecnologías emergentes, especialmente la IA. Sostienen que los enfoques tradicionales en el diseño de procesos carecen de la flexibilidad necesaria para responder a entornos cambiantes. En este contexto, proponen un sistema BPM potenciado por IA que permite incrementar la automatización, la flexibilidad y la eficiencia operativa de las organizaciones.

2.3 Blockchain.

(Yang *et al.*, 2020) plantean que tecnologías emergentes como blockchain pueden constituir una solución efectiva para la integración de procesos de negocio en el sector de la construcción. Esta tecnología proporciona una plataforma que permite automatizar y rastrear transacciones a lo largo del ciclo de vida de un proyecto, lo que incrementa significativamente la transparencia y reduce las oportunidades de fraude. Además, se presenta como una herramienta clave para facilitar la integración de información y procesos entre las distintas partes interesadas involucradas en un proyecto constructivo.

El estudio también propone la utilización de blockchains públicas y privadas de forma complementaria para distintos componentes del proceso de construcción. Esta estrategia de integración tecnológica tiene el potencial de mejorar la eficiencia operativa, minimizar disputas relacionadas con pagos y asegurar la trazabilidad de materiales y contratos en toda la cadena de suministro.

Por otro lado, en el trabajo de Viriyasitavat *et al.*(2020), se plantea como objetivo principal de mejorar la eficiencia, agilidad e integración de los procesos de negocio mediante la incorporación de blockchain. La propuesta presentada por los autores se orienta al desarrollo de una solución que permita:

1. Seleccionar y componer servicios automáticamente en un entorno distribuido.
2. Garantizar la confianza y seguridad en la información mediante contratos inteligentes.
3. Reducir los costos operativos al eliminar intermediarios tradicionales en la gestión de servicios.

2.4. Sistemas.

(Picón, Fontana y Martin, 2014), realizan la integración de procesos de negocio (BPI) mediante el uso de Servicios Web y Arquitecturas Orientadas a Servicios (SOA), utilizando herramientas y tecnologías específicas para lograr esta integración de Sistemas, mencionan el uso de Workflows como una parte importante en la automatización de los procesos de negocio. En el contexto de la Gestión de Procesos de Negocio (BPM), los Workflows permiten la ejecución controlada y coordinada de actividades dentro de un proceso, ya sea de manera semi-automática o totalmente automática, en un motor de procesos.

De manera complementaria(Adenekan et al., 2024), consideran la integración de procesos de negocios como un factor clave para mejorar la productividad, especialmente cuando se integran sistemas de Gestión de la Cadena de Suministro (SCM) y Planificación de Recursos Empresariales (ERP) con el apoyo de IA. Esta integración de procesos se enfoca en conectar diferentes áreas funcionales dentro de la organización para trabajar de manera más eficiente y coordinada. Los autores subrayan que la incorporación de IA en los procesos de negocio permite a las empresas volverse más ágiles y competitivas. Al optimizar tanto la cadena de suministro como los procesos operativos internos, se logran reducciones significativas en los costos, se minimizan los tiempos de entrega y se mejora la satisfacción del cliente, elementos que en conjunto fortalecen la posición competitiva de la organización en el mercado.

En línea con esta perspectiva, Olorunyomi et al. (2024) y Mc Loughlin et al. (2023) resaltan la relevancia de la transformación digital como medio para facilitar la integración de procesos de negocio. Su análisis enfatiza cómo esta transformación puede incrementar la eficiencia operativa, promover la innovación, y mejorar la experiencia del cliente. No obstante, también se identifican desafíos importantes, como la incompatibilidad de sistemas heredados, los altos costos de implementación, la brecha de habilidades digitales y los riesgos asociados a la ciberseguridad. Ambos estudios coinciden en el uso de herramientas como RPA, ERP y BPM para abordar estos retos.

2.5. Gestión de la Cadena de Suministro (SCM).

El estudio de Basana et al. (2024) señala que la integración de la cadena de suministro (SCM) facilita la coordinación y colaboración entre las empresas y sus socios estratégicos. Esta integración contempla varios aspectos clave que contribuyen al mejoramiento del rendimiento organizacional:

1. Intercambio de información: Permite mejorar la calidad de los productos y procesos mediante el acceso a información crítica en tiempo real entre socios comerciales y departamentos internos.

2. Integración de calidad: Involucra a proveedores y clientes en la gestión de calidad, garantizando el

mantenimiento de altos estándares en toda la cadena de valor.

3. Sistemas de innovación: Favorece la adopción de nuevas tecnologías y una rápida respuesta a las demandas del mercado, lo que se traduce en un mejor desempeño empresarial.

Para analizar el impacto de esta integración, los autores emplean SmartPLS versión 4.0, una herramienta estadística utilizada para realizar análisis descriptivos y pruebas de hipótesis, resultando fundamental para evaluar los efectos de la integración SCM sobre el rendimiento organizacional.

La Tabla 1 presenta una clasificación de estudios previos según el dominio de integración de procesos de negocio al que pertenecen. Se estructura en dos columnas: la primera identifica el dominio de integración, y la segunda enumera los trabajos relacionados mediante referencias numeradas.

Tabla 1. Trabajos relacionados

Dominio	Trabajos relacionados
Integración por datos o Base de Datos	[10]
Integración por Sistemas	[9], [1], [6], [4].
Integración por RPA	[7], [11]
Integración por Blockchain	[13], [14].
Integración por SCM	[2]

En la actualidad, nuevas tecnologías se han convertido en pilares fundamentales en la integración de procesos de negocios. Analistas, investigadores y desarrolladores están implementando estas tecnologías para mejorar la eficiencia y la efectividad en las operaciones empresariales.

A pesar de la creciente adopción de estas herramientas, muchos estudios y análisis recientes no abordan de manera exhaustiva cómo se lleva a cabo la integración de procesos de negocio ni cómo se comunican las actividades entre ellas para llegar a un producto o entregable final. Esto plantea un desafío en la implementación efectiva, ya que la falta de claridad sobre la interacción entre procesos puede dificultar el logro de una integración fluida y eficiente.

3. METODOLOGÍA

La presente investigación adopta un enfoque aplicado y exploratorio, cuyo objetivo es analizar e implementar una solución tecnológica orientada a la automatización de entregables en procesos de negocio dentro de una Sociedad Financiera de Objeto Múltiple (SOFOM) en México.

El estudio toma como referencia la propuesta de Ruíz (2023), quien documentó la integración de procesos mediante servicios web para mejorar el seguimiento de procesos clave. El objetivo principal de esta tesis fue desarrollar un marco de servicios web para integrar los procesos de negocio de las Sociedades Financieras de Objeto Múltiple (SOFOM), eliminando la dependencia entre herramientas tecnológicas y sistemas de información que dificultan la interoperabilidad y eficiencia operativa.

El autor desarrolló cuatro servicios web principales:

- SOFTNI-SyncPrestatario: Gestiona datos de prestatarios (RFC, dirección, documentos, etc.).
- SOFTNI-SyncEvaluacion: Evalúa la factibilidad de créditos.
- SOFTNI-SyncProyecto: Administra información de proyectos financiados.
- SOFTNI-SyncFiles: Almacena y recupera documentos (contratos, identificaciones).

Todos los servicios se conectan a una base de datos y son consumidos por un front-end que simula una SOFOM. Además, el autor realizó Diagramas de Casos de Uso, en donde se modelaron escenarios como "Sincronización de datos de prestatario" (CU1) y "Acceso a base de datos" (CU2), mostrando la interacción entre actores (ej. responsables de procesos) y servicios, como se muestra en la Figura 1. Ejemplo:

- CU1 (Sincronización de prestatarios): Permite a los procesos de análisis de crédito y seguimiento acceder a datos de prestatarios.
- CU4 (Evaluación de crédito): Comunica el resultado del análisis al proceso de formalización.

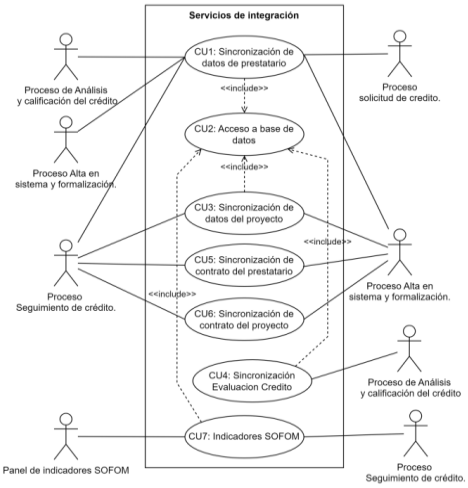


Fig. 1. Diagrama de casos de uso. Extraída de (Ruíz, 2023).

Los resultados obtuvieron puntos importantes como:

- Interoperabilidad: Los servicios permitieron la integración eficiente entre procesos como solicitud de crédito, análisis y seguimiento.
- Pruebas Exitosas: Se validaron 6 casos de prueba (ej.: sincronización de datos, carga de documentos) con el front-end y Postman.
- Seguridad: Se implementó autenticación con Passport.js para acceder al sistema.

Una vez teniendo el contexto, en esta investigación, se amplía dicho enfoque mediante el diseño e implementación de un conjunto de servicios web que generan productos intermedios, que validan la correcta ejecución de las actividades en el flujo de trabajo.

3.1 Procesos identificados

Como parte del estudio, se identificaron dos procesos de negocio clave dentro de la operación de la SOFOM [12], los cuales fueron analizados en detalle considerando sus propósitos, objetivos, entradas, salidas, actividades, tareas, actores responsables y reglas de negocio asociadas:

- Alta en Sistema y Formalización
- Seguimiento de Crédito

La Figura 2 presenta el proceso de Alta en Sistema y Formalización, el cual está compuesto por dos etapas fundamentales. Este proceso tiene como objetivo principal gestionar la incorporación de clientes y proyectos al sistema de forma estructurada y segura, asegurando que se cumplan los requisitos documentales y operativos previos a la formalización de contratos.



Fig. 2. Proceso de Alta en Sistema y Formalización. Extraída de Ruíz (2023).

Etapas del proceso:

- Etapa 1: Registro de Prestatario

En esta fase se recopila y almacena en el repositorio de conocimiento la información correspondiente al cliente, ya sea persona física o moral.

- Etapa 2: Registro de Proyecto

Se registra el proyecto propuesto por el prestatario, especificando su duración estimada, presupuesto y objetivos técnicos, con el fin de evaluar su viabilidad antes de su formalización.

Objetivos del proceso:

- O1: Identificar la documentación faltante que impida la formalización del contrato con el prestatario.
- O2: Identificar la documentación faltante que impida la formalización del contrato del proyecto.
- O3: Garantizar la seguridad y confidencialidad de la información asociada a cada cliente.

3.2 Especificación de requerimientos

Durante el proceso de desarrollo del software, se adoptó el estándar internacional ISO/IEC 12207, el cual proporciona un marco estructurado para los procesos del ciclo de vida del software. En este trabajo, se aplicó particularmente la fase de especificación de requerimientos, con el objetivo de definir las funcionalidades necesarias para la generación automatizada de productos o entregables.

La Tabla 2 presenta los requerimientos funcionales identificados, los cuales están alineados con las actividades clave del proceso de negocio. Cada requerimiento busca garantizar que las tareas del flujo de trabajo puedan ejecutarse correctamente y que los productos sean generados de forma estructurada y verificable.

Tabla 2. Especificación de requerimientos

No.	Requerimientos de Software Alta de Sistema y Formalización	
	ID	Descripción
	Etapa 1: Registro de Prestatario	
1	**R01**	El sistema debe poder extraer información financiera relevante del usuario, como ingresos, historial de crédito, deudas actuales, etc.
2	**R02**	El sistema debe crear plantillas de contrato que puedan ser llenadas con la información del prestatario.
3	**R03**	El sistema debe generar un reporte con la evaluación de la factibilidad de crédito.
4	**R04**	El sistema debe enviar correos electrónicos a una plataforma como Gmail para ser notificados cuando un contrato esté listo para revisión.
5	**R05**	El sistema debe utilizar APIs de servicios de firma digital como DocuSign para permitir la firma electrónica de contratos.

3.3 Análisis y diseño del sistema

Una vez definidos los requerimientos funcionales con base en el estándar ISO/IEC 12207, se procedió a la fase de análisis y diseño. En esta etapa se desarrolló un diagrama general de casos de uso (ver Figura 3), que representa las principales funcionalidades del sistema desde la perspectiva del usuario. Debido a las limitaciones del documento, se detalla a continuación únicamente el Caso de Uso 8 (CU8): Generar Reporte, uno de los componentes clave del sistema.

El CU8: Generar Reporte tiene como propósito permitir al Estructurador de Crédito ingresar información bancaria del prestatario, incluyendo nombre, ingresos mensuales, deudas e historial crediticio. Posteriormente, el Dictaminador de Cumplimiento Legal puede generar el reporte financiero correspondiente. Este caso de uso responde a los requerimientos funcionales R01 y R03 previamente definidos (ver Tabla 2).

Precondiciones:

- El sistema debe estar operativo.
- El usuario debe tener acceso al módulo correspondiente según su rol.
- Los datos del solicitante deben estar disponibles para ser ingresados.

Postcondiciones:

- Se genera un reporte financiero.
- El reporte queda registrado en el sistema.

- El Dictaminador de Cumplimiento Legal puede consultar el reporte.

Escenario principal de éxito:
El Estructurador de Crédito accede al sistema y selecciona la opción “Generar Reporte”.
El sistema inicia los siguientes subcasos de uso:

- Se introduce el nombre del prestatario.
- Se registran los ingresos mensuales.
- Se ingresan las deudas activas del prestatario.
- Se incluye la puntuación o historial crediticio.

Una vez implementado el escenario principal, se procedió a modelar escenarios alternos de éxito y escenarios de fallo, con el objetivo de garantizar una ejecución robusta frente a posibles variaciones o errores en los datos ingresados.

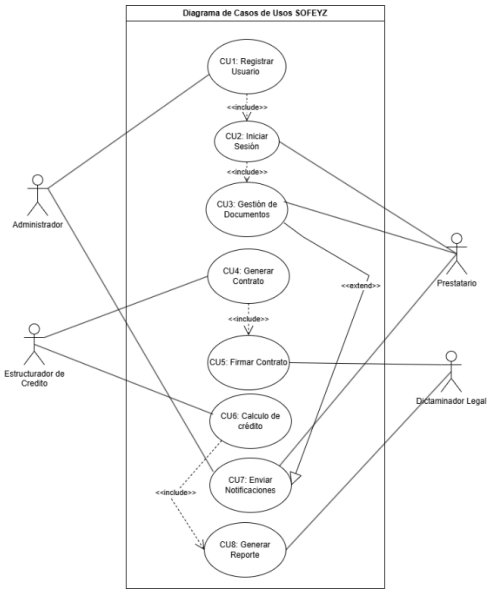


Fig. 3. Diagrama de casos de uso general

3.4 Implementación de servicios web

A partir del análisis de requerimientos y el diseño funcional del sistema, se decidió desarrollar un conjunto de seis servicios web, cada uno orientado a ejecutar una actividad específica del proceso de negocio y generar un producto o entregable asociado, los cuales son:

- auht-service
- calculo-credito-service
- contract-service
- document-management-service
- notification-service
- report-service

La implementación se realizó utilizando Node.js y Python para la lógica de negocio, y PostgreSQL como sistema de gestión de bases de datos, empleado para almacenar información de usuarios, roles y otros datos relevantes.
Debido a las limitaciones de espacio del presente documento, se describe a continuación únicamente uno de estos servicios: el Servicio de Reportes.
Servicio de Reportes (report-service)
El propósito de este servicio es generar reportes de evaluación crediticia en formato PDF (u otros formatos requeridos por la organización). Para ello, se utilizó la biblioteca ReportLab, especializada en la creación dinámica de archivos PDF mediante Python en el backend. El servicio expone un endpoint denominado generate-report, el cual realiza las siguientes funciones:

1. Recibe los datos financieros del prestatario.
2. Calcula una probabilidad de aprobación en función de los datos recibidos.
3. Genera un archivo PDF con la información y lo almacena para su posterior consulta.

La Figura 4 muestra un fragmento del código desarrollado en Python que ilustra el proceso de generación del reporte y su almacenamiento.
Etapas del proceso de generación:

- Generación del nombre y ruta del archivo PDF: Se crea un nombre único utilizando una marca de tiempo, y se define su ubicación en el sistema de almacenamiento.
- Creación y escritura del contenido en el PDF: El documento PDF incluye información relevante como el nombre del solicitante, ingresos, deudas, historial crediticio, probabilidad de aprobación y la decisión final del crédito.
- Registro del reporte en un archivo JSON: Con el fin de mantener un índice estructurado, los metadatos del archivo generado se almacenan en un archivo JSON, lo que permite una gestión sencilla y una rápida recuperación futura de los reportes.

```python
# Crear el reporte PDF
timestamp = datetime.datetime.now().strftime("%Y%m%d%H%M%S")
report_filename = f"credit_report_{timestamp}.pdf"
report_path = os.path.join(REPORTS_FOLDER, report_filename)

c = canvas.Canvas(report_path, pagesize=letter)
c.setFont("Helvetica", 12)

# Escribir contenido en el PDF
c.drawString(100, 750, "Reporte de Evaluación de Crédito")
c.drawString(100, 730, "-" * 50)
c.drawString(100, 700, f"Nombre: {name}")
c.drawString(100, 680, f"Ingresos: ${ingresos}")
c.drawString(100, 660, f"Deudas: ${deudas}")
c.drawString(100, 640, f"Historial de Crédito: {historial_crediticio}")
c.drawString(100, 620, f"Probabilidad de Aprobación: {approval_probability:.2f}")
c.drawString(100, 600, f"Aprobación: {'Sí' if approved else 'No'}")
c.drawString(100, 580, f"Generado el: {datetime.datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')}")
c.save()

# Registrar el reporte en el índice
report_entry = {
    "name": name,
    "filename": report_filename,
    "path": report_path,
    "generated_at": datetime.datetime.now().isoformat()
}
with open(REPORTS_INDEX_FILE, 'r+') as f:
    reports = json.load(f)
    reports.append(report_entry)
    f.seek(0)
    json.dump(reports, f, indent=4)
```

Fig. 4. Servicio de Reportes

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

La solución implementada fue validada mediante un conjunto de pruebas funcionales enfocadas en la generación de entregables estructurados, sin depender de procesos específicos. En lugar de centrarse en la secuencia tradicional de actividades, la validación se orientó a confirmar que los servicios desarrollados pudieran generar productos tangibles con información completa, y listos para ser utilizados por distintos actores dentro de la organización.

La arquitectura propuesta se basa en servicios web independientes, cada uno diseñado para cumplir con una función específica, como generar reportes, emitir constancias, registrar seguimientos, validar documentación, firmar electrónicamente y notificar eventos. Estas funcionalidades fueron desarrolladas para ser adaptables y reutilizables en distintos contextos, lo que

permite aplicar esta solución en diversos entornos empresariales donde se requiera validar la ejecución de actividades a través de productos digitales.

El sistema fue probado con diferentes escenarios, verificando la correcta generación de entregables, su registro estructurado y su disponibilidad para consulta posterior. La validación también incluyó pruebas de acceso según roles definidos, comprobando que los productos fueran visibles solo para los perfiles autorizados. El enfoque por productos permite, además, centralizar el control de calidad y asegurar la trazabilidad de cada actividad completada, sin depender de la ejecución lineal de un proceso predefinido.

En resumen, esta solución demuestra que automatizar entregable clave puede funcionar como un mecanismo efectivo para monitorear, validar y optimizar la ejecución de procesos en distintos dominios organizacionales.

5. CONCLUSIONES

Mientras que (Ruíz, 2023) se centró en modelar e implementar servicios que habilitan la comunicación entre etapas del proceso, esta propuesta introduce la automatización de productos generados por cada actividad, verificando que estos se cumplan. Particularmente, se desarrolló e implementó el Servicio de Reportes, orientado a la generación automatizada de evaluaciones crediticias en formato PDF, y se propusieron criterios de validación basados en la calidad del producto generado.

Esta evolución del enfoque permite:

- Enfocar la evaluación del sistema en los resultados obtenidos, asegurando que cada entregable refleje el cumplimiento real de los objetivos del negocio.
- Asegurar un seguimiento claro de los entregables a través de estructuras de datos organizadas en archivos JSON.
- Garantizar la accesibilidad de los productos generados para distintos perfiles dentro de la organización.

Los productos generados (documentos, reportes, contratos) actúan como puntos de conexión entre etapas del proceso, facilitando la transición de información y validando que cada actividad cumpla con los requisitos antes de avanzar. Al definir entregables claros (ej. evaluación de crédito, contratos digitales), se alinean las metas operativas con las estratégicas, asegurando que cada proceso contribuya directamente a los resultados del negocio.

En función de los resultados obtenidos y la validación realizada, se puede afirmar que el propósito del trabajo fue cumplido satisfactoriamente. La implementación de una solución tecnológica basada en servicios web permitió automatizar la generación de productos, los cuales actúan como evidencia tangible de la ejecución de actividades dentro de distintos flujos de trabajo.

Esta estrategia no solo facilitó el seguimiento estructurado de la información y el control operativo, sino que también mostró ser escalable, adaptable y aplicable a otros contextos organizacionales. El enfoque orientado a productos ofreció una alternativa funcional y eficiente para validar el cumplimiento de tareas sin depender de procesos predefinidos, lo que confirma la viabilidad y relevancia de la propuesta.

REFERENCIAS

[1] Adenekan, N.O.A., Solomon, N.N.O., Simpa, N.P. and Obasi, N.S.C. (2024). Enhancing manufacturing productivity: A review of AI-driven supply chain management optimization and ERP systems integration. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 6(5), 1607–1624. https://doi.org/10.51594/ijmer.v6i5.1126

[2] Basana, S.R., Malelak, M.I., Suprapto, W., Siagian, H. and Tarigan, Z.J.H. (2023). The impact of SCM integration on business performance through information sharing, quality integration and innovation system. *Uncertain Supply Chain Management*, 12(1), 435–448. https://doi.org/10.5267/j.uscm.2023.9.008

[3] Dumas, M., Rosa, L.M., Mendling, J. and Reijers, A.H. (2013). *Fundamentals of business process management* (2nd ed.). Springer-Verlag GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33143-5

[4] Hammer, M. and Stanton, S. (1999). How process enterprises really work. *Harvard Business Review*, November–December. Available at: http://radcliff.group/data/documents/How%20Process%20Enterprises%20Really%20Work.pdf (Accessed: 13 April 2025).

[5] Harmon, P. (2014). *Business process change: A business process management guide for managers and process professionals* (3rd ed.). Morgan Kaufmann, Waltham, MA.

[6] Joel, N.O.S., Oyewole, N.A.T., Odunaiya, N.O.G. and Soyombo, N.O.T. (2024). The impact of digital transformation on business development strategies: Trends, challenges, and opportunities analyzed. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(3), 617–624. https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.3.0706

[7] König, M., Bein, L., Nikaj, A. and Weske, M. (2020). Integrating robotic process automation into business process management. In *Lecture Notes in Business Information Processing* (pp. 132–146). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58779-6_9

[8] Loughlin, K.M., Lewis, K., Lascelles, D. and Nudurupati, S. (2021). Sustainability in supply chains: Reappraising business process management. *Production Planning & Control*, 34(1), 19–52. https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1884764

[9] Picón, D., Fontana, F. and Martin, A.E. (2014). Integración de procesos de negocio aplicando servicios web. *Informes Científicos - Técnicos UNPA*, 6(2), 57–89. https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v6i2.94

[10] Popoola, N.O.A., Adama, N.H.E., Okeke, N.C.D. and Akinoso, N.A.E. (2024). The strategy value of business analysts in enhancing organizational efficiency and operations. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 6(4), 1288–1303. https://doi.org/10.51594/ijmer.v6i4.1059

[11] Rosemann, M., Brocke, J.V., Van Looy, A. and Santoro, F. (2024). Business process management in the age of AI – three essential drifts. *Information Systems and e-Business Management*, 22(3), 415–429. https://doi.org/10.1007/s10257-024-00689-9

[12] Ruíz Padilla, E.V. (2023). *Marco de servicios para entidades SOFOM* [Unpublished master's thesis]. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

[13] Viriyasitavat, W., Da Xu, L., Bi, Z. and Sapsomboon, A. (2018). Blockchain-based business process management (BPM) framework for service composition in industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(7), 1737–1748. https://doi.org/10.1007/s10845-018-1422-y

[14] Yang, R., Wakefield, R., Lyu, S., Jayasuriya, S., Han, F., Yi, X., Yang, X., Amarasinghe, G. and Chen, S. (2020). Public and private blockchain in construction business process and information integration. *Automation in Construction*, 118, 103276. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103276

Computer Vision for Workplace Safety: Automated Detection of Face Masks and Helmets

Flores Arcos, Daniel Misael *, Barragán Pérez, Omar*, Limón Hernández, Martha Eugenia *, Sánchez Jiménez, Miguel *, Odriozola Avilés, Emmanuel * Alcántara Pérez, Juan *

** TecNM/ Tecnológico de Estudios Superiores de Cuautitlán Izcalli, Fracción la Coyotera del Ejido, Av. Nopaltepec, Av San Antonio s/n, Industrial Cuamatla, Cuautitlán Izcalli, Méx, 54748.*
(e-mail: {daniel.fa, omar.bp }@cuautitlan.tecnm.mx).

Abstract: The automated detection of personal protective equipment (PPE) has gained relevance in various sectors, especially in industry and public health. This study presents the development of a computer vision-based system for real-time identification of face masks and safety helmets using convolutional neural networks (CNNs). Unlike previous approaches such as those by Massiris et al. (2018, 2020) or Benítez-Baltazar et al. (2023), which rely on more complex setups or less adaptable algorithms, our system prioritizes low-cost implementation and real-time performance on modest hardware. This makes it particularly suitable for broader deployment in environments like factories, hospitals, and public spaces. Preliminary results show high accuracy in detecting face masks and helmets under controlled conditions, although challenges remain in scenarios with variable lighting and different viewing angles. This work contributes to the development of technological solutions that enhance safety and regulatory compliance through the automation of PPE monitoring.

Keywords: computer vision, PPE detection, convolutional neural networks, workplace safety.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de equipo de protección personal (EPP) en entornos industriales, hospitalarios y espacios públicos es fundamental para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores y la población en general. En los últimos años, la implementación de tecnologías basadas en visión artificial ha permitido el desarrollo de sistemas autónomos para la detección de EPP, incluyendo mascarillas y cascos de seguridad.

La pandemia de COVID-19 evidenció la importancia del uso obligatorio de cubrebocas en espacios cerrados, lo que impulsó la necesidad de sistemas de monitoreo automatizados que aseguren su cumplimiento (Benítez-Baltazar et al., 2023; Cortés Aguilar y Tovar Arriaga, 2023; NOM-017-STPS-2008; Flores Arcos e Ibarra Martínez, 2023). El uso de cubrebocas ha demostrado reducir significativamente la propagación de enfermedades respiratorias, con estudios que indican hasta un 70% de efectividad en la reducción de contagios (Rivera, 2022). Asimismo, el uso de cascos de seguridad es una medida esencial para prevenir accidentes en entornos laborales, particularmente en la industria de la construcción y manufactura (Massiris et al., 2018).

Diferentes enfoques han sido propuestos para abordar esta problemática. Por ejemplo, Benítez-Baltazar et al. desarrollaron un sistema de detección autónoma de cubrebocas basado en aprendizaje profundo e Internet de las Cosas (IoT), demostrando la viabilidad de estos métodos para la vigilancia en tiempo real. Por otro lado, Massiris et al. aplicaron redes neuronales convolucionales, específicamente YOLO, para la detección de equipos de protección personal en entornos industriales, optimizando la precisión y velocidad de identificación. Adicionalmente, Cortés Aguilar y Tovar Arriaga emplearon el método de la bolsa de palabras visuales (BoVW) para la detección del uso de cascos de seguridad en trabajadores (Massiris et al., 2018; Oliveira-Teixeira et al., 2021).

Estos avances han permitido el desarrollo de sistemas cada vez más eficientes y versátiles. Sin embargo, aún existen desafíos relacionados con la precisión de detección en condiciones de iluminación variables, la capacidad de generalización de los modelos y la integración con sistemas de control de acceso. En este contexto, el presente trabajo propone el desarrollo de un sistema de detección de cubrebocas y cascos de seguridad mediante visión artificial, el cual puede ser implementado en hospitales, espacios públicos e industrias para restringir el acceso a aquellas personas que no cumplan con los requisitos de seguridad establecidos (Oviedo Agramonte, 2023; Vivanco, 2023). Actualmente, el sistema desarrollado cuenta con un funcionamiento operativo que permite la identificación de cubrebocas y cascos en tiempo real. No obstante, aún es necesario profundizar en las pruebas experimentales para evaluar su desempeño en distintos escenarios y validar su precisión en diversas condiciones de iluminación y ángulos de detección. A diferencia de los trabajos previos, este sistema ha sido diseñado específicamente para ejecutarse en hardware de bajo costo, sin comprometer la eficiencia en tiempo real. Mientras que otras propuestas como las de Massiris et al. o Benítez-Baltazar et al. (2023) destacan por sus enfoques potentes, pero con mayores requerimientos computacionales o

limitaciones en entornos específicos, esta investigación apuesta por una solución más accesible y adaptable a contextos con recursos limitados, como pequeñas empresas o instituciones públicas. A través de este estudio, se busca contribuir al desarrollo de tecnologías que permitan mejorar las condiciones de seguridad en diversos sectores, reduciendo riesgos de contagio y accidentes laborales mediante la automatización del monitoreo de EPP.

2. METODOLOGÍA

El sistema de detección de cubrebocas y cascos de seguridad fue desarrollado utilizando visión artificial y técnicas de aprendizaje profundo en combinación con hardware y software específicos. La Figura 1 ilustra la metodología general implementada.

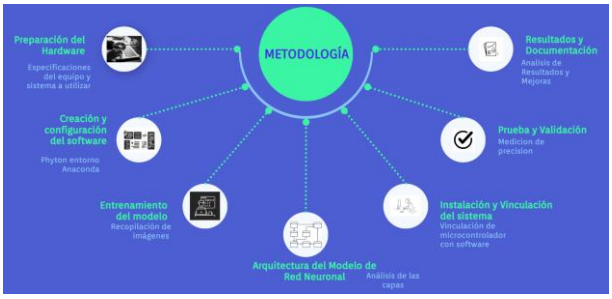


Fig. 1. Metodología utilizada para el desarrollo del sistema de detección de EPP mediante visión artificial

Para la captura de imágenes en tiempo real, se utilizó una cámara Logitech C920 HD Pro Webcam (1080p, 30 fps), que permitió obtener imágenes de alta calidad para la posterior detección. El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo en una computadora con procesador Intel Core i5, y la interacción con los sensores y actuadores fue gestionada mediante una placa Arduino Uno, conectada a un sensor ultrasónico (rango de 1.7 a 400 cm), un display LCD 16x2 con módulo I2C y focos piloto que indican el estado del sistema (verde para detección exitosa, rojo para no detección de EPP). La detección de EPP se realizó mediante programación en Python utilizando la librería OpenCV (cv2) para el procesamiento de imágenes y PIL (Pillow) para la manipulación de imágenes. OS se empleó para la gestión de archivos y threading permitió optimizar la actualización de la interfaz gráfica en tiempo real. Para el control de la placa Arduino, se utilizó Arduino IDE.

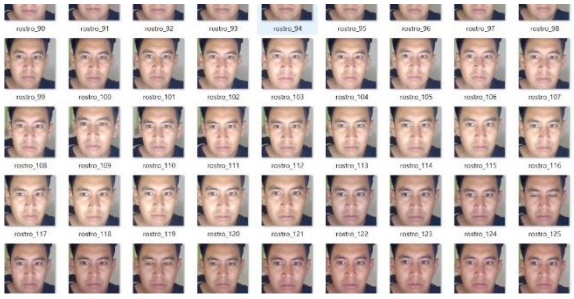


Fig. 2. Imágenes del dataset utilizado para la detección de personas sin cubrebocas y sin casco.

La Figura 3 muestra la base de datos utilizada con rostros con cubrebocas. El sistema se entrenó utilizando un dataset que consistió en 2,000 imágenes reales obtenidas mediante la cámara, divididas en cuatro clases: 500 imágenes de personas sin cubrebocas ni casco, 500 de personas sin cubrebocas con casco, 500 de personas con cubrebocas sin casco y 500 de personas con cubrebocas y casco. Las imágenes fueron redimensionadas a 150x150 píxeles, con preprocesamiento que incluyó mejora de contraste y corrección de iluminación. Se generó un clasificador en formato Haar (cascada de clasificadores) que permite la detección facial en tiempo real, que se utiliza específicamente para la localización de rostros en la imagen.



Fig. 3. Imágenes del dataset utilizado para la detección de cubrebocas. Las imágenes incluyen variabilidad en términos de ángulos de visión, condiciones de iluminación

El sistema no utiliza un modelo preentrenado ni transferencia de aprendizaje, sino que se entrena directamente un modelo de red neuronal convolucional (CNN) desde cero, específicamente diseñado para la clasificación de imágenes de EPP. El modelo CNN está compuesto por las siguientes capas:
Capa de entrada: Recibe imágenes redimensionadas a 150x150 píxeles.
Capas convolucionales (Conv): Dos capas de convolución con filtros de 32 y 64, seguidas de capas de max pooling (Pool) para reducción de dimensionalidad.
Capas totalmente conectadas (FC): Una capa densa con 128 neuronas que procesa las características extraídas por las capas convolucionales. Dropout: Se utilizó un valor de Dropout del 0.5 para evitar el sobreajuste durante el entrenamiento.
Capa de salida: Con una función de activación softmax para clasificar las imágenes en las cuatro categorías: personas sin EPP y con EPP completo (cubrebocas y casco).

Para el entrenamiento de la red neuronal, se utilizó el algoritmo de optimización Adam, con una tasa de aprendizaje inicial de 0.001. La función de activación para las capas ocultas fue ReLU, mientras que para la capa de salida se utilizó softmax.
El sistema de clasificación en tiempo real se basó en la creación de un modelo Haar para la detección de rostros, lo que permite localizar las áreas de la imagen donde se lleva a cabo la clasificación del uso del EPP. Este clasificador Haar se entrenó específicamente con el dataset de rostros, con el fin de crear un modelo que pueda detectar con precisión la presencia de cubrebocas y cascos en la imagen.

El proceso de detección en el sistema se lleva a cabo en dos etapas: primero, el clasificador Haar detecta las áreas de la imagen donde están los rostros, y luego el modelo CNN

procesa estas áreas para verificar si la persona está usando cubrebocas y/o casco.

Para la instalación del sistema, se utilizó una estructura inicial de madera, consistente en una estructura rectangular que alberga el dispositivo, el sensor de detección y los mecanismos de vinculación, la Figura 4 representa el prototipo estructural e instalación utilizada en esta etapa del proyecto.

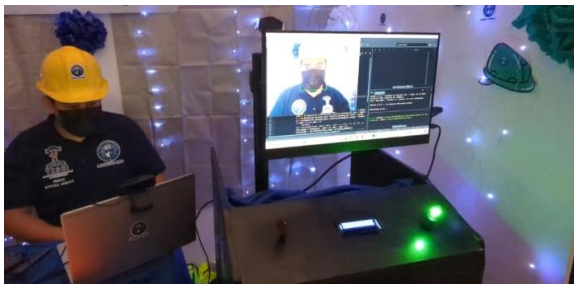


Fig. 4. Prototipo estructural del sistema de detección de EPP, mostrando la instalación del hardware (cámara, sensor, display LCD) y la interfaz física que permite la supervisión en tiempo real del funcionamiento del sistema. La imagen también muestra la integración de los indicadores visuales de estado (focos verde y rojo).

Cuando una persona es detectada, se enciende un foco verde si cuenta con el equipo de protección personal completo, y un foco rojo si no cumple con los requisitos de EPP, impidiendo el acceso. En trabajos futuros, se implementará una pluma que permita el acceso automático.

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

El sistema propuesto alcanzó una precisión del 95% en la detección de personas que cumplen con el uso adecuado de equipo de protección personal (EPP), incluyendo el cubrebocas y el casco de seguridad. Este alto nivel de desempeño se atribuye a la calidad del dataset utilizado, el preprocesamiento eficiente de las imágenes, y el uso de algoritmos de visión por computadora optimizados mediante la librería OpenCV.

Durante las pruebas realizadas en condiciones reales, que incluyeron variaciones en la iluminación, diferentes ángulos de captura y diversidad en los sujetos evaluados, se obtuvo un recall del 90%, lo que indica una capacidad sólida del sistema para detectar correctamente a los individuos que portan el EPP requerido. Asimismo, el F1-score fue del 93%, lo cual refleja un equilibrio robusto entre precisión y exhaustividad en las detecciones.

La Figura 5 muestra la interfaz de funcionamiento del sistema durante la detección activa de cubrebocas en una persona, permitiendo observar en tiempo real el resultado de la inferencia realizada por el modelo de visión artificial.

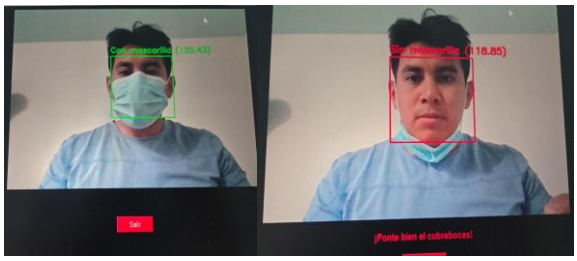


Fig. 5. Interfaz del sistema en ejecución con detección de cubrebocas, mostrando la respuesta visual generada tras el reconocimiento correcto del EPP.

Además, el sistema presentó un valor de Intersección sobre Unión (IoU) del 98%, lo que demuestra una localización sumamente precisa de los objetos dentro del campo visual de la cámara. Este nivel de exactitud es crítico para aplicaciones donde se requiere una verificación clara del cumplimiento de normas de seguridad visualmente evidentes.

En cuanto al rendimiento en tiempo real, el sistema demostró una latencia promedio de 0.05 segundos, lo que confirma su viabilidad para aplicaciones en entornos que requieren respuesta inmediata, tales como líneas de producción, hospitales o instalaciones públicas con control de acceso automatizado.

Estos resultados reafirman la viabilidad práctica del sistema, no solo en términos de precisión y velocidad, sino también por su bajo costo y capacidad de adaptarse a múltiples contextos. Sin embargo, se identificaron algunas áreas de mejora: por ejemplo, su rendimiento se ve afectado en condiciones de iluminación bajas, por lo que se propone integrar iluminación auxiliar o adaptar el preprocesamiento para mejorar la detección en estos escenarios. También se considera como una futura línea de mejora la integración del sistema con controles de acceso más avanzados, como lectores de tarjetas o escaneo de código QR.

3.1 Discusión

Comparado con trabajos previos, como el de Benítez-Baltazar et al. (2024) y el de Massiris et al. (2018), el presente sistema supera en métricas clave como precisión, IoU y tiempo de respuesta, destacando su potencial para ser implementado en contextos reales con requerimientos estrictos de monitoreo de seguridad.

Además, el enfoque combinado de redes neuronales y visión artificial clásica ha permitido desarrollar una solución híbrida, eficiente y adaptable. Esto lo convierte en una opción altamente competitiva frente a modelos más complejos o de mayor costo computacional, especialmente en el contexto post-pandemia, donde la vigilancia del cumplimiento de normas de bioseguridad sigue siendo una prioridad en diversos sectores productivos.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación del sistema de detección de cubrebocas y cascos de seguridad mediante visión artificial demostró ser una solución efectiva y viable para reforzar la seguridad en espacios industriales, hospitalarios y de acceso

público. Se logró una precisión del 95%, un recall del 90%, un F1-score del 93%, y un IoU del 98%, métricas que confirman la capacidad del sistema para identificar de forma precisa el uso de equipos de protección personal (EPP). La interfaz desarrollada, junto con indicadores luminosos, permitió una interacción inmediata para el cumplimiento visual de las medidas de seguridad.

Entre los logros técnicos, se destaca la detección en tiempo real con una latencia registrada de 0.05 segundos (50 ms), medida utilizando herramientas de depuración y temporización en Python. No obstante, esta cifra puede estar sujeta a variabilidad dependiendo del hardware, por lo que se recomienda realizar evaluaciones más exhaustivas sobre el rendimiento en diferentes plataformas.

En cuanto a las limitaciones, se observó una disminución en el rendimiento bajo condiciones de iluminación extremadamente bajas, así como la necesidad de mejorar la integración con sistemas externos como puertas de control de acceso o plataformas de gestión de personal. También es relevante considerar la escalabilidad del sistema cuando se enfrenta a un mayor flujo de personas o cámaras simultáneas.

Como proyección futura, se sugiere implementar técnicas de mejora de imagen (image enhancement) y aprendizaje profundo más avanzado, además de probar modelos de detección más recientes que mejoren la robustez en entornos complejos. Asimismo, se propone ampliar el estudio con una muestra más representativa y escenarios diversos para validar la generalización del sistema.

Finalmente, el sistema puede tener aplicaciones específicas en: Control de acceso automatizado vinculado al cumplimiento de EPP, Registro digital de eventos con y sin cumplimiento para fines estadísticos, Generación de alertas en tiempo real cuando no se detecte el uso adecuado del equipo de protección. Estas aplicaciones hacen del sistema una herramienta con alto potencial para integrarse a soluciones de seguridad industrial y sanitaria, contribuyendo activamente a la prevención de riesgos laborales y epidemiológicos.

REFERENCIAS

Benítez-Baltazar, V.H., Pacheco-Ramírez, J.H., Moreno-Ruiz, J.R. & Nuñez-Gurrola, C. (2023) 'Autonomic face mask detection with deep learning: an IoT application', *Universidad de Sonora*.

Cortés Aguilar, T.A. & Tovar Arriaga, A. (2023) 'Safety helmet wearing detection in workers images using the Bag of Visual Words (BoVW) method', *unpublished*.

Flores Arcos, D.M. & Ibarra Martínez, H. (2023) 'Sistema auxiliar de medidas sanitarias para la detección de personas con cubrebocas', *Revista Digital Innovación Científica y Tecnológica en las Ingenierías*, 6(6), pp. [348-351]. ISSN: 2594-2131. TecNM-TESCo, México.

Massiris, M., Fernández, J.A., Bajo, J. & Delrieux, C. (2020) 'Sistema automatizado para monitorear el uso de equipos de protección personal en la industria de la construcción', *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 18(1), pp. 68–74. doi: 10.4995/riai.2020.13243.

Massiris, M., Delrieux, C. & Fernández, J.A. (2018) 'Detección de equipos de protección personal mediante red neuronal convolucional YOLO', en *Actas de las XXXIX Jornadas de Automática*, Badajoz, España, pp. 1022-1029. doi: 10.17979/spudc.9788497497565.1022.

NOM-017-STPS-2008 (2008) 'Equipo de Protección Personal, selección, uso y manejo en los centros de trabajo', *Secretaría de Trabajo y Previsión Social, México*. Disponible en: www.dof.gob.mx (Recuperado el 19 de junio de 2023).

Oliveira-Teixeira, F., Donadon-Homem, T.P. & Pereira-Junior, A. (2021) 'Aplicación de inteligencia artificial para monitorear el uso de mascarillas de protección', *Revista Científica General José María Córdova*, 19(33), pp. 205–222. doi: https://doi.org/10.21830/19006586.725.

Oviedo Agramonte, D.A. (2023) 'Implementación de un sistema de detección de equipos de protección personal mediante visión artificial para trabajadores del sector industrial', *unpublished*.

Rivera, V. (2022, 10 octubre) 'Reduce el uso de cubrebocas la probabilidad de contagios por covid-19 hasta un 70%', *Red Universidad de Guadalajara*. Disponible en: https://sems.udg.mx/noticias/reduce-el-uso-de-cubrebocas-la-probabilidad-de-contagios-por-covid-19-hasta-en-un-70.

S, S. (2021, 7 febrero) 'Detector de presencia: cómo funciona y cómo se conecta', *Sistemas de Ventilación*. Disponible en: https://www.solerpalau.com/es-es/blog/detector-de-presencia-como-funciona-y-como-se-conecta/.

Vivanco, W.J.J. (2023) 'Diseño de un prototipo que ayude a la detección basándose en técnicas de visión artificial con ESP32 CAM para el monitoreo del uso de los equipos de protección personal', *unpublished*.

LabVIEW interface implementation for data acquisition in real time monitoring of ceramic materials using dielectric spectroscopy

Adame Téllez, David Ulises[1], Prado Olivarez, Juan[1], Espinosa Calderón, Alejandro[2], Benítez Castro, Angélica[3,4], Muñoz Saldaña, Juan[3], López Kinney, Kevin Gerald[1].

[1]Tecnológico Nacional de México en Celaya, Calle Antonio García Cubas

Pte No.600 esq. Av. Tecnológico, C.P.38010, Celaya, Gto. México, (e-mail: {m2403101, juan.prado, 18031088}@itcelaya.edu.mx)[2]Tecnológico Nacional de México, Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo (CRODE) de Celaya, Calle Diego Arenas Guzmán No. 901, Col. Zona de Oro, C.P. 38020, Celaya, Gto. México. (e-mail: alejandro.espinosa@crodecelaya.edu.mx*)*

[3] Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Lib. Norponiente 2000, Fracc. Real de Juriquilla, C.P. 76230, Querétaro, Qro, México

(email: {angelica.benitez, jmunoz}@cinvestav.mx)

[4] Institute of Glass and Ceramics, Department of Materials Science and Engineering, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, C.P. 91058, Erlangen, Germany.

Abstract: In the development and design of piezoelectric ceramic materials, one of the greatest obstacles to the research of new materials is the lack of equipment capable of controlling both frequency and temperature, and capable of performing necessary and fundamental tasks such as real-time data reading, data storage, and the use of analytical tools. For this reason, this research aims to develop a dielectric spectroscopy system designed to characterize ceramic materials by measuring their dielectric properties across a range of frequencies. The system will utilize an LCR analyzer, integrated with a LabVIEW-based software platform for real-time data monitoring, storage, and analysis. The proposed system seeks to improve materials characterization through a comprehensive, automated approach that minimizes manual intervention and ensures accurate and reproducible results. Future work will focus on implementing autonomous temperature control to create a complete and efficient system, and it will also include data analysis tools, such as curve recognition, which will further automate processes and streamline research in this field. Expected results include a more efficient and reliable approach to studying dielectric properties, contributing to advances in materials science and piezoelectric applications.

Keywords: LabVIEW, digital protocols, instrumentation, piezoelectric materials, material characterization.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales cerámicos piezoeléctricos generan cargas eléctricas en su superficie cuando se les aplica un esfuerzo mecánico (efecto piezoeléctrico directo), y también experimentan deformaciones geométricas cuando se les aplica un campo eléctrico (efecto piezoeléctrico inverso). Estos fenómenos fueron descubiertos en el cuarzo por Pierre y Jacques Curie en 1880 y por Gabriel Lippmann en 1881, respectivamente (Uchino, 2017).

La evolución histórica de los materiales cerámicos piezoeléctricos incluye desde el cuarzo y la sal de Rochelle hasta compuestos más modernos como en los titanatos, el niobato de litio, los materiales ferroeléctricos, y las perovskitas, entre otros. En términos de aplicaciones, estos materiales son fundamentales en la fabricación de dispositivos como transductores, sensores, actuadores, dispositivos de ondas acústicas superficiales (SAW) y sistemas de control de frecuencia.

Para el diseño de estos nuevos materiales, el uso de equipo de medición mediante espectroscopía eléctrica como los puentes o analizadores LCR es fundamental, con ellos es posible caracterizar todos estos materiales y validar o rechazar su diseño analizando su respuesta a estímulos específicos en frecuencia.

Esta caracterización debe ser precisa y eficiente, es un proceso complejo que a menudo requiere decenas o cientos de pruebas para obtener resultados confiables. Una de las problemáticas en la caracterización de materiales cerámicos piezoeléctricos, es la ausencia de equipos que puedan realizar estas pruebas de manera autónoma, logrando controlar por sí mismos los estímulos (en este caso la frecuencia) y realizar operaciones básicas para el análisis de todos los datos obtenidos, muchos de los equipos también carecen de una interfaz amigable e

intuitiva para el usuario, limitando sólo a herramientas de lectura, siendo incapaces de realizar otras tareas fundamentales para este proceso.

Por ello, el objetivo de este artículo es desarrollar un sistema basado en una interfaz en LabVIEW capaz de realizar mediciones en materiales cerámicos piezoeléctricos mediante un analizador de la marca Keysight, capaz de programar mediciones autónomas, obteniendo todos los datos en tiempo real, ofreciendo herramientas de almacenamiento y visualización de éstos.

El Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo (CRODE) de Celaya, Gto, Mexico., es una institución incorporada al Tecnológico Nacional de México (TecNM), que se dedica a desarrollar equipos a la medida de las necesidades de empresas y de investigación.

El Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados (CINVESTAV) en Querétaro, Qro, México., es uno de los centros nacionales más importantes en diseño y fabricación de materiales piezoeléctricos en México. En este proyecto colabora el TecNM con CINVESTAV para alcanzar el objetivo en descrito anteriormente.

2. ESTADO DEL ARTE

Aunque nuestro enfoque principal es el campo de materiales cerámicos para su caracterización y posterior uso en sensores ultrasónicos, médicos y mecánicos (Ye et al., 2024; Haydoura et al., 2021; Le, Ahmadipour and Pung, 2020) la espectroscopía dieléctrica se usa en otros muchos campos de investigación, convirtiendo un sistema de mediciones en una necesidad que podría satisfacer necesidades de lo más variadas.

2.1 Espectroscopía Dieléctrica

La espectroscopia dieléctrica implica el estudio de la respuesta de un material a un campo eléctrico, que proporciona información estructural, es decir, la estructura molecular, la disposición física y el comportamiento de las moléculas dentro de la estructura. La espectroscopía dieléctrica es una técnica ya establecida en los campos de la física y se utiliza para medir las propiedades dieléctricas y eléctricas de un medio en función de la frecuencia (Biswal and Mishra, 2024).

En materiales cerámicos, se usa la espectroscopía dieléctrica para caracterizar su comportamiento relacionado a la capacitancia, lo que es útil para el diseño de nuevos materiales funcionales con las propiedades previstas.

2.2 Analizadores LCR

Un analizador o puente LCR es un equipo electrónico usado para medir diferentes parámetros y analizar propiedades dieléctricas. Los parámetros principales que podemos obtener con estos equipos son: inductancia, capacitancia, resistencia, impedancia compleja y conductancia (Li et al., 2013).

Las variables por caracterizar se analizan tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas mediante un porta muestras dentro de un horno. La frecuencia puede variar desde 100 Hz a 1 MHz.

2.3 *Capacitancia e impedancia en frecuencia*

La medición de la capacitancia e impedancia de materiales forma parte importante para el diseño de éstos, el analizar estas variables al estar bajo diferentes condiciones de entrada (frecuencia) permite confirmar si el comportamiento es el deseado (Sengupta et al., 2020). Este tipo de estudios se emplean en muchas áreas diferentes, que van desde el diagnóstico de enfermedades (Zeng et al., 2021), y aplicaciones agrícolas para automatizar sistemas de riego (Pokatilov et al., 2010), hasta en análisis de biomasas.

2.4 *Sistemas comerciales de medición dieléctrica*

De acuerdo con un estudio realizado para comprobar la alta resolución y estabilidad de diferentes equipos comerciales [10], en un rango de frecuencia de 1 kHz a 100kHz con valores de capacitancia de 100pF a 1F y resistencias de 1Ω a 100kΩ, el error entre estos sistemas está dentro de lo descrito por los fabricantes, el cual es muy bajo, lo que cumple con el estándar para la caracterización de materiales.

2.5 *Control de temperatura en analizadores LCR*

Para materiales sensibles a la temperatura, se utiliza un control térmico preciso mediante hornos o cámaras térmicas, permitiendo estudios de transiciones de fase o cambios estructurales. Investigaciones recientes han mostrado cómo estas condiciones afectan parámetros dieléctricos clave, como la conductividad y la constante dieléctrica en materiales cerámicos avanzados (Jiménez and De Frutos, 2005).

2.6 *Procesamiento y análisis de señales en LabVIEW*

Debido a la gran cantidad de datos obtenidos por muestreo y a la complejidad que representa interpretar los datos, es necesario desarrollar software que permita representar de manera gráfica e interpretar las lecturas obtenidas, además de controlar en conjunto el analizador LCR y la temperatura. En LabVIEW se incluye también el reconocimiento y búsqueda de patrones en gráficas, como podemos observar en algunas investigaciones (Rêgo Segundo et al., 2019).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Al momento de fabricar una muestra de perovskita, es imperativo caracterizar sus propiedades dieléctricas, para evaluar si cumple con sus características de diseño. Aunque existen equipos comerciales que miden algunas de estas características (por ejemplo: impedancia capacitiva y temperatura, entre otras), el problema es que no hay uno que las mida todas a la vez. Esto dificulta el proceso de caracterización. Otro problema es el análisis específico de las curvas de caracterización, generadas por espectroscopía. Ciertas formas de onda específicas en las curvas pueden estar relacionadas con ciertos efectos deseables en el material de estudio. Estas curvas pueden ser muchas para cada material, debido al amplio número de frecuencias a analizar. El analizar las curvas visualmente, una por una, resulta en un trabajo extenuante. Esta actividad puede afectar negativamente la adecuada detección de curvas específicas de interés.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales.

El estudio utilizó un sistema de espectroscopía dieléctrica diseñado para caracterizar materiales cerámicos, este es un analizador LCR modelo E4990A 20-120M del fabricante Keysight (Fig.1).

Fig. 1. Analizador LCR modelo E4990A 20-120M del fabricante Keysight.



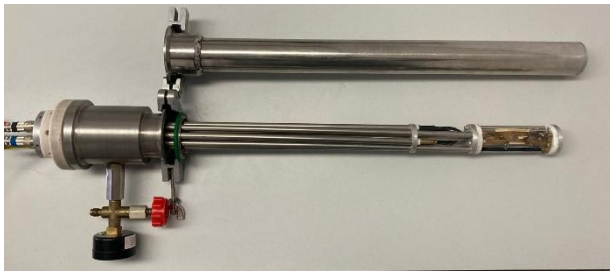
Además, se usó un controlador de temperatura fabricado por la empresa Marine India (Fig. 2).

Fig. 2. Control de temperatura marca Marine India. Temperatura máxima aproximada de 240°C.



Este controlador genera una corriente eléctrica que calienta una resistencia cerámica a cierta temperatura que se establezca (Fig. 3).

Fig. 3. Punta de calentamiento, incluye: resistencia cerámica, sensor de temperatura, terminales de conexión, funda metálica (para evitar que el aire modifique la temperatura).



4.2. Metodología

a). Comunicación entre analizador LCR y LabVIEW.

USB: La comunicación entre el analizador y el PC, es mediante USB (Universal Serie Bus), aunque para hacer funcionar correctamente esta comunicación, es necesario usar unas herramientas extra.

SCPI – IEEE 488: El puente analizador de impedancias emplea los códigos normalizados IEEE 488, también conocida como SCPI por sus siglas en ingles “Standard Commands for Programmable Instruments” con estos comandos el dispositivo puede operar de manera remota.

NI VISA: NI-VISA es un controlador de instrumentos de NI que es una implementación del estándar de E/S de Virtual Instrument Software Architecture (VISA). VISA es un estándar para configurar, programar y depurar sistemas de instrumentación que comprenden interfaces GPIB, VXI, PXI, serial (RS232/RS485), Ethernet/LXI y/o interfaces USB. NI-VISA incluye utilidades, funciones de control de bajo nivel y ejemplos para ayudarlo a crear su aplicación (El Khaled et al., 2018).

b) Diseño de software.

En esta sección de la programación se añadió toda la comunicación y control del analizador LCR, así como el guardado de los datos obtenidos en tiempo real y su visualización. Para la comunicación se usó el paquete NI VISA.

Panel frontal: Aquí el usuario puede establecer y configurar todos los parámetros necesarios para que el analizador LCR realice las lecturas de manera autónoma.

c) Pruebas.

Para corroborar el funcionamiento del sistema, se realizaron dos pruebas que cubren los aspectos y características más importantes.

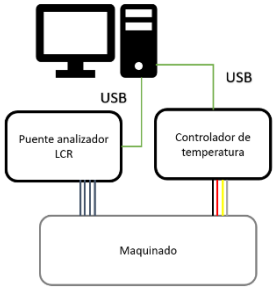
La primera prueba consta de analizar una prueba sencilla con un único barrido de frecuencias, visualizamos los datos tanto en la interfaz de LabVIEW como en el analizador LCR, los resultados deben coincidir para afirmar que la comunicación y el programa funcionan correctamente.

La segunda consta de una serie de lecturas en un material comúnmente usado, se le aplicará un barrido de frecuencias en diferentes temperaturas y usando los electrodos en diferentes posiciones para comparar todos los resultados.

5. RESULTADOS

El sistema cuenta con una plataforma de software desarrollada en LabVIEW, la cual facilitará el monitoreo en tiempo real, el almacenamiento de datos y el análisis de señales. En el siguiente diagrama a bloques (Fig. 4) se muestra a grandes rasgos en qué consta el sistema y como se comunican entre ellos.

Fig. 4. Descripción a bloques del sistema.



El método de comunicación de todo el sistema consta de una interfaz de control entre el PC y el analizador LCR, para ello usamos un protocolo serie que es manejado por un programa de LABVIEW, logrando así un control y monitoreo autónomo y eficiente durante los procesos y experimentos.

Para lograr la comunicación y configuración del analizador LCR se utilizó un programa en el que se abre la comunicación serie en el PC, reconoce el analizador y establece los parámetros para realizar una lectura de un solo canal, los parámetros necesarios se introducen mediante una interfaz para permitir al usuario tener total control de sus experimentos.

Para asegurar que el programa se ejecute de manera lineal usamos una estructura "*Flat secuence*", donde las primeras 6 instancias corresponden a la inicialización y enlace entre el PC y el analizador LCR, la sexta instancia recoge los datos otorgados por el usuario para configurar los parámetros de medición.

La séptima etapa construye la instrucción en formato ASCII para ser enviado al analizador LCR, todo con la información proporcionada por el usuario en la etapa anterior, y las últimas etapas envían las instrucciones y concluyen la comunicación.

Una vez hechas las lecturas, se guardan en un archivo tipo Excel para su posterior análisis, para ello se usa un código extra que guarda todos los datos recibidos en formato CSV.

Por el momento, la implementación del control de temperatura se hizo de manera manual, pues debido a problemas entre la comunicación entre este dispositivo y el PC, no se pudo establecer una conexión que nos permitiera configurarlo de manera autónoma, obligándonos a llevar un registro y control manual.

Se desarrollaron una serie de experimentos para comprobar la funcionalidad del programa hecho en LABVIEW, la integridad de la comunicación y la valides de los datos obtenidos.

Los materiales cerámicos seleccionados fueron analizados bajo distintas condiciones experimentales, variando temperatura manualmente y la frecuencia siendo controlada por el sistema, con el fin de evaluar su respuesta dieléctrica. Se empleó un diseño experimental que garantiza la reproducibilidad de los datos, considerando la calibración del equipo y la validación de los resultados mediante pruebas comparativas.

Para comprobar que los programas de LABVIEW funcionaban correctamente y tanto como la comunicación como la obtención de datos no tengan ningún inconveniente, se realizó una prueba donde se programó una lectura usando la interfaz hecha en LABVIEW, obteniendo como resultado que el analizador LCR inició una serie de lecturas con los parámetros introducidos desde el PC, retornando todos los datos que obtuvo, estos datos se graficaron y se compararon los resultados (Fig. 7) y como se observa, ambas graficas coinciden, lo que nos indica que todo funciona correctamente.

Se realizaron un par de pruebas más para corroborar que el sistema funcionara de manera continua y estable.

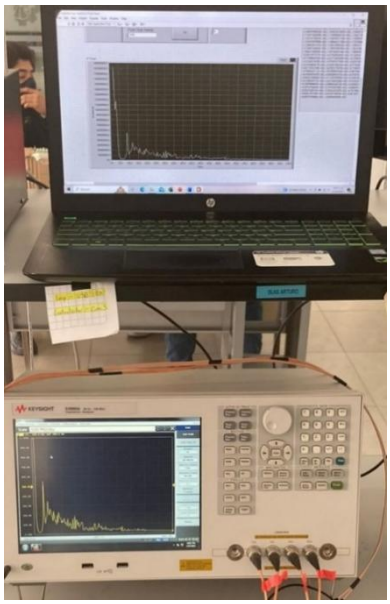
En las pruebas realizadas para la comprobación del funcionamiento del sistema se utilizaron un lote de muestras, a los cuales se les aplicarán los siguientes parámetros de medición.

- Comportamiento de la capacitancia a la temperatura con un rango de 30 °C a 240 °C.
- Temperatura fija registrada
- Señal oscilante de 20 Hz a 120 MHz con 250 pasos
- Amplitud de señal pico a pico 0.5 Volts

Además de estas características, es importante resaltar que durante el experimento se muestran 4 resultados de la misma muestra, las primeras dos son de la respuesta a la frecuencia variando la temperatura, pero colocando los electrodos en el lado "A" del material, los últimos constan de igual manera, de la respuesta a la frecuencia, pero esta vez en el lado "B" de la muestra.

Las muestras analizadas, al ser materiales cerámicos, tienen a comportarse diferente si las medimos desde ciertos puntos, es por ello por lo que para este experimento se eligieron los puntos "A" y "B", de esta manera podremos observar las diferencias entre los comportamientos medidos.

Fig. 5. Comprobación de comunicación del sistema entre analizador LCR y LabVIEW.



4.1. *Análisis de muestras.*

BaTiO3: Se realizaron las pruebas correspondientes con los parámetros especificados anteriormente, se obtuvieron los comportamientos del material (Fig. 6) durante una fase de calentamiento y posteriormente de enfriamiento, todo esto para los lados A y B del material (Fig. 7-10).

Fig. 6. Muestra BaTiO3.

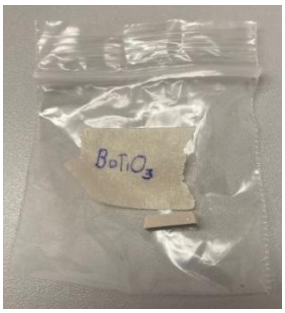


Fig. 7. Calentamiento BaTiO3, lado A.

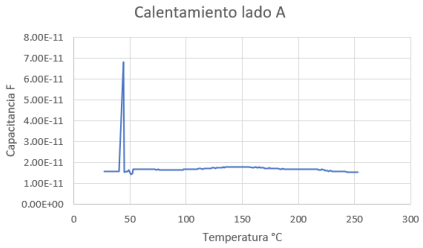


Fig. 8. Enfriamiento BaTiO3, lado A.

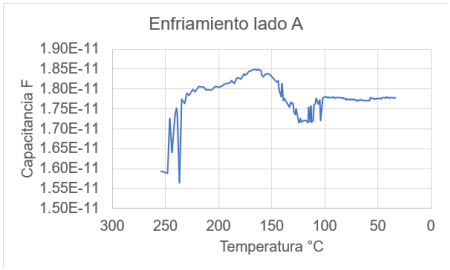


Fig. 9. Calentamiento BaTiO3, lado B.

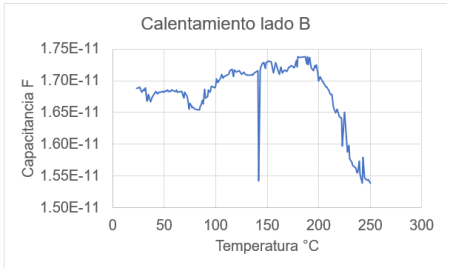
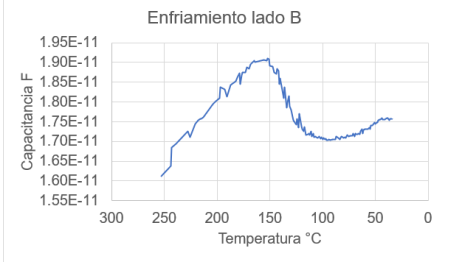


Fig. 10. Enfriamiento BaTiO3, lado B.



En la fase de enfriamiento tanto como del lado A como del B, podemos observar que la temperatura afecta directamente a la capacitancia, y en ambos casos entre los 100°C y 150°C parece haber una zona de transición que afecta de mayor manera a la capacitancia.

En el calentamiento del lado A, se obtuvo un pico muy elevado que afectó todas las lecturas, aunque la tendencia es clara, esta lectura parece no ser propia del material pudiendo ser consecuencia de un factor externo. En el lado B, se observa una lectura mas clara en la que podemos ver que conforme la temperatura aumenta, también lo hace la capacitancia, y al llegar a 200°C, la capacitancia comienza a caer.

Se realizaron también pruebas con barridos de frecuencias en ambos lados del material para comparar su comportamiento cuando medimos desde diferentes polaridades (Fig. 11-12).

Fig. 11. Barrido de frecuencias BaTiO3, lado A.

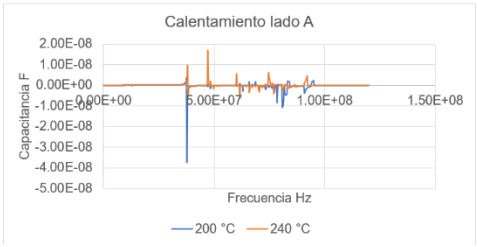
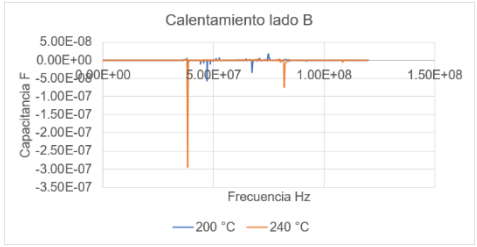


Fig. 12. Barrido de frecuencias BaTiO3, lado B.



6. CONCLUSIONES

Se desarrolló e implementó un sistema de medición basado en una interfaz hombre-máquina utilizando LabVIEW, orientado a la caracterización dieléctrica de materiales cerámicos piezoeléctricos. El sistema permite la adquisición de datos en tiempo real, control de barrido de frecuencia, almacenamiento automatizado y visualización de resultados mediante gráficas, todo a través de una plataforma intuitiva que puede ser utilizada incluso por operadores con conocimientos técnicos básicos.

Los resultados experimentales validaron la funcionalidad del sistema, mostrando concordancia entre las lecturas obtenidas mediante LabVIEW y las entregadas por el analizador LCR. Además, se evidenció la capacidad del sistema para detectar variaciones en las propiedades dieléctricas del material frente a cambios de temperatura y polaridad de medición, lo cual es clave para estudios de fase y comportamiento estructural.

La principal contribución de este trabajo radica en la integración de un entorno de medición automatizado y

adaptable, que reduce la intervención manual y optimiza el análisis en investigaciones sobre materiales piezoeléctricos. A diferencia de soluciones comerciales existentes, el sistema propuesto permite una personalización completa del experimento y sienta las bases para futuras ampliaciones como el control automático de temperatura y el reconocimiento de patrones en curvas, lo que representará un avance significativo en términos de eficiencia, versatilidad y accesibilidad para el estudio de propiedades dieléctricas.

7. TRABAJO FUTURO.

Las áreas de mejora de este sistema se dividen en dos campos, que se describen a continuación.

Control de temperatura: Para realizar las pruebas en este sistema, la variación de temperatura se programó manualmente, cambiando la temperatura cada vez que se requería. En las siguientes etapas de este sistema, se planea agregar un control automatizado de la temperatura mediante un módulo especializado, controlado desde LabVIEW usando comunicación serial, el cual se pueda configurar como la frecuencia, permitiendo pruebas mas robustas y completas, reduciendo también el tiempo invertido para llevarlas a cabo.

Detección de curvas específicas: Una de las labores más extenuantes para los investigadores cuando se analizan los materiales, es buscar patrones o curvas específicas, éstas pueden dar mucha información acerca del comportamiento del material, pero al tratarse de cientos de gráficas obtenidas por cada muestra se torna complicado. Para ello se planea implementar herramientas de análisis de datos, como la detección de curvas específicas, las cuales el usuario podrá introducir, buscando ahorrar tiempo significativo en las investigaciones.

REFERENCIAS

Uchino, K., 2017. *Advanced Piezoelectric Materials*. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

Ye, J., Gong, H., Zhang, Y., Xu, Q., Zhou, X., Yan, M., Zhai, D., Zhou, K., Zhang, D. and Bowen, C., 2024. Piezoelectric ceramics with hierarchical macro- and micro-pore channels for sensing applications. *Additive Manufacturing*, 79, p.103915. https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103915.

Haydoura, M., Benzerga, R., Le Paven, C., Le Gendre, L., Laur, V., Chevalier, A. and Cheviré, F., 2021. Perovskite $(Sr_2Ta_2O_7)_{100-x}(La_2Ti_2O_7)_x$ ceramics: From dielectric characterization to dielectric resonator antenna applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 872, p.159728.

Le, A.T., Ahmadipour, M. and Pung, S.Y., 2020. A review on ZnO-based piezoelectric nanogenerators: Synthesis, characterization techniques, performance enhancement and applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 844, p.156172.

Biswal, B. and Mishra, D., 2024. Review on LCR measurement of dielectrics and analysis of various parameters. [no se proporciona nombre de revista o editorial].

Li, N., Xu, H., Wang, W., Zhou, Z., Qiao, G. and Li, D.D.U., 2013. A high-speed bioelectrical impedance spectroscopy system based on the digital auto-balancing bridge method. *Measurement Science and Technology*, 24, p.065701.

Sengupta, P., Sadhukhan, P., Ray, A., Ray, R., Bhattacharyya, S. and Das, S., 2020. Temperature and frequency dependent dielectric response of $C_3H_7NH_3PbI_3$: A new hybrid perovskite. *Journal of Applied Physics*, 127(20).

Zeng, Y., Jiang, L., He, Q., Wodnicki, R., Yang, Y., Chen, Y. and Zhou, Q., 2021. Recent progress in 3D printing piezoelectric materials for biomedical applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(1).

Pokatilov, A., Satrapinski, A., Kubarsepp, T. and Martens, O., 2010. Verification of performance of commercial LCR meters. *CPEM 2010 Conference*. https://doi.org/10.1109/cpem.2010.5545242.

El Khaled, D., Novas, N., Gazquez, J.-A. and Manzano-Agugliaro, F., 2018. Dielectric and Bioimpedance Research Studies: A Scientometric Approach Using the Scopus Database. *Publications*, 6(1), p.6. https://doi.org/10.3390/publications6010006.

Jiménez, F.J. and De Frutos, J., 2005. Virtual instrument for measurement, processing data, and visualization of vibration patterns of piezoelectric devices. *Computer Standards & Interfaces*, 27(6), pp.653–663.

Rêgo Segundo, A.K., Silva Pinto, É., Almeida Santos, G. and de Barros Monteiro, P.M., 2019. Capacitive impedance measurement: Dual-frequency approach. *Sensors*, 19(11), p.2539.

Prototype IoT System for Vibration and Temperature Analysis in Resin 3D Printers

Macias González, Erick Adrian * **Ponce, Israel U.** *

* *Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Avenida Plutarco Elías Calles No. 1210, Colonia Foviste Chamizal, en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, C.P. 32310. (e-mail: erickmacias.a@gmail.com, israel.ulises@uacj.mx).*

Abstract: This work presents the development of an IoT-based prototype system for real-time monitoring of temperature and vibration in a 3D resin printer. The objective is to detect two types of vibrations: mechanical and external. The system integrates sensors connected to an ESP32 microcontroller, which transmits data to Google Sheets for visualization. Three tests were conducted: a small model printed in 83 minutes, a more complex piece printed in 163 minutes, and a repetition of the first test under simulated external vibration. During the stable conditions, maximum temperatures of 25.8°C and 26.9°C were recorded without significant vibrations, resulting in successful prints. In contrast, the third test under vibrations showed frequent motion events and resulted in a failed print, demonstrating the system's effectiveness in detecting conditions that compromise print quality.

Keywords: 3D printing, Internet of Things (IoT), Vibrations, Real-time monitoring, Temperature.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la impresión 3D se ha posicionado como una tecnología fundamental en los procesos de manufactura debido a su precisión, facilidad de uso y capacidad para fabricar piezas personalizadas. Sin embargo, su productividad depende de diversos factores externos, como la vibración mecánica que puede afectar a la impresora y las condiciones de temperatura inadecuadas. Uno de los principales problemas en la fabricación con impresoras 3D es la vibración excesiva durante el proceso de impresión.

En algunos consultorios dentales, la impresión 3D se emplea en la fabricación de prótesis dentales. Sin embargo, durante el proceso de impresión pueden surgir problemas relacionados con el entorno de trabajo. En muchos casos, la impresora se encuentra sobre una superficie inadecuada, compartiendo la misma mesa donde se realizan otros procedimientos. Además, suele estar ubicada junto a otras máquinas que, cuando operan simultáneamente, generan una vibración significativa, lo que puede afectar la calidad de las piezas impresas.

En los últimos años, la *Industria 4.0* ha impulsado el desarrollo de tecnologías avanzadas como el *Internet de las Cosas* (IoT) y la *Inteligencia Artificial* (IA), que han revolucionado la supervisión y el mantenimiento de equipos industriales. Estas tecnologías han permitido optimizar la eficiencia de los procesos de manufactura, reduciendo costos operativos y tiempos de inactividad [2].

El IoT se define como una red de dispositivos interconectados que pueden recopilar y transmitir datos sin intervención humana. Su integración en la industria ha facilitado el monitoreo en tiempo real de variables críticas, mejorando la toma de decisiones basada en datos [3]. Además, su accesibilidad económica ha favorecido su adopción en diversos entornos industriales, proporcionando una alternativa rentable frente a los métodos tradicionales de monitoreo [4].

En el ámbito de la manufactura aditiva, la impresión 3D se ha consolidado como una herramienta clave para la producción de piezas con alta precisión. Sin embargo, esta tecnología enfrenta desafíos operativos significativos, como la vibración mecánica y el control ineficiente de la temperatura, que pueden afectar la calidad del producto final. Las vibraciones excesivas pueden generar desalineaciones en los ejes y defectos en la adhesión entre capas, mientras que un control inadecuado de la temperatura puede provocar deformaciones y cambios en las propiedades mecánicas del material.

Estudios previos han demostrado que el uso de sensores IoT para monitorear temperatura y vibración en equipos industriales es una estrategia efectiva para anticipar fallos y mejorar la gestión del mantenimiento. En un caso de estudio, se implementaron sensores especializados en motores eléctricos y se procesaron los datos en la nube, logrando detectar fallos antes de que se manifestaran y facilitando estrategias de mantenimiento predictivo [1].

La inteligencia artificial ha demostrado ser una herramienta poderosa en la optimización de procesos industriales, facilitando el análisis predictivo y la automatización de tareas repetitivas. Su implementación en el mantenimiento ha permitido anticipar fallos antes de que ocurran, reduciendo costos y mejorando la productividad [6]. Además, el *aprendizaje automático* (*Machine Learning*)

ha sido clave para desarrollar algoritmos que mejoran continuamente su desempeño a partir de datos históricos, sin necesidad de ajustes manuales [5].

2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño del Estudio

El prototipo a desarrollar consiste en el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real para una impresora 3D de resina. La impresora utilizada será una Phrozen Sonic Mini 8K. Para llevar a cabo el proyecto, se emplearán dos tipos de sensores que permitirán detectar cambios de temperatura y vibraciones durante el funcionamiento de la impresora.

Las variables a medir, son:

- Vibración: se detectan movimientos no suaves o sacudidas en la base y en la mesa donde se ubica la impresora.
- Temperatura: se mide el calor emitido por la fuente de luz UV de la impresora mediante un sensor infrarrojo, sin necesidad de contacto directo.

El prototipo debe identificar posibles anomalías mediante el registro de los valores del proceso y su comparación con distintos procedimientos, con el objetivo de detectar fallas en la impresora. Esto permitirá prevenir errores en las piezas impresas y realizar ajustes preventivos.

2.2 Selección de Sensores y Equipos

Para realizar el prototipo, se seleccionan los componentes adecuados, entre los que se encuentran:

- Sensor de vibración SW-420: Este sensor se utiliza para detectar los movimientos o vibraciones. Se colocan dos sensores SW-420, uno se adhiere a la base de la impresora, y el otro, se coloca en la mesa donde esta asentada la impresora (ver Fig. 1).

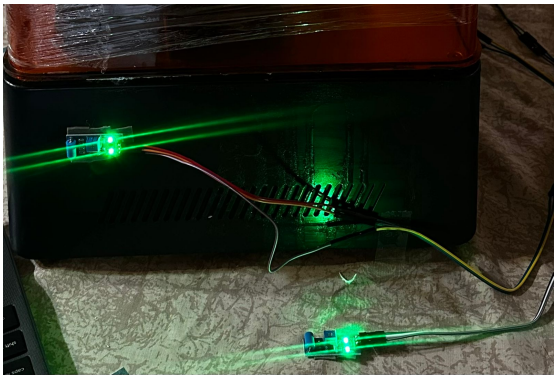


Fig. 1. Colocación del sensor de vibración

- Sensor de temperatura MLX90614: sensor de tipo infrarrojo que permite medir la temperatura de la cámara de impresión sin la necesidad de contacto directo, y además mide la temperatura ambiente al mismo tiempo. La Fig. 2 muestra la ubicación del sensor de temperatura sobre la impresora 3D.

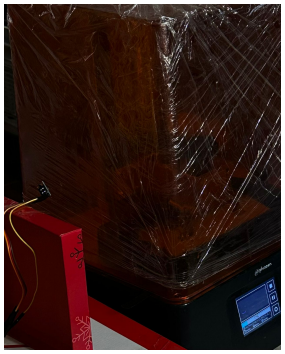


Fig. 2. Colocación del sensor de temperatura

- ESP32: Microcontrolador que se encarga de recibir las señales de los sensores y exportar los datos obtenidos mediante conexión Wi-Fi.
- Google Sheets: Se usó como base de datos para almacenar los datos por su facilidad de uso y fácil visualización.
- Sistema de alerta con LED y buzzer:
  - Un LED y buzzer se activan si la temperatura supera los 27°C.
  - Otro LED y buzzer se activan al detectar movimiento en la base o en la mesa.

2.3 Diagramas

En la Fig. 3 podemos observar el diagrama de bloques del sistema de monitoreo implementado con el microcontrolador ESP32. En él se representa la conexión de distintos sensores de movimiento, un sensor de temperatura, LEDs y buzzers distribuidos en diferentes pines GPIO.

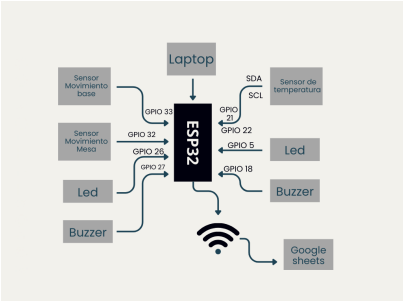


Fig. 3. Diagrama de bloques del sistema de monitoreo con ESP32

En la Fig. 4 se muestra el diagrama de flujo que representa la lógica de funcionamiento del código implementado en el sistema. Podemos observar dos ciclos principales: uno enfocado en el monitoreo de temperatura , y otro en la detección de movimientos. El flujo inicia con la captura de datos; si se detecta una temperatura superior a 27 °C, se activa una alarma y se registran los datos en Google Sheets. Por otro lado, si se detecta movimiento, se incrementa un contador y, al superar un umbral de 10 segundos, se activa una alarma y se almacenan los datos en la misma plataforma.

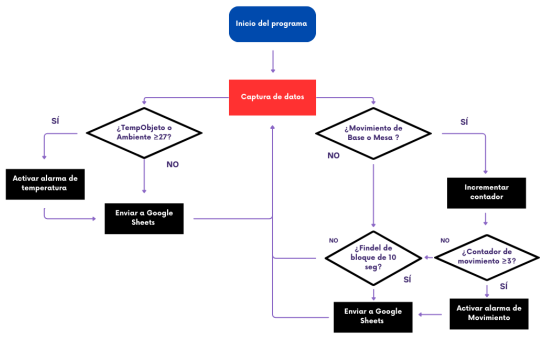


Fig. 4. Diagrama de flujo que representa la lógica de funcionamiento del código

2.4 Procedimiento Experimental

Los sensores se colocaron de tal forma que no se interfiriera con la manipulación de la impresora.

El sensor MLX90614 se colocó a una altura de 25 cm sobre la mesa y a una distancia de 8 cm de la cámara de la impresora. Esta ubicación se determinó buscando la posición más adecuada para medir ambas variables sin necesidad de contacto y sin alterar el funcionamiento del equipo.

Por otro lado, los sensores SW-420, utilizados para detectar vibraciones, se instalaron en extremos opuestos de la impresora. El primer sensor se fijó en la base de la impresora para registrar vibraciones directamente relacionadas con su funcionamiento, mientras que el segundo se ubicó en la mesa de trabajo para detectar movimientos externos ajenos a la impresora. Ambos sensores se colocaron a una distancia de 13 cm entre sí para evitar interferencias en las señales.

2.5 Almacenamiento y Gestión de Datos

Los datos obtenidos del ESP32 se envían automáticamente a una hoja de cálculo en Google Sheets. La información se registra en intervalos de 10 segundos, y se organiza en celdas para un mejor análisis y seguimiento del proceso. Se tiene lo siguiente en Google Sheets (ver Figuras 5 y 6):

- Hoja de Temperatura:
  - Fecha y hora
  - Temperatura ambiente
  - Temperatura del objeto

	A	B	C
1	FechaHora	TempAmbiente	TempObjetivo
2	25/3/2025 0:59:28	24.07	23.05
3	25/3/2025 0:59:31	24.03	23.11
4	25/3/2025 0:59:37	24.91	43.41
5	25/3/2025 0:59:42	25.33	23.29
6	25/3/2025 0:59:47	25.31	23.09
7	25/3/2025 0:59:52	25.27	23.05

Fig. 5. Datos de temperatura

- Hoja de Movimiento:
  - Fecha y hora de cada bloque
  - Total de movimientos detectados en la base
  - Total de movimientos detectados en la mesa donde está establecida la impresora

	A	B	C
1	FechaHora	MovBase	MovGab
2	25/3/2025 0:59:35	0	1
3	25/3/2025 0:59:44	0	0
4	25/3/2025 0:59:55	0	0
5	25/3/2025 1:00:06	0	0
6	25/3/2025 1:00:17	0	0
7	25/3/2025 1:00:27	0	0
8	25/3/2025 1:00:37	2	0
9	25/3/2025 1:00:58	0	0

Fig. 6. Datos de vibración

Gracias a esta estructura de registro de datos, el usuario obtiene una visualización más clara y ordenada del estado de su impresora.

Al finalizar las pruebas, los datos recopilados en la hoja de cálculo se transfieren a otros documentos para su análisis. Esto permite generar gráficas de los resultados y comparar diferentes pruebas, facilitando la detección de posibles errores.

2.6 Pruebas Realizadas

Se realizan pruebas para analizar el comportamiento de la impresora en diferentes situaciones, como son:

(1) Impresión de una pieza pequeña sin vibraciones externas.
(2) Impresión de una pieza más alta y de mayor complejidad, también sin vibraciones externas.
(3) Prueba de detección de movimiento, donde se selecciona una de las piezas utilizadas en las pruebas anteriores, pero ahora se simulará movimiento sobre la mesa de trabajo. Esta prueba permite evaluar el problema detectado en el consultorio dental, analizando sus consecuencias y observando su impacto en las gráficas.

Las primeras pruebas se enfoca en la variable de temperatura, ya que, al no haber movimiento en la mesa, las vibraciones no afectarán el resultado. Dado que se imprimirán piezas de distintos tamaños, se espera registrar variaciones en la temperatura reflejadas en las gráficas de resultados.

Por otro lado, en la última prueba nos centraremos en la variable de movimiento, analizando las vibraciones generadas por impactos sobre la mesa de trabajo en un entorno simulado. El objetivo es evaluar las consecuencias de trabajar bajo estas condiciones y determinar si esto afecta directamente la calidad de la pieza impresa o el funcionamiento de la impresora.
Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un sistema de monitoreo en tiempo real mediante el uso de dos tipos de sensores IoT, capaces de detectar anomalías en la impresora relacionadas con la temperatura y la vibración.

3. RESULTADOS

3.1 Pruebas realizadas

Prueba 1: Impresión de pieza sin movimientos externos
En la primera prueba se realizó una impresión de un cubo de calibración pequeño de una medida de 3 cm por 3 cm.

Se seleccionó esta pieza por su simplicidad y para observar el comportamiento de la temperatura en un proceso de 1 hora con 23 minutos, el resultado obtenido se muestra en la Fig. 7.

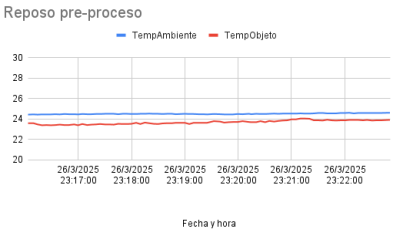


Fig. 7. Gráfica de temperatura en pre-proceso, pieza 1

Durante el proceso: Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 8, donde se observa que la temperatura comienza por debajo de la temperatura ambiente y, con el transcurso del tiempo, aumenta hasta superarla. Se observan varios picos de temperatura en ciertas etapas del proceso, lo que sugiere que la impresora realizó un esfuerzo adicional al imprimir esas capas. La temperatura máxima registrada fue de 25.80 °C, mientras que la mínima fue de 23.7

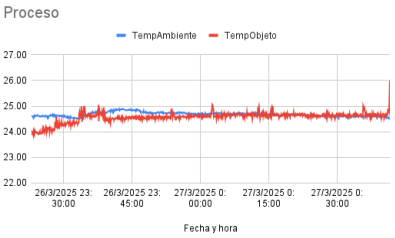


Fig. 8. Gráfica de temperatura durante el proceso, pieza 1

Post-proceso: Al finalizar la impresión, se observa que la temperatura de la impresora se mantiene por encima de la temperatura ambiente durante un tiempo, ver Fig. 9. Al quitar la cubierta de la impresora, el calor acumulado se libera gradualmente, permitiendo que la temperatura se regule hasta estabilizarse entre 25 y 26°C.

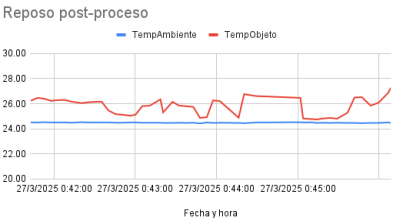


Fig. 9. Gráfica de temperatura en post-proceso, pieza 1

Movimiento detectado: En cuanto a las vibraciones durante esta prueba, se observó un movimiento nulo en la mesa donde está ubicada la impresora. Sin embargo, al inicio del proceso de trabajo, se detectaron algunos movimientos, los cuales corresponden a la manipulación de la máquina antes de comenzar la impresión, durante el preproceso (ver Fig. 10).

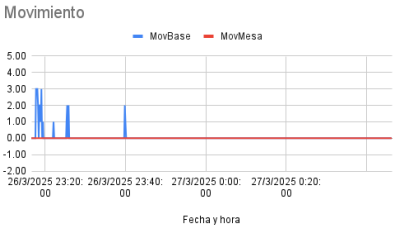


Fig. 10. Gráfica de movimiento, pieza 1

Resultado final La pieza fue impresa correctamente, sin deformaciones ni errores visibles, tal como se observa en la Fig. 11.



Fig. 11. Pieza 1 terminada

3.2 Prueba 2: Impresión de pieza con mayor complejidad

Se imprimió una torre de temperatura de PETG, de 55 mm de alto por 45 mm de ancho. La impresión duró 2 horas con 43 minutos, la gráfica de temperatura en pre-proceso se muestra en la Fig. 12.

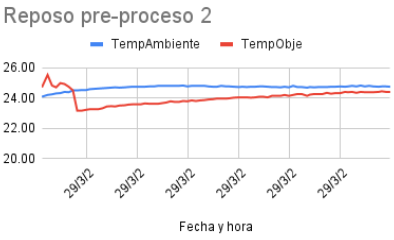


Fig. 12. Gráfica de temperatura en pre-proceso, pieza 2

Durante el proceso A lo largo de este proceso, que fue un poco más largo, observamos cómo la temperatura fue aumentando, quedando solo 1 grado por debajo de nuestro límite. Esto indica que, cuanto más tiempo transcurre, mayor es el esfuerzo realizado por la impresora (ver Fig. 13).

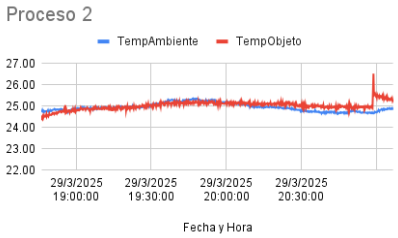


Fig. 13. Gráfica de temperatura durante el proceso, pieza 2

Post-proceso Al finalizar, se observa el patrón ya identificado anteriormente: la temperatura se mantiene superior a la del ambiente, con cierta regularidad. Sin embargo, con el tiempo, esta temperatura se nivela y se iguala a la temperatura exterior, tal como se muestra en la Fig. 14.

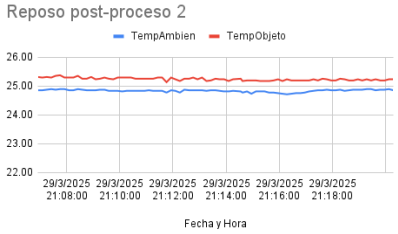


Fig. 14. Gráfica de temperatura en post-proceso, pieza 2

Movimiento detectado En este tipo de pieza, el movimiento fue nulo, exceptuando al inicio del proceso, cuando se manipuló la impresora para calibrarla. Esto se observa en la Fig. 15.

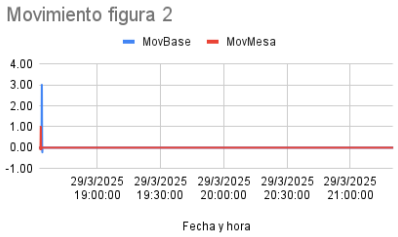


Fig. 15. Gráfica de movimiento, pieza 2

Resultado final Al observar la pieza final, no se tuvieron complicaciones con las variables de temperatura, y al no detectar movimientos, la pieza no sufrió deformaciones, se muestra en la Fig. 16.

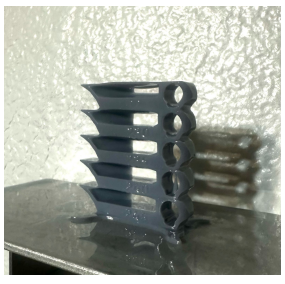


Fig. 16. Pieza 2 terminada

3.3 Prueba 3 – Impresión con simulación de vibraciones

Se volvió a imprimir la pieza 1 bajo condiciones de vibración simulada. Duró 1 hora con 23 minutos.

Durante el proceso La temperatura fue más estable, alcanzando un máximo de 26.2 °C (ver Fig. 17).

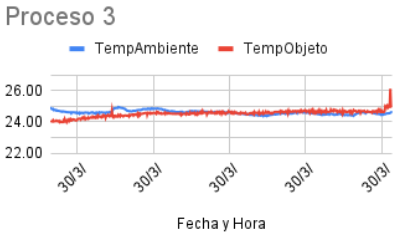


Fig. 17. Gráfica de temperatura durante el proceso, pieza 3

Movimiento detectado Se registró una gran cantidad de vibraciones en la base como en la mesa, a lo largo de todo el proceso,lo cual se puede observar en la Fig. 18.

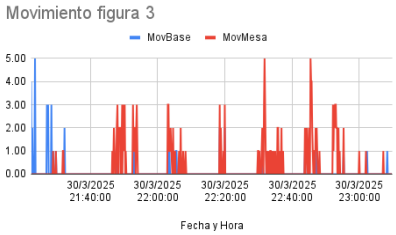


Fig. 18. Gráfica de movimiento, pieza 3

Resultado final de la pieza La pieza no se completó correctamente. En la Fig. 19 se logra ver parte de la base de la figura en el fondo del recipiente .



Fig. 19. Pieza 3 fallida

3.4 Comparación de Temperatura – Proceso de la Pieza 1 vs Pieza 3

Ambas piezas muestran una tendencia de temperatura estable. Sin embargo, la pieza 1 presenta picos más grandes. La pieza 3, a pesar de la vibración, mantuvo una curva más plana, lo cual se puede observar en las Fig. 20.

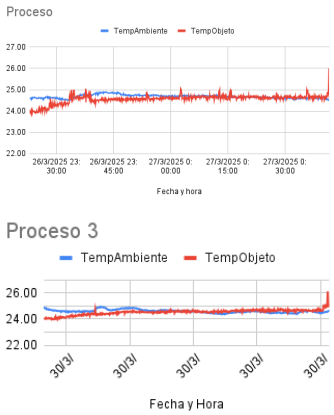


Fig. 20. Comparación de temperatura entre pieza 1 y pieza 3

3.5 Comparación de Movimiento – Pieza 1 vs Pieza 3

La pieza 1 mostró mínimos movimientos durante el preproceso. En cambio, en la pieza 3, las vibraciones fueron constantes y altas a lo largo de todo el proceso. Esto nos permite confirmar que nuestro sistema es efectivo al detectar estas variables y determinar que el cambio en las vibraciones fue lo que provocó una impresión defectuosa de la pieza, lo cual se puede observar en las Fig. 21.

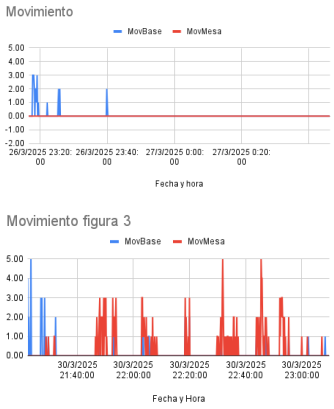


Fig. 21. Comparación de temperatura entre pieza 1 y pieza 3

4. CONCLUSIONES

Este proyecto permitió identificar puntos clave que afectan la calidad de la impresión 3D con resina, especialmente las vibraciones externas, que demostraron ser la variable más determinante en la generación de errores en las piezas. A través de pruebas controladas, se observó que incluso con diferencias de temperatura de hasta 2 °C, las impresiones podían mantenerse estables, mientras que la presencia de vibraciones constantes generó fallos críticos. El sistema fue capaz de detectar estas anomalías de forma efectiva y emitir alertas inmediatas mediante un LED y un buzzer, validando su funcionalidad en tiempo real.

Gracias al uso de sensores IoT, un microcontrolador ESP32 y una plataforma accesible como Google Sheets, se logró una solución sencilla, económica y funcional que puede ser adoptada fácilmente por laboratorios dentales u otros entornos que utilizan impresoras de resina. La interfaz de almacenamiento en línea permitió a los usuarios monitorear las variables desde cualquier dispositivo móvil, mejorando el control del proceso sin requerir experiencia técnica avanzada.

Como línea futura de trabajo, se propone integrar algoritmos de inteligencia artificial capaces de analizar los patrones de datos en tiempo real y detectar comportamientos anómalos de forma automática. Esto permitiría enviar alertas más precisas y personalizadas al usuario. Asimismo, se contempla incluir nuevas variables como la intensidad de la luz UV, el consumo energético o la humedad ambiental. Finalmente, el desarrollo de una interfaz visual amigable y la implementación de un sistema de control autónomo con *MATLAB* permitirían evolucionar el prototipo hacia un sistema inteligente de mantenimiento predictivo, ampliando su aplicabilidad y robustez en entornos industriales y clínicos.

REFERENCIAS

[1] Ricciardi Celsi, L. and Valli, A. (2023). Applied control and artificial intelligence for energy management: An overview of trends in EV charging, cyber-physical security and predictive maintenance. *Energies*, 16(12), pp.4678. Available at: https://doi.org/10.3390/en16124678

[2] Hurtado, L., Villareal, E. and Villareal, L. (2016). Detección y diagnóstico de fallas mediante técnicas de inteligencia artificial, un estado del arte. *Dyna*, 83(199), pp.19–28. Available at: https://doi.org/10.15446/dyna.v83n199.55612

[3] Borgosz, L. and Dikicioglu, D. (2024). Industrial Internet of Things: What does it mean for the bioprocess industries? *Biochemical Engineering Journal*, 201, p.109122. Available at: https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.109122

[4] Aguilar Lugo, J.I., Ibarra Esquer, J.E. and Bernal, M.A. (2020). Aplicación del internet industrial de las cosas (IoT) en líneas de manufactura por proceso de moldeo por inyección de plástico. *ReCIBE. Revista electrónica de Computación, Informática, Biomédica y Electrónica*, 9(2), pp.1–22. Available at: https://doi.org/10.32870/recibe.v9i2.160

[5] Armas Morales, C. and Anicama Pescorán, J. (2022). ¿Inteligencia artificial un fenómeno socioeconómico? Despido del trabajador por automatización empresarial. *Revista Investigación y Negocios*, 15(25), pp.139–151. Available at: https://n9.cl/dq232

[6] Peñalver-Higuera, M.J. and Isea-Argüelles, J.J. (2024). Transformación hacia fábricas inteligentes: El papel de la IA en la industria 4.0. *Ingenium et Potentia: Revista Electrónica Multidisciplinaria de Ciencias Básicas, Ingeniería y Arquitectura*, 6(10), pp.38–49. Available at: https://doi.org/10.35381/i.p.v6i10.3742

Segmenting LAN Traffic by Implementing Port-based VLANs as a Management Improvement Strategy.

Hernández Arias, Clemente[1], Priego Clemente, Antonio[2], Díaz Villanueva, Felix[3], Arias Peregrino, Víctor Manuel[4], Remellón Cerino, Mario José[5], Villanueva Guzmán, Jorge Ceín[6]

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Villahermosa. Departamento de Sistemas y Computación. Villahermosa - Frontera Km. 3.5 Ciudad Industrial Villahermosa, Tabasco México, (e-mail: clemente.hernandeza@villahermosa.tecnm.mx[1] antonio.pc@villahermosa.tecnm.mx[2], , felix.dv@villahermosa.tecnm.mx[3], victor.ap@villahermosa.tecnm.mx[4], mario.rc@villahermosa.tecnm.mx[5], Jorge.vg@villahermosa.tecnm.mx[6])

Abstract: This article aims to present one of the principal traffic control and segmentation tools at Layer 2 (Data Link Layer) through VLAN implementation. It introduces a 5-step methodology: (1) analysis and requirements, (2) VLAN topology design, (3) Layer 2 device configuration, (4) inter-VLAN routing implementation (Layer 3), and (5) testing and validation.The research demonstrates how the lack of traffic segmentation leads to bandwidth saturation, security vulnerabilities, and network scalability challenges. Conversely, VLAN implementation enhances network performance, improves security, and enables integration of emerging technologies like IoT and VoIP.The incorporation of Layer 3 devices (such as routers) enables inter-VLAN communication while optimizing network traffic. Ultimately, transitioning from a flat network to a managed network architecture yields substantial improvements in performance, security, and growth potential.

Keywords: Security, segmentation, VLANs, broadcast domains.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy, en un mundo totalmente conectado, la eficiencia, seguridad y escalabilidad de las redes de datos no solo determinan la productividad empresarial, sino también aspectos cotidianos como el acceso a servicios esenciales y la participación en la economía digital. Sin embargo, este avance también plantea desafíos, como la ciberseguridad, y la demanda de ancho de banda. Analizar su importancia permite comprender por qué las redes de datos son un pilar indispensable para el progreso y la competitividad en la actualidad. Desde el intercambio de información en tiempo real hasta el funcionamiento de industrias críticas como la salud, la educación y las finanzas, estas redes son la base que sustenta la transformación tecnológica del siglo XXI. Su evolución —desde las primeras conexiones básicas hasta las infraestructuras de alta velocidad como el 5G y la fibra óptica— ha redefinido la manera en que trabajamos, aprendemos y nos relacionamos. Las redes LAN (Local Area Network) siguen siendo fundamentales para la conectividad en entornos empresariales, educativos y domésticos. Gracias a avances como el Wi-Fi 6, Ethernet de alta velocidad (10Gbps+) y la integración con tecnologías IoT, las LAN modernas ofrecen mayor ancho de banda, baja latencia y escalabilidad. Sin embargo, enfrentan desafíos como riesgos de ciberseguridad y la necesidad de segmentación inteligente mediante VLANs y SDN (Software-Defined Networking).

En las redes LAN, la separación del tráfico es clave para optimizar el rendimiento, mejorar la seguridad y garantizar la calidad de servicio (QoS). Una de las estrategias más efectivas es el uso de VLANs (Virtual LANs), que segmentan la red lógicamente para aislar tráfico entre departamentos, dispositivos o servicios, reduciendo colisiones y riesgos de seguridad. Otra técnica es la implementación de QoS (Quality of Service), que prioriza tráfico crítico (como VoIP o videoconferencias) sobre el menos urgente. Además, las redes definidas por software (SDN) permiten una gestión dinámica del flujo de datos mediante políticas centralizadas. Para entornos con alto tráfico, la agregación de enlaces combina múltiples conexiones para aumentar el ancho de banda y redundancia. Estas estrategias, combinadas con firewalls internos y segmentación por subredes, aseguran redes LAN más eficientes, seguras y adaptables a las demandas actuales.

Con base a lo antes mencionado, el presente trabajo nos muestra la importancia de la implementación de VLANs (Virtual Local Area Networks) en redes LAN como una estrategia de optimización, segmentación y gestión del tráfico, la presente artículo nos muestra una metodología sencilla, práctica y eficiente que resulta adaptable a los distintos entornos en función de las dimensiones de la LAN.

2. METODOLOGÍA

La implementación de VLANs constituye una solución fundamental para la administración de redes, ya que permite la segmentación lógica del tráfico en ambientes donde la convergencia de servicios y dispositivos exige mayor control y eficiencia. Al crear dominios de broadcast independientes, las VLANs reducen significativamente la congestión de red, mejoran el rendimiento y optimizan el uso del ancho de banda. Desde el punto de vista de seguridad, su capacidad para aislar grupos de trabajo, servidores críticos o dispositivos IoT minimiza los riesgos de accesos no autorizados y limita el alcance de posibles ataques internos. Para tales efectos la metodología se generaliza en 5 puntos clave estructurados para que garantice su seguridad, eficiencia y escalabilidad que son aplicables a distintos entornos, los cuales son:

- Análisis y requerimientos
- Diseño de la topología Vlan
- Configuración de dispositivos de capa 2 (switch)
- Implementación de las Intervlan Routing (capa 3)
- Pruebas y validación

2.1 La fase de análisis y requerimientos

Implica conocer principalmente la topología de la LAN, cantidad y tipos de usuarios que coexisten. Con base a los datos obtenidos se puede determinar la segmentación (cantidad de vlan requeridas), así como también evaluar los dispositivos de red como: switches compatibles con vlans, routers, etc.

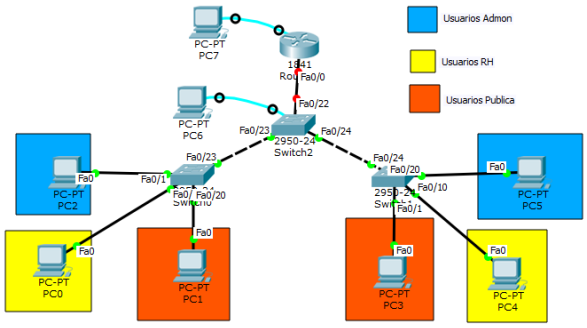


Figura 1. Topología de la Lan.

En la figura se muestra que coexisten tres tipos de usuarios sobre una red plana (red plana: carente de mecanismos de separación del tráfico mediante vlans para este caso) lo que ocasiona problemas de eficiencia, seguridad, y gestión de los usuarios, sin la debida gestión lógica del tráfico todos los dispositivos comparten el mismo dominio de difusión a nivel de capa 2 lo que genera tráfico innecesario, congestión en la red que afecta el rendimiento en general. Para esta Lan se cuenta con switches Cisco 2950-24 y un router Cisco 1841.

2.2 Diseño de la topología Vlan

En la etapa de diseño de la topología de la vlan se deben asignar las vlans en función a los usuarios que se manejarán, planificar las asignación de las direcciones IP con base a un esquema vlsm y configurar los puertos de los switches como tipo acceso o trunk (vtp) según sea el caso.

Name Vlan	# vlan	#port	#host
Admon	10	1-5	50
RH	20	6-10	30
Publica	30	11-15	100

Tabla 1. Topología de la vlan.

#vlan	ip inicial	Ip final	gateway	Mascara de subred
30	172.16.0.1	172.16.0.126	172.16.0.126	255.255.255128
10	172.16.0.129	172.16.0.190	172.16.0.190	255.255.255.192
20	172.16.0.193	172.16.0.222	172.16.0.222	255.255.255.224

Tabla 2. Asignación de las direcciones ip mediante VLSM

Los puertos o interfaces del número 16 al 21 se apagarán (sh) por cuestiones de seguridad ya que serán puertos sin uso, el puerto 24 será de tipo VTP para el tráfico intervlans, cabe señalar que el protocolo VTP es un protocolo de gestión en las VLAN que va permitir la propagación de la información a los equipos de la red, facilitando así la gestión en una red y de enlace entre switches/routers. Los puertos tipo acceso son los que conectan dispositivos finales como: impresoras, computadoras, laptops, teléfonos ip, y que pertenecen a una vlan.

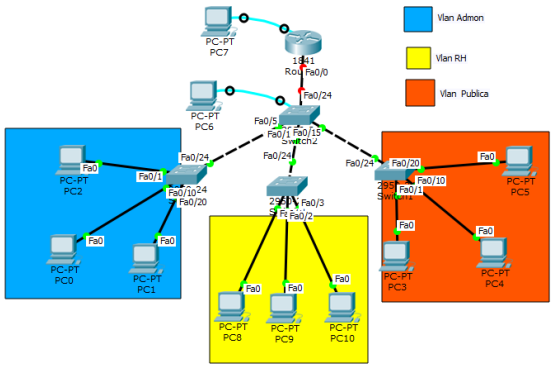


Figura 2. Topología de la vlan.

Existen distintos tipos de vlan como son:

- Vlan por MAC: son aquellos tipos de vlans donde se asocian a la dirección física (MAC) con respecto a una vlan en particular, son sencillas de configurar pero implica mantener actualizada los registros de las direcciones MAC, y como sabemos en las redes LAN existe generalmente una gran movilidad de direcciones físicas.

- Vlan por puertos: es aquel tipo de vlan donde se asocia al dispositivo en función al puerto donde este se encuentra conectado físicamente, son simples de configurar pero si el equipo se conecta a otro puerto este equipo pertenecerá a otra vlan, estos tipos de vlans son ideales para redes estáticas o con equipos fijos.
- Vlan por protocolo: son aquellas que van a segmentar el tráfico según el protocolo de red que se va a utilizar, son muy poco común en estos días , ya que la gran mayoría de las redes actuales son multiprocolo.

La vlan a utilizar serán vlans por puertos, dada la facilidad de implementación y su eficiencia en el manejo de la segmentación o división del tráfico en capa 2, cabe señalar que la mayoría de los switches administrables independientemente del fabricante soportan las vlans de este tipo.

2.3 Configuración de dispositivos de capa 2 (switch)

Para la tercera etapa de la metodología que consiste en la configuración de los dispositivos de red de capa 2 se deben de crear las vlans mediante los comandos CLI (para este caso se utilizaron los switches Cisco 2950-24), asignar los puertos o interfaces a las respectivas vlans, y por último configurar los puertos VTP en el switch para el transporte de datos entre las vlans.

```
Switch>ena
Switch#conf t
Enter configuration commands, one per line.  End with CNTL/Z.
Switch(config)#vlan 10
Switch(config-vlan)#name admon
Switch(config-vlan)#exi
Switch(config)#vlan 20
Switch(config-vlan)#name rh
Switch(config-vlan)#exit
Switch(config)#vlan 30
Switch(config-vlan)#name publica
Switch(config-vlan)#exit
```

Figura 3. Creación de las vlans.

La creación de las vlans es un paso relativamente sencillo, para este caso en específico solo debemos de asignar un número de vlans señalando que el número de vlans no debe ser a los ya existentes, y segundo el nombre asignar a la vlans, como se muestra en la figura 3.

```
Switch(config)#interface range fastEthernet 0/1-5
Switch(config-if-range)#sw
Switch(config-if-range)#switchport a
Switch(config-if-range)#switchport access vl
Switch(config-if-range)#switchport access vlan 10
Switch(config-if-range)#exit
Switch(config)#interface range fastEthernet 0/6-10
Switch(config-if-range)#switchport access vlan 20
Switch(config-if-range)#exit
Switch(config)#interface range fastEthernet 0/11-15
Switch(config-if-range)#switchport access vlan 30
Switch(config-if-range)#exit
```

Figura 4. Asignación de los puertos a las vlans correspondientes.

La asignación de los puertos a las vlans determina que puerto pertenece a que vlans, para de esta manera eficientar el tráfico y disminuir el tráfico innecesario entre usuarios de diferentes tipos.

```
Switch(config)#interface range fastEthernet 0/16-23
Switch(config-if-range)#sh

%LINK-5-CHANGED: Interface FastEthernet0/16, changed state to administratively down

%LINK-5-CHANGED: Interface FastEthernet0/17, changed state to administratively down

%LINK-5-CHANGED: Interface FastEthernet0/18, changed state to administratively down

%LINK-5-CHANGED: Interface FastEthernet0/19, changed state to administratively down

%LINK-5-CHANGED: Interface FastEthernet0/20, changed state to administratively down

%LINK-5-CHANGED: Interface FastEthernet0/21, changed state to administratively down

%LINK-5-CHANGED: Interface FastEthernet0/22, changed state to administratively down

%LINK-5-CHANGED: Interface FastEthernet0/23, changed state to administratively down
Switch(config-if-range)#exit
Switch(config)#interface fa
Switch(config)#interface fastEthernet 0/24
Switch(config-if)#sw
Switch(config-if)#switchport mo
Switch(config-if)#switchport mode tr
Switch(config-if)#switchport mode trunk
```

Figura 5.apagado de los puertos sin uso y configuración del puerto trunk (VTP).

Como parte de la configuración del switch es necesario apagar (shutdown) los puertos 16 al 23 ya que son puertos sin utilizar, y el puerto 24 se configura como puerto o interfaz troncal (VTP) para el tráfico de las vlan, como se muestra en la figura 5.

```
Switch#show vlan brief

VLAN Name                             Status    Ports
---- -------------------------------- --------- -------------------------------
1    default                          active    Fa0/16, Fa0/17, Fa0/18, Fa0/19
                                                Fa0/20, Fa0/21, Fa0/22, Fa0/23
10   admon                            active    Fa0/1, Fa0/2, Fa0/3, Fa0/4
                                                Fa0/5
20   rh                               active    Fa0/6, Fa0/7, Fa0/8, Fa0/9
                                                Fa0/10
30   publica                          active    Fa0/11, Fa0/12, Fa0/13, Fa0/14
                                                Fa0/15
1002 fddi-default                     active
1003 token-ring-default               active
1004 fddinet-default                  active
1005 trnet-default                    active
Switch#sh vlan
```

Figura 6. Se muestra las vlans creadas con sus correspondientes puertos.

```
interface FastEthernet0/16
 shutdown
!
interface FastEthernet0/17
 shutdown
!
interface FastEthernet0/18
 shutdown
!
interface FastEthernet0/19
 shutdown
!
interface FastEthernet0/20
 shutdown
!
interface FastEthernet0/21
 shutdown
!
interface FastEthernet0/22
 shutdown
!
interface FastEthernet0/23
 shutdown
!
interface FastEthernet0/24
 switchport mode trunk
!
```

Figura 7. Puertos apagados y troncal activa respectivamente.

En resumen en este punto ya se tienen configurada la segmentación del tráfico por medio de vlans, asignados los puertos a las vlans, apagados los puertos sin utilizar y creada la interfaz troncal (VTP) en el switch de cisco 2950-24, en lo referente a capa 2.

2.4 Implementación de las Intervlans - routing

La cuarta fase se caracteriza por la por la implementación del enrutamiento intervlans con dispositivos de capa 3, para este caso con un router cisco 1841 para que permita la

comunicación entre las vlans y sea más eficiente el tráfico. Se crean las subinterfaces (interfaces de red virtuales) para cada vlans a la par con el encapsulamiento mediante el estándar 802.1q, asignación de las direcciones ip con base a los cálculos vlsm y finalmente la configuración del protocolo DHCP para la asignación dinámica de IP en los host.

```
Router(config-subif)#encapsulation dot1Q 10
Router(config-subif)#ip
Router(config-subif)#ip add
Router(config-subif)#ip address 172.16.0.190 255.255.255
                                             ^
% Invalid input detected at '^' marker.

Router(config-subif)#ip address 172.16.0.190 255.255.255.192
Router(config-subif)#exit
Router(config)#interface fastEthernet 0/0.20
Router(config-subif)#
%LINK-5-CHANGED: Interface FastEthernet0/0.20, changed state to up

%LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface FastEthernet0/0.20, changed
state to up
encapsulation dot1Q 20
Router(config-subif)#ip address 172.16.0.222 255.255.255.224
Router(config-subif)#exit
Router(config)#interface fastEthernet 0/0.30
Router(config-subif)#
%LINK-5-CHANGED: Interface FastEthernet0/0.30, changed state to up

%LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface FastEthernet0/0.30, changed
state to up
encapsulation dot1Q 30
Router(config-subif)#ip address 172.16.0.126 255.255.255.128
Router(config-subif)#exit
```

Figuara 8. Creación de las subinterfaces, encapsulamientos de las vlans mediante el protocolo 802.1q y asignación de las direcciones ip correspondientes.

```
Router(config)#service dhcp
Router(config)#ip dh
Router(config)#ip dhcp ex
Router(config)#ip dhcp excluded-address 172.16.0.190
Router(config)#ip dh
Router(config)#ip dhcp po
Router(config)#ip dhcp pool admon
Router(dhcp-config)#net
Router(dhcp-config)#network 172.16.0.128 255.255.255.192
Router(dhcp-config)#de
Router(dhcp-config)#default-router 172.16.0.190
Router(dhcp-config)#exit
Router(config)#ip dhcp excluded-address 172.16.0.222
Router(config)#ip dhcp pool rh
Router(dhcp-config)#network 172.16.0.192 255.255.255.224
Router(dhcp-config)#default-router 172.16.0.222
Router(dhcp-config)#exit
Router(config)#ip dhcp excluded-address 172.16.0.126
Router(config)#ip dhcp pool publica
Router(dhcp-config)#network 172.16.0.0 255.255.255.128
Router(dhcp-config)#default-router 172.16.0.126
Router(dhcp-config)#exit
Router(config)#wr
```

Figura 9. Configuración del protocolo DHCP.

El protocolo DHCP es un protocolo que pertenece a la capa de aplicación del modelo tcp/ip, que nos ofrece la facilidad de asignar los parámetros ip (dirección ip, mascara de subred, puerta de enlace, dns) para que un host se pueda integrarse a una red basada en ip, facilitando al administrador de la red configurar manualmente cada host que integra la Lan.

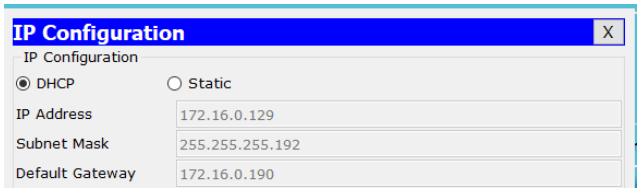


Figura 10. Obtención de los parámetros ip mediante el protocolo DHCP.

2.5 Fase de prueba y validación.

En esta última fase se deben de verificar la conectividad dentro las vlans mediante el comando ping, que es un comando muy sencillo y popular pero útil para comprobar que exista comunicación entra las distintas vlans que se hayan creado.

```
Packet Tracer PC Command Line 1.0
PC>ping 172.16.0.193

Pinging 172.16.0.193 with 32 bytes of data:

Reply from 172.16.0.193: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.0.193: bytes=32 time=3ms TTL=127
Reply from 172.16.0.193: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.0.193: bytes=32 time=0ms TTL=127

Ping statistics for 172.16.0.193:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
Approximate round trip times in milli-seconds:
    Minimum = 0ms, Maximum = 3ms, Average = 0ms
```

Figura 11. Prueba 1 de conectividad intervlan.

En la figura 11 se realiza una prueba de conectividad entre el host perteneciente a la vlan admon con dirección ip 172.16.0.129 hacia el host 172.16.0.193 perteneciente a la vlan RH, donde podemos observar que se entregaron la totalidad de paquetes de un host hacia otro

```
Packet Tracer PC Command Line 1.0
PC>ping 172.16.0.3

Pinging 172.16.0.3 with 32 bytes of data:

Reply from 172.16.0.3: bytes=32 time=1ms TTL=127
Reply from 172.16.0.3: bytes=32 time=12ms TTL=127
Reply from 172.16.0.3: bytes=32 time=11ms TTL=127
Reply from 172.16.0.3: bytes=32 time=13ms TTL=127

Ping statistics for 172.16.0.3:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
Approximate round trip times in milli-seconds:
    Minimum = 1ms, Maximum = 13ms, Average = 9ms

PC>
```

Figura 12. Prueba 2 de conectividad intervlan.

En esta segunda prueba el equipo perteneciente a la vlan RH con dirección ip 172.16.0.194 realiza un ping a la dirección ip 172.16.0.3 perteneciente a la vlan pública de igual manera se realiza de forma exitosa entregando la totalidad de los paqutes.

```
Packet Tracer PC Command Line 1.0
PC>ping 172.16.0.131

Pinging 172.16.0.131 with 32 bytes of data:

Reply from 172.16.0.131: bytes=32 time=1ms TTL=127
Reply from 172.16.0.131: bytes=32 time=1ms TTL=127
Reply from 172.16.0.131: bytes=32 time=18ms TTL=127
Reply from 172.16.0.131: bytes=32 time=0ms TTL=127

Ping statistics for 172.16.0.131:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
Approximate round trip times in milli-seconds:
    Minimum = 0ms, Maximum = 18ms, Average = 5ms
```

Figura 13. Prueba 3 de conectividad intervlan.

La última prueba se lleva entre la vlan publico con dirección 172.16.0.1 hacia el host 172.16.0.131 de la vlan admon entregando la totalidad de los paquetes sin perdida alguna.

Realizadas las pruebas podemos constatar que la comunicación entre las distintas vlans se efectúa de forma eficiente al igual que la asignación de las direcciones ip a través del protocolo DHCP conforme los esquemas vlsm para cada vlans. De esta manera en forma general a nivel de toda la LAN se logra segmentar el tráfico a nivel de capa 2 y la comunicación intervlans mediante el router (capa 3).

3. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

La implementación de vlans en una red Lan nos proporciona resultados más que tangibles ya que mejora considerablemente el rendimiento, seguridad y la gestión del tráfico a nivel de capa 2, pero también nos presenta una serie de desafíos a tomar a cuenta. Podemos citar como puntos a favor: la mejora en el rendimiento porque reduce la congestión de la red al limitar los dominios de broadcast, eficienta el ancho de banda al dividir o segmentar el tráfico por medio de vlans (redes lógicas) para este caso en grupos definidos como se muestra en la figura 2. Mejora la seguridad ya que aísla por grupos (vlans) dispositivos críticos o de accesos no autorizados. Facilita la administración dado que nos permite agrupar los dispositivos por función o características particulares. Escalabilidad, este modelo de gestión facilita la integración de nuevos dispositivos sin la necesidad de reconfigurar la estructura física, y es totalmente compatible con nuevas tecnologías como VoIP, QoS, etc. Las consideraciones a tomar a cuenta sería la complejidad inicial que implica el análisis de la red actual (red ya en funcionamiento o producción), definir la cantidad de vlans y de host por cada segmento, la distribución de las direcciones ip aplicando vlsm (mascara de subred de longitud variable) para cada subred, la implementación del enrutamiento intervlan lo que implica contar con equipos especializados de capa 3 (routers) al igual que switches que soporten esta tecnología. Las Vlans resuelven una pequeña parte de la compleja administración del tráfico o congestionamiento de las redes pero es uno de las primeras etapas medulares por implementar en la gestión del tráfico. La gestión de la seguridad mediante la implementación de vlans es una pequeña parte del conjunto de herramientas que podemos implementar para mejorar la gestión, administración y seguridad, existen mecanismos como son los firewalls, ACL, portales cautivos que trabajando conjuntamente mejorarán exponencialmente la seguridad en la red. Mediante la implementación de las vlans se espera una mejora del trafico de entre 30 al 60%, optimización del ancho de banda entre el 20 y 40%, los porcentajes van variando dependiendo del tamaño de la red LAN.

4. CONCLUSIONES

La segmentación del tráfico mediante vlans es una solución confiable y eficaz en redes Lan, proporcionarán resultados significativos en cuanto a la administración de la red, seguridad y eficiencia en el tráfico, pero de igual manera presenta desafíos de diseño y de costos. La falta o ausencia de implementar vlans supone una mala gestión del tráfico y riesgos de seguridad ya que todos los dispositivos independientemente de su naturaleza comparten el mismo dominio de broadcast generando una serie de problemas en muchos ámbitos como se mencionó anteriormente. Si bien su análisis, gestión e implementación requiere de conocimientos en el área y presupone una inversión en cuanto a costos de los equipos, los beneficios son visibles a mediano y largo plazo ya que mejora el rendimiento de la red Lan, la escalabilidad, y sin duda permite la integración de nuevas tecnologías sin la necesidad de modificaciones en los esquemas ya implementados. Como punto final las implementación de las vlans representan la diferencia entre una red administrada donde se privilegia el orden, la seguridad y el rendimiento sobre una red caótica, sin control y con problemas de seguridad. Su implementación no es solo una buena práctica sino también uno de los primeros pasos hacia una red eficientemente administrada.

REFERENCIAS

Lammle, T., 2016. CCNA Routing and Switching Complete Study Guide. Indianapolis: Sybex.

Odom, W., 2013. CCENT/CCNA ICND1 100-101 Official Cert Guide. Indianapolis: Cisco Press.

Tanenbaum, A.S. & Wetherall, D., 2011. Computer Networks. 5th ed. Boston: Pearson.

Cisco Systems, 2020. VLAN Configuration Guide for Catalyst Switches. [online] Cisco. Available at: https://www.cisco.com

Factors Influencing the Estimation of Software Projects in DevOps Environments

Bueno Najera Esteban, Valenzuela Robles Blanca Dina, Santaolaya Salgado René, Hernández García Humberto.

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Departamento de Ciencias Computacionales (e-mail: [m23ce002, blanca.vr, rene.ss, humberto.hg]@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: This study explores the factors that influence the estimation of software projects within DevOps environments, a practice that promotes continuous collaboration between development and operations. A mixed approach was employed, combining a systematic literature review with the application of the Delphi method to gather expert opinion. The objective was to identify the key factors that influence the planning of efforts, resources and time. The results show coincidences and divergences between theory and practice, highlighting elements such as communication, automation, collaborative work, culture, security, clear definition of requirements as critical aspects for an accurate estimation in DevOps environments, allowing a better comparison between the aspects found in the literature and by people working within the environment.

Keywords: Estimation factors, DevOps, software projects, Delphi.

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el desarrollo de software ha evolucionado de manera significativa por la incorporación de metodologías ágiles especialmente DevOps, que promueven ciclos de entrega más rápidos, colaboración constante entre equipos y una mejora continua en los procesos.

Estimar correctamente los recursos, tiempo y esfuerzo necesarios para llevar a cabo un proyecto es fundamental para su éxito. En la metodología DevOps donde los cambios son frecuentes y las decisiones deben tomarse con rapidez, los factores que influyen en la estimación pueden variar considerablemente y no siempre están claramente definidos.

Esta investigación se centra en la necesidad creciente de contar con mejores herramientas y conocimientos para mejorar la toma de decisiones en equipos de desarrollo moderno. Al comprender mejor qué factores afectan la estimación en estos contextos, se puede contribuir a una planificación más realista, eficiente y alineada.

Esta investigación plantea un estudio exploratorio, orientado a determinar los factores que impactan directamente en la estimación de proyectos de software en contextos ágiles. Para lograr el objetivo planteado, se utilizó el método Delphi como herramienta central, permitiendo recopilar y sintetizar la opinión de expertos, con el fin de alcanzar un consenso informado sobre los factores más relevantes.

Los expertos proporcionan la información necesaria para obtener los indicadores respecto a los factores que afectan o están presentes al realizar las estimaciones de proyectos en entornos DevOps. Además, los expertos aportan información relevante utilizada actualmente en la industria, lo cual contribuye a mejorar la planificación de los proyectos. Dado que en entornos DevOps los cambios son constantes y las decisiones deben tomarse con rapidez, contar con estimaciones precisas es fundamental para el éxito de los proyectos.

2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

De acuerdo a [1] “los métodos ágiles superan a los métodos tradicionales en términos de beneficios, pero su implementación plantea muchos desafíos debido a una serie de cuestiones, entre las que se encuentran la cultura organizacional y el empoderamiento del equipo del proyecto. Esto ha dado como resultado que varias industrias se adhieran a los métodos tradicionales a pesar de los abrumadores beneficios de los métodos ágiles. En la gestión de proyectos ágiles, se hace hincapié en el tiempo más breve posible para crear el software y en la facilidad con la que se crea el software para el cliente, en lugar de ceñirse estrictamente a los procesos y a la complejidad de los diseños y los procedimientos de implementación, que en la mayoría de los casos dan lugar a retrasos”.

Actualmente las empresas necesitan que sus proyectos sean desarrollados y puestos en marcha en el menor tiempo posible, es por ello que se ha investigado la forma de llevarlo a la práctica, a continuación, se mencionan algunos trabajos que se

encuentran en la literatura los cuales utilizan DevOps, dentro de su redacción se mencionan factores que afectan desarrollo de proyectos.

2.1 Factores de estimación en metodologías ágiles

De acuerdo a [2] Dentro de este trabajo se menciona como un factor el costo el cual está enfocado directamente al desarrollo de proyectos de software los cuales sino se realizan de forma correcta puede provocar desbalance afectando a todo el proyecto, algunas causas que pueden afectar el costo en el desarrollo de proyectos son: la mala planificación, las necesidades cambiantes del mercado y la coordinación del equipo, sin embargo menciona algunos más críticos como son: la complejidad técnica, el conocimiento del desarrollador, la experiencia previa del equipo, los requisitos cambiantes o poco claros y la comunicación cliente/usuario.

En este trabajo [3] la variable del costo se encuentra dividida por dos sub factores: los factores de escala y de recursos. En el primero se encuentran el lenguaje de programación, el dominio de aplicación del software, el tipo de desarrollo y el ciclo de vida del desarrollo, y en los segundos están: el tamaño del software, la complejidad del proyecto, las actividades de gestión, la complejidad de las interfaces y la integración del sistema, la madurez del proyecto, la duración del proyecto, el tamaño y la estructura del equipo, la novedad del proyecto, documentación actualizada, disponibilidad del cliente, conocimiento limitado del cliente respecto a la definición de requisitos y su incapacidad en términos de toma de decisiones, y por último los recursos como la falta de herramientas especializadas, falta de documentación, arquitectura inadecuada, deuda técnica creciente y estimación imprecisa de costos y cronogramas.

De acuerdo a [4] en este estudio se encuentran factores que impactan directamente en el costo desde la perspectiva del desarrollador en el marco de gestión de proyectos de scrum, los que se mencionan son: Problema de coordinación, tamaño del equipo, complejidad, sesiones de reuniones constantes, cambio de solicitud por parte del propietario o cliente.

2.2 Factores de estimación en DevOps

En el artículo [5] Se encuentran para la estimación del esfuerzo 19 factores como lo es: la mala comunicación, la comunicación natural, las mediciones, el monitoreo, los silos de la organización, el flujo de información en la organización, el entorno de prueba insatisfactorio, la pila de tecnología, la habilidad y la experiencia, la empatía, el intercambio de conocimientos, el lenguaje de programación, la importancia de las otras tareas, la expectativa del cliente, el uso del software por parte del cliente, la capacidad de respuesta a las necesidades del cliente, el proceso de implementación, la infraestructura como código, las operaciones de TI no involucradas en las tareas de especificación de requisitos, sin embargo se toman los siete más importantes respecto a la literatura que encontraron y estos son los siguientes factores: comunicación, mediciones, monitoreo, pila de tecnología, intercambio de conocimientos, habilidades y experiencia, y proceso de implementación.

En el documento [6] muestra factores de éxito en las gestiones de proyectos realizados bajo la metodología de DevOps y a continuación se mencionan: Diseñar una línea base común para Dev y Ops, Herramientas y automatización para una integración continua, Cerrar el círculo entre monitoreo y planificación, Planificación de las necesidades de infraestructura de TI, Aplicar las 3P correctas (People, Processes and Partners), Estimar los recursos de la actividad, Negociar para obtener los mejores recursos dentro de la organización, Técnica de optimización de recursos, Administrar recursos compartidos entre equipos de DevOps, Gestionar el cambio organizacional y cultural, Expectativas de las partes interesadas y umbrales de riesgo, Gestionar y monitorear la participación de las partes interesadas, Comunicaciones entre las partes interesadas, Estrategias de gestión de conflictos, Coordinación de la comunicación entre equipos de DevOps, Canales de comunicación claros Estrategias de intercambio de conocimientos, Emplear mejor el acceso a la información y las aplicaciones, Establecer políticas y procedimientos de gestión del alcance, Definir la línea base del alcance, Plan de gestión del alcance, Políticas de adquisiciones, Planes y cronogramas de adquisiciones., Estructura de soporte confiable, Estimar la duración de las actividades, Seguimiento y trazabilidad en tiempo real Gestione el proceso continuo de DevOps, Realizar análisis de riesgos cuantitativos, Implementar respuestas a los riesgos, Plan de gestión de Riesgos, Desarrollar estándares de evaluación y mejora de la calidad, Actividades de control de calidad y gestión de calidad planificadas para el consejo de control de calidad de DevOps, Pronósticos de costos para procesos de Dev y Ops, Seguimiento y control de presupuestos en Dev y Ops, Análisis de costo-beneficio para desarrollo y operaciones continuos.

Dentro de este artículo (DevOps in 2020: Navigating the Modern Software Landscape) menciona los factores que están enfocados para elegir la metodología de desarrollo, estos factores son: Complejidad, Adaptabilidad, Colaboración con el cliente, Limitaciones de tiempo, Dinámica de equipo, Gestión de riesgos, Asignación de recursos, Requisitos de cumplimiento, Adecuación cultural, Aprendizajes de la historia, estos también se deberían de tomar en cuenta para el desarrollo de proyectos.

2.3 Métodos, algoritmos y métricas para estimación

Dentro de la investigación [7] muestra las diferentes métricas para la estimación del esfuerzo en el desarrollo de proyectos de software, estos son: MMRE, MdMRE, Pred, R2, MAR, costo, tiempo, RE, Media, Consenso, AE, SA, además de mencionar que modelo de validación que se utilizó para cada uno de los casos, abriendo el panorama para los usuarios.

Además en el artículo se mencionan varios factores que afectan directamente al esfuerzo esto son: la experiencia del desarrollador, las historias de usuario grandes, la calidad del equipo, los requisitos de las historias de usuario, todos estas

influyen en la estimación del esfuerzo, además de otras que pueden estar relacionadas con las primeras las cuales son: como la comunicación, las mediciones, la supervisión, la pila de tecnología, el intercambio de conocimientos, las competencias y la experiencia.

Además, proporciona una comprensión integral de la estimación del esfuerzo en el desarrollo de software ágil y DevOps, estableciendo una base sólida para proponer nuevos enfoques que mejoren este proceso crucial. A través de un mapeo sistemático de la literatura, se identifican los algoritmos y métodos empleados, las métricas utilizadas para evaluar la precisión de las estimaciones, así como los procesos de validación aplicados. Este estudio busca llenar el vacío existente en la literatura actual respecto a la estimación del esfuerzo en la fase operativa de los proyectos DevOps, ya que la mayoría de los estudios previos se han enfocado principalmente en entornos tradicionales o en la etapa de desarrollo del software.

Dentro de esta investigación [8] menciona información sobre una investigación recabada de documentos encontrados dentro de la literatura, así como menciona cuales dentro de la investigación son más relevantes y tienen un mayor impacto dentro de los procesos de desarrollo, realizando una clasificación de los mismos.

3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

El objetivo de la investigación es conocer los factores que intervienen y afectan en el desarrollo de proyectos realizados en DevOps, esto se validará con el apoyo de expertos en el área, es decir, personas conocedoras del tema DevOps. A través de un cuestionario diseñado como instrumento de recolección de datos, se obtendrán respuestas fundamentadas sobre los factores más importantes que se buscan en esta investigación. La información recabada permitirá mejorar los procesos, facilitar una toma de decisiones más informada y contribuir al desarrollo de software de alta calidad en el menor tiempo posible. Uno de los objetivos principales es optimizar los tiempos de entrega sin comprometer la calidad del producto final.

3.1 Diseño del cuestionario

Para la realización del cuestionario se utilizaron diferentes enfoques, visto desde el área operativa, así como los desarrolladores que intervienen en el proceso, en algunos casos no solo las áreas internas intervienen sino también los instrumentos que se utilizan en el desarrollo del proyecto, por ejemplo, el tema tecnológico, social o cultural el cual está unido con los proyectos.

Cada área del proceso de DevOps es importante, es por ello que cada una de ellas se consideraron en el diseño del cuestionario, considerando inclusive a aquellas que no son tan relevantes, un principio fundamental de la filosofía de DevOps es la colaboración y la integración continua entre los equipos de desarrollo para cumplir con los objetivos planteados desde la planeación, hasta el término del proyecto.

3.2 Validación del instrumento a utilizar

El cuestionario en esta investigación se utilizó como instrumento principal para recoger información que afectan las estimaciones en los proyectos de desarrollo de software en entornos DevOps, el cuestionario se llevó a cabo mediante el método Delphi, técnica que permite a los participantes estar de forma remota y anónima para contestar preguntas del instrumento, esta técnica permite realizar varias iteraciones con los expertos con el objetivo de refinar y encontrar los factores, de manera consensual que afectan a las estimaciones de los proyectos en DevOps.

Antes de enviar el cuestionario a los expertos, es necesario validar el instrumento para asegurar que las preguntas sean claras, comprensibles y pertinentes. Esta validación es fundamental, ya que de ella depende que las respuestas obtenidas sean precisas y relevantes. El proceso se lleva a cabo con personas distintas a los expertos, quienes evalúan la redacción y la coherencia de las preguntas antes de su aplicación definitiva. Pertinencia: En el instrumento la pertinencia se enfoca sí la pregunta al leerla tiene relación con las otras y no se están tratando temas diferentes evitando confundir a la persona que leerá la información.

3.3 Recogida de información para la validación del instrumento.

Las personas que se tomaron en cuenta para la validación del instrumento tienen un perfil de analistas, ya que con sus conocimientos proporcionan mejores respuestas respecto a cómo están estructuradas las preguntas, lo que permite que al momento de enviarlas a los expertos no cause dudas y que sus respuestas proporcionen mejores resultados.

Una vez que se ha validado el cuestionario, la información recabada permite descartar aquellas preguntas que por alguna razón no fueron entendidas o estaban escritas de forma incorrecta, dejando solo aquellas que para el fin de la investigación sean más relevantes, con ello se asegura que los expertos nos proporcionarán información que aporte a nuestra investigación.

A continuación, se presentan la gráfica correspondiente al primer envío del cuestionario mostrado en la Figura 1, referente a los ítems de redacción y pertinencia. El cuestionario fue enviado a un total de 80 personas que cumplían con el perfil requerido para participar en el proceso de validación. Sin embargo, únicamente 13 de ellas respondieron el cuestionario de forma completa, el cual estaba compuesto por 32 preguntas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en esta fase del estudio.

En la Figura 1 se presenta el umbral de aceptación, establecido en un valor de 4.4 o superior, calculado a partir de la media. De las 32 preguntas evaluadas, 23 fueron aceptadas sin modificaciones, 7 se ajustaron para mejorar su claridad o relevancia, y 3 fueron eliminadas por considerarse irrelevantes.

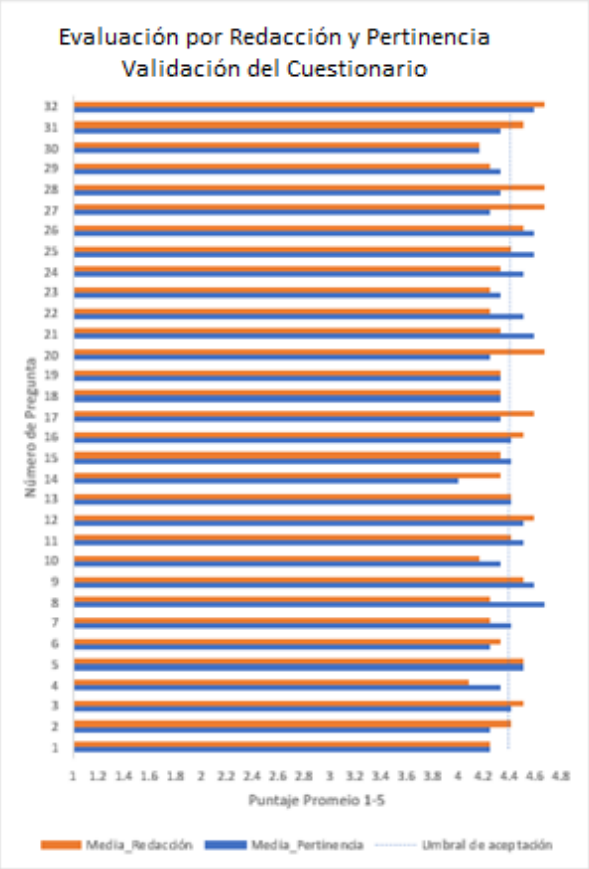


Figura 1 Evaluación por pertinencia y redacción

La acción tomada para cada respuesta después de recibirla de parte de las personas que evaluaron las preguntas, se determina mediante una media cuales son aceptadas, se pueden aceptar con modificaciones y cuales no alcanzan el puntaje para tomarse en cuenta como se muestra en la Tabla 1.

Para ello, se utilizó la técnica de la V de Aiken, la cual permite calcular un índice de consenso entre expertos a partir de las valoraciones otorgadas a cada ítem. Este índice facilita la identificación de un umbral de aceptación, mediante el cual se determina si una pregunta debe ser aceptada, modificada o eliminada. Tal como se muestra en la Tabla 1, de las 32 preguntas evaluadas, las preguntas 1, 6, 10, 18, 19, 23 y 29 fueron modificadas debido a que sus puntuaciones se encontraban cercanas al umbral, sin diferenciarse significativamente de este. Las preguntas 4, 14 y 30 fueron eliminadas debido a la baja puntuación obtenida. Las preguntas restantes fueron aceptadas por superar el umbral de aceptación establecido.

Tabla 1 Acción tomada para cada pregunta después de la validación

Pregunta	Media Pertinencia	Media Redacción	Acción Tomada
1	4.25	4.25	modificada
2	4.25	4.416666667	aceptada
3	4.416666667	4.5	aceptada
4	4.333333333	4.083333333	rechazada
5	4.5	4.5	aceptada
6	4.25	4.333333333	modificada
7	4.416666667	4.25	aceptada
8	4.666666667	4.25	aceptada
9	4.583333333	4.5	aceptada
10	4.333333333	4.166666667	modificada
11	4.5	4.416666667	aceptada
12	4.5	4.583333333	aceptada
13	4.416666667	4.416666667	aceptada
14	4	4.333333333	rechazada
15	4.416666667	4.333333333	aceptada
16	4.416666667	4.5	aceptada
17	4.333333333	4.583333333	aceptada
18	4.333333333	4.333333333	modificada
19	4.333333333	4.333333333	modificada
20	4.25	4.666666667	aceptada
21	4.583333333	4.333333333	aceptada
22	4.5	4.25	aceptada
23	4.333333333	4.25	modificada
24	4.5	4.333333333	aceptada
25	4.583333333	4.416666667	aceptada
26	4.583333333	4.5	aceptada
27	4.25	4.666666667	aceptada
28	4.333333333	4.666666667	aceptada
29	4.333333333	4.25	modificada
30	4.166666667	4.166666667	rechazada
31	4.333333333	4.5	aceptada
32	4.583333333	4.666666667	aceptada

Además, se utilizó el coeficiente de Aiken de acuerdo a la ecuación 1 (ec. 1) para determinar la validez de las respuestas. Esta herramienta permite una evaluación más precisa, facilitando la identificación del nivel de aceptación de cada una de las preguntas, para la aceptación de las preguntas mediante la V de Aiken se considera un mínimo de 85.

$$V = \frac{\bar{X} - l}{k} \qquad \text{(ec. 1)}$$

Donde:

V = Coeficiente V de Aiken
$\bar{X}$ = Promedio de las calificaciones de todos los jueces.
l = Calificación mínima.
K= Es la resta de la calificación máxima menos la calificación mínima (5-1).

A continuación, se presenta la Tabla 2 con los resultados obtenidos mediante la aplicación de la V de Aiken al conjunto de datos.

Tabla 2. Resultado de la aplicación de V de Aiken

No	Pertinencia	Redacción
1	0.81	0.81
2	0.81	0.85
3	0.85	0.88
4	0.83	0.77
5	0.88	0.88
6	0.81	0.83
7	0.85	0.81
8	0.92	0.81
9	0.90	0.88
10	0.83	0.79
11	0.88	0.85
12	0.88	0.90
13	0.85	0.85
14	0.75	0.83
15	0.85	0.83
16	0.85	0.88
17	0.83	0.90
18	0.83	0.79
19	0.83	0.83
20	0.81	0.92
21	0.90	0.83
22	0.88	0.77
23	0.83	0.79
24	0.88	0.83
25	0.90	0.85
26	0.90	0.88
27	0.81	0.92
28	0.83	0.92
29	0.83	0.81
30	0.79	0.79
31	0.83	0.79
32	0.90	0.79

El resultado después de aplicar la V de Aiken a la información obtenida, se observa el porcentaje de aceptación de pertinencia y redacción de los ítems evaluados. Siguiendo el método Delphi una vez que se tienen las nuevas preguntas se deben mandar a los participantes nuevamente para que nos indiquen si las modificaciones tienen correcta redacción y tienen pertinencia de cada una de las preguntas.

3.4 Envío del instrumento a los expertos en el tema.

Una vez validado el instrumento, se envía el cuestionario a los participantes expertos en el tema, con el fin de que, a partir de su experiencia, puedan evaluar los factores relevantes en las estimaciones de proyectos de software en entornos DevOps.

Para nuestra investigación, la participación de expertos es fundamental, ya que su experiencia permite obtener información valiosa sobre los factores que afectan los proyectos en entornos DevOps. Por esta razón, el número de participantes resulta relevante. En total, se enviaron 89 invitaciones para responder el cuestionario; de estas, solo 24 personas aceptaron participar. Cabe destacar que cuatro de ellas respondieron el cuestionario en su versión traducida al inglés, ya que indicaron no hablar español durante la interacción.

4 APLICACIÓN DEL INSTRUMENTO

4.1 Aplicación a la muestra objetivo

El cuestionario se aplicó a personas que están dentro del ambiente en DevOps, es decir que su trabajo diario lo desarrollan en base esto, es importante porque la información que se busca en esta investigación es conocer cuáles factores impactan en el ámbito industrial ya que ahí es principalmente a quienes se pretende ayudar con este trabajo
Por medio del cuestionario se les informa a las personas interesadas en participar, quién solicita su aporte, a qué institución está adscrito y cuál es el tratamiento de la información recabada; Esto es especialmente importante ya que algunas de las personas participantes laboran en empresas donde los datos deben manejarse de manera confidencial; Cabe destacar que el cuestionario no solicita nombres o datos personales, dado que no es relevante para los fines de la investigación.

4.2 Recopilación de datos

Durante la recopilación de datos, se verificó que todas las preguntas del cuestionario estuvieran completamente respondidas. No se identificaron respuestas erróneas, ya que el instrumento fue diseñado con opciones de respuesta predefinidas; Esta estrategia tuvo como propósito minimizar posibles errores, facilitar la elección de respuestas por parte de los participantes y reducir el tiempo requerido para completar el cuestionario.

Las respuestas proporcionadas por los analistas durante la validación del instrumento, así como por los expertos en su aplicación, fueron transformadas a una escala estandarizada con el fin de obtener resultados más uniformes y manejables. Para esta conversión, se empleó la escala de Likert, ya que es la que proporciona mejores resultados en este tipo de análisis; En este caso se utilizó una escala del 1 al 5 donde 1 corresponde a poco o nada de acuerdo y 5 corresponde a completamente de acuerdo.

4.3 Análisis:

Una vez recopilada la información proporcionada por los expertos, se procedió a sumar las respuestas correspondientes a cada factor, lo que permitió identificar la cantidad de expertos que coincidían en cada una de ellas. En algunos casos, se observaron respuestas variadas, mientras que en otros hubo total coincidencia entre los expertos. Esto refleja que las diferencias o similitudes en las respuestas pueden estar influenciadas por su área de trabajo.

4.4 Interpretación de resultados:

Al comparar las respuestas obtenidas con el objetivo planteado en esta investigación, se puede afirmar que se han cumplido los objetivos. Los expertos consultados proporcionaron información precisa y confiable, ya que están directamente

involucrados en los proyectos DevOps que se desarrollan en sus respectivas empresas.

La Figura 2 muestra una comparación entre tres opciones evaluadas con respecto a diversos factores críticos que influyen en la estimación de proyectos en entornos DevOps. Los factores analizados incluyen lenguaje de programación, requisitos, configuración, equipo, despliegue, infraestructura, monitoreo, pruebas, seguridad, cultura y automatización.

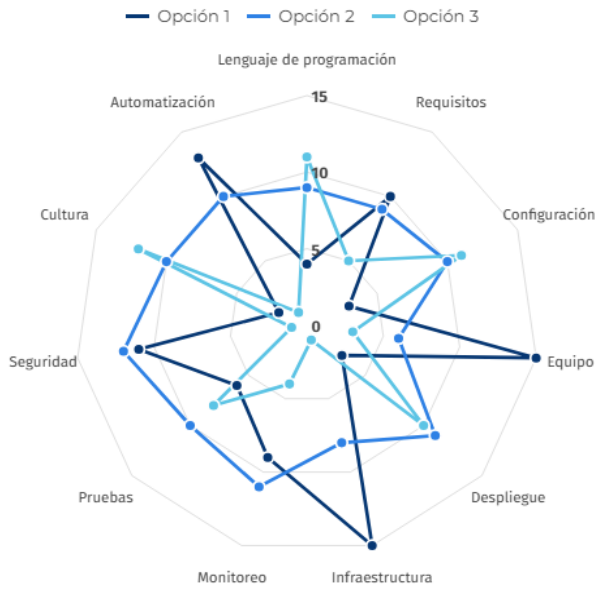


Figura 2. Principales factores extraídos de las respuestas de los expertos

Se observa que la Opción 1 presenta valores consistentemente altos en los factores de equipo, infraestructura y automatización, lo cual sugiere un enfoque más técnico-operativo, posiblemente orientado a entornos con una fuerte base tecnológica y procesos bien establecidos. Esta opción también se destaca en seguridad y cultura, lo que indica una posible madurez organizacional en prácticas DevOps.

Por otro lado, la Opción 2 muestra un comportamiento más equilibrado en la mayoría de los factores, sin sobresalir ni quedar por debajo en ninguno de forma extrema. Esto podría interpretarse como una alternativa intermedia o flexible, adecuada para organizaciones que buscan un balance entre procesos y tecnología.

En contraste, la Opción 3 destaca particularmente en lenguaje de programación y cultura, pero presenta valores bajos en infraestructura y monitoreo, lo que podría indicar una orientación más centrada en el desarrollo que en la operación. Esta debilidad en aspectos operativos puede impactar negativamente en la precisión de la estimación si no se corrige. En general, los resultados permiten identificar fortalezas y áreas de mejora en cada opción, lo cual es útil para seleccionar o ajustar estrategias de estimación según las prioridades y capacidades de cada organización. Estos hallazgos también evidencian que no todos los factores tienen el mismo peso o nivel de implementación en cada contexto, lo que debe considerarse al establecer procesos de estimación en entornos DevOps.

4.5 Resultados y discusión:

Una vez obtenidas las respuestas de los expertos en el tema de DevOps y considerando la investigación previa, se puede afirmar que los expertos poseen información que no siempre se encuentra en la literatura académica. Esta literatura suele enfocarse en investigaciones desarrolladas en entornos controlados, como aulas, sin enfrentar problemas reales. En cambio, los expertos se desenvuelven directamente en el ámbito laboral y aplican de forma práctica las modificaciones establecidas durante la planificación inicial de los proyectos.

Perfil de los participantes

- Roles más comunes: Ingenieros de Automatización y CI/CD, y Administradores de Infraestructura en la Nube.
- Experiencia en DevOps: Predominantemente entre 6 a 10 años, con algunos entre 1 a 5 años.
- Tipo de organización: Principalmente del sector privado.

Técnicas de estimación utilizadas

- Scrum es el método de estimación más frecuentemente reportado.
- También se menciona el uso de historias de usuario, lo cual indica un enfoque ágil generalizado.

Participación del equipo de Operaciones

- La mayoría reporta un grado de involucramiento moderado a muy involucrado del equipo de Operaciones en la estimación de tiempos y recursos, lo cual sugiere una integración razonable entre desarrollo y operaciones.

Mejora continua y retrospectivas

- Aunque varios expertos indican que las retrospectivas se aplican frecuentemente ("Mucho"), también hay casos en los que se señala que se aplican "Poco" o "Nada", lo que podría reflejar variabilidad organizacional en la cultura DevOps.

Integración de prácticas ágiles con DevOps

- La mayoría coincide en que las prácticas están totalmente integradas, lo cual respalda la idea de una fusión metodológica sólida en estas organizaciones.

Automatización y cumplimiento normativo

- Alta automatización es la norma para cumplir con normativas y estándares, aunque algunos indican automatización parcial.
- En general, se requiere poco tiempo adicional para el cumplimiento normativo, salvo un caso aislado que indica "mucho tiempo adicional", lo cual puede apuntar a una necesidad de mejorar procesos de automatización.

Impacto de los Sprints

- Los Sprints son percibidos positivamente, acelerando el desarrollo y mejorando la colaboración, aunque en algunos casos se perciben como generadores de presión o carga adicional.

Los Sprints aceleran el desarrollo, mejoran la colaboración y facilitan las entregas regulares. Los tiempos no son exactos y se necesita poco tiempo adicional para cubrir el proyecto. La *automatización* debe ser alta para cumplir con los proyectos. Las mejoras a los procesos son importantes para la entrega de proyectos. La *cultura* DevOps debe ser en cada parte del proceso para cumplir con las expectativas. El feedback para mejorar la estimación. El *monitoreo* en los procesos ayuda a trabajar de forma más eficiente. La elasticidad de la *infraestructura* para adaptarse a los cambios. El *trabajo en equipo* de operaciones y desarrollo. Los requisitos del proyecto y los alcances son factores determinantes.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo como objetivo identificar los factores que influyen en la estimación de proyectos de software en entornos DevOps, mediante una combinación de revisión de literatura especializada y la aplicación del método Delphi con la participación de expertos en el área. Esta doble aproximación permitió obtener una visión más integral y actualizada sobre las prácticas reales de estimación en contextos dinámicos y colaborativos.

Los resultados revelan que factores como el lenguaje de programación, requisitos, configuración, equipo, despliegue, infraestructura, monitoreo, pruebas, seguridad, cultura, automatización, desempeñan un papel fundamental en las estimaciones. Estos elementos fueron consistentemente valorados tanto en la literatura como por los profesionales consultados, lo que valida su relevancia y aplicabilidad en entornos reales de desarrollo.

Una de las principales fortalezas del estudio radica en el contraste entre teoría y práctica. Mientras que los estudios previos se centran en entornos controlados o académicos, la información aportada por los expertos permitió enriquecer los hallazgos desde una perspectiva práctica, considerando los desafíos reales que enfrentan los equipos de desarrollo y operaciones.

Estos hallazgos ofrecen a la industria tecnológica una base sólida para mejorar sus procesos de planificación y estimación, reduciendo la incertidumbre y optimizando el uso de recursos. Implementar buenas prácticas relacionadas con estos factores críticos puede contribuir significativamente al éxito de los proyectos DevOps.

No obstante, se reconocen ciertas limitaciones, como la baja tasa de respuesta en la aplicación del cuestionario y las restricciones asociadas a la confidencialidad de los expertos participantes. Estas condiciones podrían haber reducido la diversidad de contextos representados en el estudio.

Para investigaciones futuras, se recomienda llevar a cabo estudios de caso dentro de organizaciones que operan bajo prácticas DevOps, así como explorar el desarrollo de herramientas de estimación automatizadas que incorporen los factores identificados en este trabajo.

REFERENCIAS

[1] Koi-Akrofi, G. Y., Akrofi, J. K. y Akwetey Matey, H., (2019). Understanding the Characteristics, Benefits and Challenges of Agile it Project Management: A Literature Based Perspective. International Journal of Software Engineering & Applications 10(5), 25–44.
[2] Abusaeed, S., Khan, S. U. R. y Mashkoor, A., (2023). A Fuzzy AHP-based approach for prioritization of cost overhead factors in agile software development. Applied Soft Computing.133, 109977.
[3] Radu, L.-D., (2019). Effort Prediction in Agile Software Development with Bayesian Networks. En: 14th International Conference on Software Technologies, 26–28 de julio de 2019, Prague, Czech Republic [en línea]. SCITEPRESS - Science and Technology Publications.
[4] Butt, S. A., Khalid, A., Ercan, T., Ariza-Colpas, P. P., Melisa, A.-C., Piñeres-Espitia, G., De-La-Hoz-Franco, E., Melo, M. A. P. y Ortega, R. M., (2022). A software-based cost estimation technique in scrum using a developer's expertise. Advances in Engineering Software.
[5] Meedeniya, D. y Thennakoon, H., (2021). Impact Factors and Best Practices to Improve Effort Estimation Strategies and Practices in DevOps. En: ICICM 2021: 2021 The 11th International Conference on Information Communication and Management, Tokyo Japan [en línea]. New York, NY, USA: ACM.
[6] Akbar, M. A., Khan, A. A., Islam, N. y Mahmood, S., (2023). DevOps project management success factors: A decision-making framework. Software: Practice and Experience.
[7] Alvarado, I., Castro Sanchez, N. A., Valenzuela Robles, B. D., Santaolaya Salgado, R. y González Serna, J. G., (2024). Algoritmos, métricas y validación en la estimación del esfuerzo y su impacto en la gestión de proyectos DevOps un mapeo sistemático de la literatura. ReCIBE, Revista electrónica de Computación, Informática, Biomédica y Electrónica
[8] Azad, N. y Hyrynsalmi, S., (2023). DevOps critical success factors — A systematic literature review. Information and Software Technology.

PÓSTER

CIENTÍFICO

Análisis espacial y temporal de gases contaminantes

Juan Francisco Escudero Villegas[1], Josué Daniel Rivera Fernández[1], Ian Ilizaliturri Flores[1], Macaria Hernández Chávez[1], Diego Adrián Fabila Bustos[1], Gilgamesh Luis Raya[2].

[1]Laboratorio de Optomecatrónica y Energías, UPIIH, Instituto Politécnico Nacional, Distrito de Educación, Salud, Ciencia, Tecnología e Innovación, San Agustín Tlaxiaca 42162, México.

[2]Universidad Politécnica de Pachuca, Pachuca, Hgo, México.

Resumen

La contaminación del aire es un problema crítico que afecta la salud humana y el bienestar en zonas urbanas. En México, se estima que la exposición a altos niveles de contaminantes atmosféricos provoca más de 36,000 muertes anuales. En este contexto, la Ciudad de México enfrenta riesgos significativos debido a los elevados niveles de ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2) y otros contaminantes, derivados principalmente del transporte, la industria y la gestión inadecuada de residuos sólidos. Este estudio busca demostrar la correlación entre datos satelitales y los obtenidos por estaciones de monitoreo ambiental terrestres, abordando la variabilidad temporal y espacial de los contaminantes, aspectos tradicionalmente difíciles de analizar. La implementación de Python y QGIS se mostró eficaz para la monitorización ambiental, facilitando la identificación de fuentes de emisión críticas y reforzando su uso como herramientas clave en estudios de calidad del aire.

Introducción

La gestión de residuos sólidos urbanos representa una fuente significativa de contaminación atmosférica en grandes urbes como la Ciudad de México. Rellenos sanitarios como el "Bordo poniente" (Figura 1) emiten gases como monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2) y otros por efecto secundario como el ozono troposférico (O_3), los cuales afectan la calidad del aire y la salud pública.

Este estudio combina datos de estaciones de monitoreo terrestre, procesados en Python, con imágenes satelitales obtenidas de la plataforma Giovanni de la NASA, para estimar la concentración y distribución espacial de dichos contaminantes. El análisis se realiza en QGIS, permitiendo visualizar las zonas de mayor emisión y su variabilidad temporal.

La investigación busca visibilizar la utilidad de herramientas tecnológicas y datos abiertos en el monitoreo ambiental. Este enfoque multidisciplinario contribuye al diseño de políticas más efectivas para una gestión sostenible de residuos y mejora de calidad del aire.

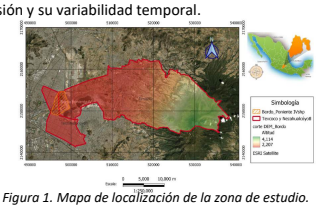


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio. Elaboración propia.

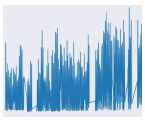
Metodología



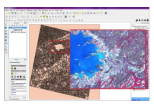
Recopilación de información y bases de datos.



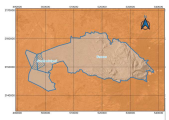
Limpieza de datos y análisis temporal con Python.



Exploración y reconocimiento de patrones.



Procesamiento de datos satelitales.



Identificación de zonas críticas.

Resultados

Se analizaron series de tiempo y mapas de concentración de O_3, NO_2, SO_2 y CO en el oriente del Valle de México durante 2024. En la **Figura 2** se presentan los límites máximos permisibles según las NOM mexicanas y la OMS, que sirvieron como referencia para evaluar las concentraciones detectadas. En la **Figura 3**, las series de tiempo muestran picos recurrentes de ozono (O_3) y monóxido de carbono (CO) en los primeros meses de 2024, con interrupciones a mitad del año. Posteriormente en la **Figura 4**, el análisis de dispersión por pares evidencia correlaciones negativas entre O_3 y los demás contaminantes y positivas entre CO, NO_2 y en menor grado, SO_2, lo que sugiere fuentes emisoras comunes.

La **Figura 5** muestra los mapas de concentración espacial elaborados en QGIS con datos satelitales. Se observan niveles elevados de CO y NO_2 en zonas cercanas al Bordo Poniente y Nezahualcóyotl, mientras que el O_3 presenta una distribución homogénea y el SO_2 se mantiene en niveles bajos. Estos resultados refuerzan la utilidad de combinar monitoreo satelital y terrestre para mejorar la vigilancia ambiental y la toma de decisiones.

Comparación normativa.

Contaminante	Unidad	Valor Máximo observado	Límite NOM (México)	Límite OMS (2021)	Excede NOM	Excede OMS
O_3	ppb	>120	70 (8h)	50 (8h)	Sí	Sí
NO_2	ppb	~100	210 (1h)	25 (24h)	No	Sí
SO_2	ppb	~60	110 (24h)	40 (24h)	No	Sí
CO	ppm	~4	11.0 (8h)	4.0 (24h)	No	Sí

Figura 2. Comparación de límites permisibles NOM y OMS (2021).

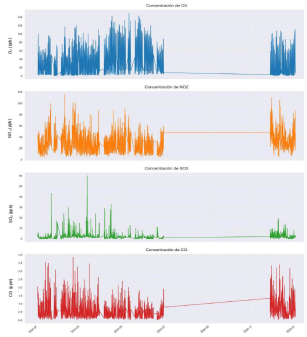


Figura 3. Series de tiempo de O_3, NO_2, SO_2 y CO.

Relaciones entre contaminantes y distribución espacial.

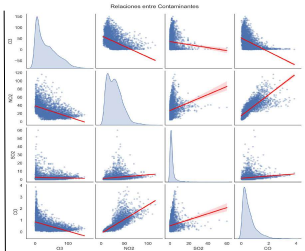
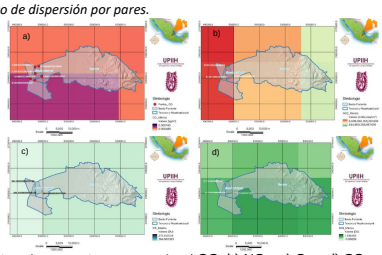


Figura 4. Gráfico de dispersión por pares.

El O_3 y NO_2 muestran distribuciones más amplias y asimétricas (correlación negativa clara).
Por su parte el CO y SO_2 tienen una distribución más concentradas y sesgadas hacia valores bajos (relación positiva debíl).



Se identificaron zonas críticas de CO y NO_2 cerca del Bordo Poniente y parte central de Nezahualcótotl.

Figura 5. Zonas críticas de contaminantes. Donde: a) CO, b) NO_2, c) O_3 y d) SO_2

Conclusiones

El análisis integrado de datos de estaciones de monitoreo ambiental e imágenes satelitales (Giovanni-NASA) permitió identificar un patrón especial y temporal de contaminación atmosférica asociado al relleno sanitario "Bordo Poniente", el relleno sanitario más grande de América Latina. Los mapas generados en QGIS revelaron que las mayores concentraciones de gases se concentran en un radio de 10~15 Km alrededor del relleno.

Este estudio sienta las bases para:

- Análisis de series de tiempo a largo plazo (tendencias estacionales).
- Integración de machine learning para predecir episodios críticos de contaminación.

Referencias

- Allen, G., Gallagher, M.W., Hollingsworth, P., Illingworth, S., Kabbabe, K, Percival, C.J., (2014). Feasibility of aerial measurements of methane emissions from landfills. SC130034/R. Bristol: Environment Agency. <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/331683/SC130034_Report.pdf>.
- Cortez, J. (2013). Estimación de emisiones de metano del Relleno Sanitario Bordo Poniente por medio de imágenes de satélite [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio institucional-Instituto Politécnico Nacional
- Tian, H., Xu, X., Liu, M., Ren, W., Zhang, C., Chen, G., & Lu, C. (2010). Spatial and temporal patterns of CH4 and N2O fluxes in terrestrial ecosystems of North America during 1979-2008: application of a global biogeochemistry model. Biogeosciences, 7, 2673-2694. https://doi.org/10.5194/bg-7-2673-2010.

MEMORIAS DEL CONGRESO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA Y CIENCIA APLICADA (4to CITCA 2025)
21-23 de Mayo 2025, Cuernavaca, Morelos

Transformación termohalina en el océano Antártico desde un enfoque de aprendizaje automático

Emmanuel Romero[1], Esther Portela[2], Laura Sánchez-Velaso[3], Leonardo Tenorio-Fernandez[3,4]

[1]Universidad Autónoma de Baja California Sur, Departamento Académico de Sistemas Computacionales, BCS, Mexico
[2]Now at Laboratoire D'Oceanographie Physique et Spatiale (LOPS), University Brest, CNRS, IRD, Ifremer, Plouzane, France
[3]Instituto Politécnico Nacional-Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Departamento de Oceanología, La Paz, Baja California Sur, Mexico
[4]CONACyT-Instituto Politécnico Nacional-Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (IPN-CICIMAR), Av. IPN s/n, La Paz, B.C.S, 23096, Mexico

Resumen

El océano Antártico (OA) influye significativamente en los océanos y el clima. Por lo tanto, analizar los cambios en la distribución termohalina de la columna de agua del OA frente al calentamiento del océano, es esencial para comprender los cambios a largo plazo en otras regiones del mundo. Utilizando un enfoque de aprendizaje automático, abordamos la distribución espaciotemporal y la transformación termohalina de la columna de agua desde la superficie hasta los 1500 m de profundidad del OA. Los resultados sugieren una transformación de las propiedades de la columna de agua a largo plazo (20 años), transformando las aguas cercanas al límite sur de la Corriente Circumpolar Antártica en aguas más frías y salinas, características de una región más al sur, cercana a la Antártida. Por su parte, las aguas cercanas al Frente Subantártico se están calentando.

1. Introducción

El OA desempeña un papel fundamental en los océanos y el clima [1].

Su muestreo espacial y temporal deficiente aumentan la incertidumbre y dificultan la interpretación física de las tendencias provocadas por el calentamiento del océano [2].

Las técnicas de aprendizaje automático, nos permiten superar parcialmente estas limitaciones de muestreo.

Objetivo

Determinar la distribución espaciotemporal de las variaciones termohalinas (TH) verticales integradas de la columna de agua del área cubierta de hielo del OA, con base en técnicas de aprendizaje automático y análisis de series de tiempo.

2. Recopilación de datos y métodos

1	Recolección de datos	Perfiles de temperatura y salinidad se interpolaron a cada metro de profundidad.
2	Clasificación	Por medio de los centroides de grupos TH [3].
3	Ajuste de hiperparámetros	Redes neuronales artificiales, profundas y clasificadores de bosque aleatorio.
4	Predicción de la variabilidad TH	Área mensual desde 2004 hasta 2023, desde 30°S hasta 90°S.
5	Análisis de series de tiempo	Prueba de tendencia Mann-Kendall y Wavelets cruzados.

3. Resultados

Se clasificaron 167,836 perfiles de la mejor calidad disponible del conjunto de datos de Argo [4]. TH-S, el grupo del sur (70% de los perfiles) es más frío y salado que TH-N, el del norte (30%).

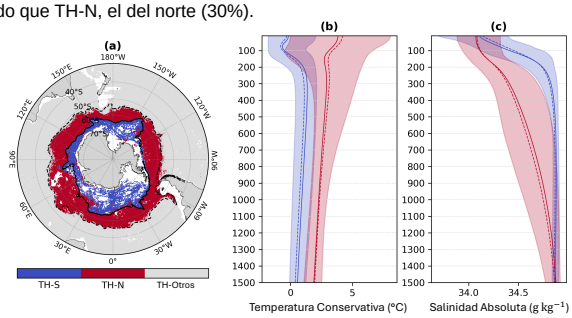


Fig 1. (a) Distribución geográfica y (b,c) variaciones verticales de (b) Temperatura y (c) Salinidad de los dos grupos TH. En el mapa se muestra el límite sur de la Corriente Circumpolar Antártica (línea solida) y el Frente Subantártico (línea discontinua).

En estudios previos [3], [5]–[7], estos grupos han mostrado coherencia con los frentes y límites del OA, lo que respalda la confiabilidad de las etiquetas utilizadas en la clasificación.

El modelo que mejor predijo la distribución geográfica de los grupos TH fue un **bosque aleatorio (BA)** con más del 97% de exactitud.

Hiperparámetros evaluados en BA	Valores evaluados (mejor)
Número de árboles	10, 50, 100, 500, 1000, 1500
Número máximo de niveles	10, 50, 100, hasta que todas las hojas sean puras
Número mínimo de muestras necesario para dividir un nodo	2, 10, 50, 100
Número mínimo de muestras requerido en cada nodo hoja	1, 10, 50, 100
Número de entidades consideradas para la división en cada nodo hoja	Raíz cuadrada, logaritmo binario, todas las características
Método de selección para entrenar cada árbol	Selección de muestras, conjunto de datos completo

Las tendencias de las series de tiempo del área mensual cubierta por TH-S y TH-N fueron significativas (nivel de confianza del 95%).

En los últimos 20 años, el área cubierta por TH-S se expandió un **5.91%**, mientras que la de TH-N se contrajo un **7.93%**.

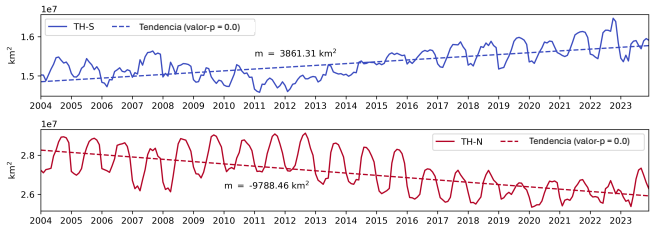


Fig 2. Series temporales mensuales (líneas continuas) y tendencias (líneas discontinuas).

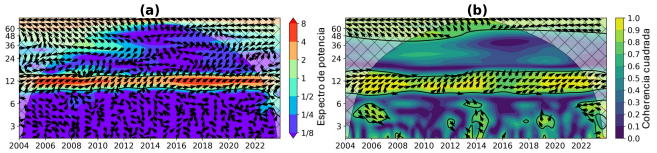


Fig 3. (a) Espectro de potencia de wavelets cruzados y (b) coherencia de wavelets cuadrada entre las series temporales de TH-S y TH-N.

En el periodo anual se observa alta energía común y coherencia. **TH-S lidera consistentemente la relación en fase entre ambas series** (con flechas apuntando hacia el primer cuadrante). El cambio en las señales ocurre primero en TH-S y luego se transfiere hacia TH-N, lo que sugiere una transformación de la columna de agua, que ocurre desde la Antártida hacia el ecuador con un retraso medio de 30.6 ± 11.8 días.

4. Conclusiones

En el océano Antártico

Gracias a la implementación de modelos de aprendizaje automático, en este caso, BA

Se detectó que en los últimos 20 años

Hubo una transformación de las propiedades TH, hacia aguas más frías y saladas desde la superficie hasta los 1500 m de profundidad

Se prevé que

La extensión de las características TH del área cubierta por hielo marino continúe aumentando a largo plazo

Estos resultados

Contribuyen a comprender cómo el OA está respondiendo al cambio climático, información clave para mejorar modelos y proyecciones oceanográficas.

Referencias

ISBN: En trámite

Sistema de Producción de Hidrógeno Verde para uso Doméstico

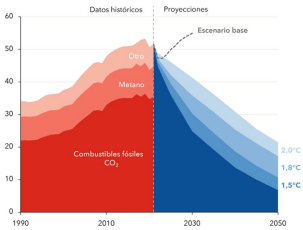
Germán Hurtado Arellano, Cornelio Morales Morales, Octavio Rodríguez Garfias, Guadalupe Ángel Rodríguez Téllez, Jaime Navarrete Damián
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Querétaro, México

Resumen

El trabajo presenta una propuesta de un sistema de producción de hidrógeno mediante electrólisis alcalina, utilizando placas de hierro como electrodos y una solución salina. El diseño se asemeja a un contenedor de gas convencional, pero incorpora un sistema de regulación dual: uno para controlar el voltaje que determina la producción de hidrógeno y otro para regular el flujo del gas hacia el quemador. Los resultados muestran una relación lineal entre el volumen de hidrógeno producido y el tiempo, manteniendo una corriente constante. El proyecto tiene como objetivo principal desarrollar un prototipo de estufa que funcione con hidrógeno de flujo controlado para entornos domésticos, proporcionando así una alternativa energética no contaminante que además podría reducir costos.

Introducción

Según datos del INEGI en México el 85% de las viviendas declaró usar una estufa para calentar o cocinar sus alimentos. El uso de gas (propano) es una de las principales causas del aumento de las temperaturas a nivel global el cual su registro es de un 30% responsable de los gases de efecto invernadero.



Metodología

La idea principal de este proyecto es proporcionar un combustible alternativo no contaminante para uso diario, basado en la producción de hidrógeno verde como sustituto del gas propano. La metodología empleada:

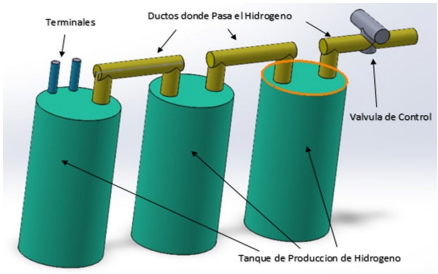
Investigación teórica → Diseño del sistema → Construcción del prototipo → Pruebas de funcionamiento → Validación de resultados

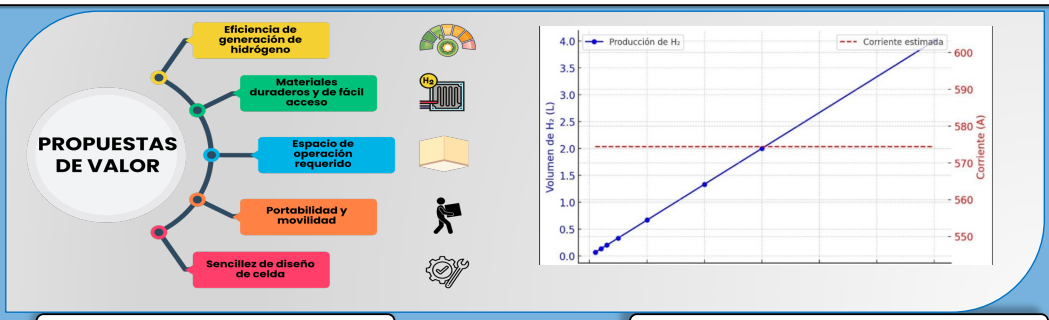
El objetivo general consiste en:
Proponer un prototipo de estufa a hidrógeno de flujo controlado para evitar el uso del gas propano en lugares domésticos que permitirá cambiar el uso de gases contaminantes.

Resultados

El diseño esta propuesto para tener una similitud a un tanque que sea muy amigable a su espacio según sea el área del lugar domestico , mediante la electrolisis el tanque genera el hidrogeno para el uso continuo y diario de la necesidades domesticas así mismo se tiene un regulador de voltaje para regular la potencia que genera y otro regulador para la salida de hidrogeno hacia el quemador y evitar el flujo excesivo de hidrogeno. este sistema evita el uso de gas propano y contaminación ambientales etc.

Utiliza un electrodo construido con una selección de placas metálicas adecuadas para el proceso. Con ello, se identificó el electrolito más adecuado para la producción de hidrógeno, así como la fuente óptima de voltaje que ayuda hacer eficiente la producción de hidrógeno verde. Como se observa en la gráfica, existe una relación lineal entre el volumen de H_2 producido (en litros) y el tiempo, manteniendo una corriente constante. El principal reto ha sido la regulación del voltaje para maximizar la producción de hidrógeno, logrando alcanzar varios litros de hidrógeno mientras se mantiene un consumo eléctrico controlado.





Conclusiones

El desarrollo del proyecto demuestra la generación de hidrógeno mediante electrólisis alcalina como alternativa viable, accesible y sostenible frente al uso de combustibles fósiles. Representando un paso importante hacia la transición energética, abriendo oportunidades de innovación y formación tecnológica a nuevas aplicaciones.

Referencias

Hassan, N. S., Jalil, A. A., Rajendran, S., Khusnun, N. F., Bahari, M. B., Johari, A., ... & Ismail, M. (2024). Recent review and evaluation of green hydrogen production via water electrolysis for a sustainable and clean energy society. International Journal of Hydrogen Energy, 52, 420-441.

Longoria, G., Lynch, M., & Curtis, J. (2021). Green hydrogen for heating and its impact on the power system. international journal of hydrogen energy, 46(53), 26725-26740.

Akdağ, O. (2023). The operation and applicability to hydrogen fuel technology of green hydrogen production by water electrolysis using offshore wind power. Journal of Cleaner Production, 425, 138863.

Abdelsalam, E., Almomani, F., Kafiah, F., Alnawafah, H., Juaidi, A., & Abdallah, R. (2024). Integrating solar chimney power plant with electrolysis station for green hydrogen production: A promising technique. International Journal of Hydrogen Energy, 52, 1550-1563.

Franco, A., & Giovannini, C. (2023). Recent and future advances in water electrolysis for green hydrogen generation: Critical Analysis and Perspectives. Sustainability, 15(24), 16917.

PROTOTIPO PARA ASCENSO Y DESCENSO DE SUPERFICIES CILÍNDRICAS

Ing. Rodrigo Adrián Gutiérrez Córdova*, Dr. Francisco Gerardo Flores García*
*Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de la Laguna

Resumen

La contaminación del aire es una problemática urgente que requiere datos precisos y localizados para su adecuado análisis. Este proyecto presenta el desarrollo de un prototipo diseñado para ascender y descender superficies cilíndricas, como postes o árboles, permitiendo llevar consigo sensores en puntos estratégicos—específicamente, una altura media de la estatura humana, distancia a la que se encuentra el aire que respiramos— y todo esto sin necesidad de infraestructura nueva. Se utilizó PETG como material de impresión 3D por su resistencia mecánica, tolerancia a la humedad y rayos UV. El prototipo ha sido modelado completamente en SolidWorks, incorporando ingeniería inversa en algunos componentes y estructuras diseñadas a medida. Este diseño representa una alternativa flexible frente a estaciones fijas de monitoreo, con potencial para facilitar nuevas investigaciones ambientales en ubicaciones variadas sin depender de una red eléctrica.

Introducción

La preservación del medio ambiente es un tema que concierne a toda la población en cualquiera de sus estratos, y el primer paso para enfrentarlo es conociendo datos duros en cada una de las presentaciones de la contaminación: del aire, agua, etc. Particularmente, la contaminación del aire podría presentar datos aislados a los lugares donde se tiene acceso y no exactamente donde se necesitan, y aunque diferentes tecnologías han sido usadas para el mismo fin, como drones, tienen dos inconvenientes principales: precios elevados por incluir la capacidad de cargar peso adicional y que al usar el aire para poder moverse podría no haber datos confiables en aire disperso.

Por esta razón, el desarrollo de un prototipo que pueda ascender y descender de superficies cilíndricas -generalmente- con la cualidad de permanecer estático sería de gran ayuda para la obtención de nuevos datos, sacando provecho de lo que ya existe y/o ha hecho el humano, como árboles, semáforos o postes de alumbrado público, siendo puntos estratégicos para generar nuevas estadísticas. Crear un mecanismo efectivo de ascenso y descenso es la base del prototipo, centrándose en una fase de sujeción a la superficie y otra de empuje en dos niveles. Al realizar dicha tarea, habrá más posibilidades de realizar mediciones que respalden con mayor vigor la necesidad de tomar medidas que ayuden a reducir la contaminación en el aire.

Metodología

Se usó el software SolidWorks para el diseño del prototipo de inicio a fin, desde la ingeniería dimensional inversa de algunos de sus componentes ya hechos hasta las estructuras principales.

El prototipo se diseñó considerando cinco aspectos principales: 1) piezas hechas mediante impresión 3D, 2) que cuente con su propia fuente de alimentación, 3) sujeción a superficie mediante pinzas, 4) mecanismo de ascenso y descenso por medio de un tornillo sin fin apoyado de su mecanismo reversible con tuerca y 5) una etapa de control aislada.

Empleando una impresora 3D modelo Bambu X1 Carbon se han hecho pruebas de ensamble y de resistencia de materiales exitosas; todas y cada una de las bases, soportes, pinzas, etc., han sido hechas a medida de las necesidades. Respecto a la batería y alimentación de actuadores (motores), se conectará una batería de plomo sellada de 12V de 6.5Ah, y habrá una alimentación para cada actuador usando reductores de voltaje en paralelo incluidos los servomotores de las pinzas y tarjetas de adquisición de datos Arduino Nano (microcontrolador). Finalmente, mediante el mecanismo reversible del tornillo sin fin impulsado por un motorreductor de CC de 12V a 80 RPM instalado, de tal forma que, su eje acoplado al tornillo sin fin quede alineado a la superficie a escalar y mediante un puente H cambiará el sentido del giro, y él su dirección.

Resultados

- La elección del material para imprimir el prototipo fue el PETG debido, principalmente, a su buena relación calidad-precio, además de contar con una buena resistencia mecánica, a la humedad, resistir mejor la radiación UV y ser moderadamente fácil de imprimir, en comparación a otros materiales.
- Mediante Análisis de Elementos Finitos (FEA) hechos con SolidWorks se evaluaron las piezas diseñadas, considerando además de las cargas mecánicas a las que serán sometidas, factores ambientales a los que se estará expuesto, como radiación UV, temperatura, etc. Por esto, se ha ido mejorando iterativamente el Factor de Seguridad (FoS) mediante la adición de nervaduras, capas de impresión adicionales, porcentajes robustos de relleno tipo giroide, etc., obteniendo un FoS > 2.5.
- Se demostró experimentalmente que el mecanismo de ascenso y descenso es viable al aplicar cargas axiales al eje del motor estando verticalmente, y puntualmente en este modelo de motorreductor, esta por debajo de sus valores de corriente nominal incluso bajo cargas de hasta 20kg (2 veces más del esperado).
- Optar finalmente por una conexión de cables a las tarjetas de adquisición de datos mediante bornes con tornillos ha garantizado una mejor estabilidad.
- El diseño del mecanismo de sujeción mediante pinzas puede ser fácilmente reemplazado por el que mejor se adapte, sin sacrificar el de subida-bajada.

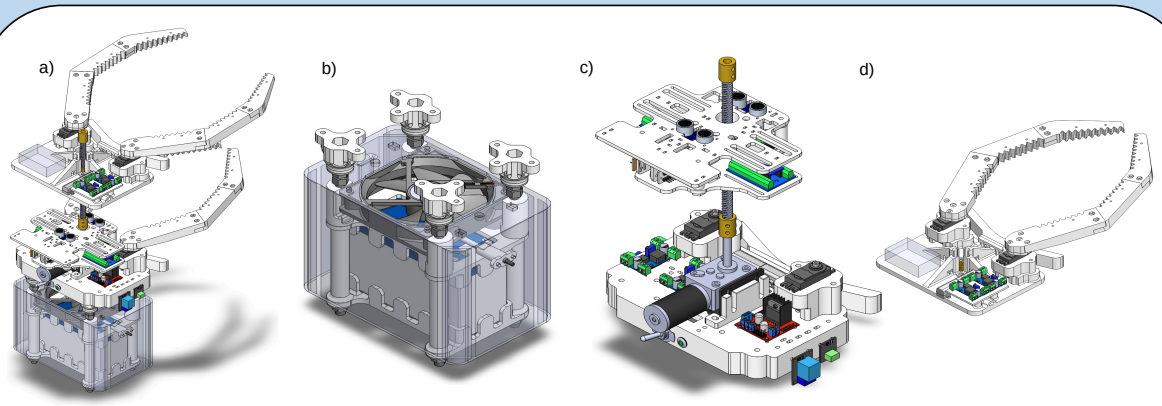


Figura 1. Vista isométrica del dispositivo: a) ensamble completo, b) contenedor disipador de calor de batería, c) nivel principal de potencia (abajo) - control (arriba) y d) nivel superior de anclaje.

Conclusiones

Es viable continuar con el desarrollo de este proyecto porque es más factible en costos y esfuerzo concluir este prototipo que pueda subir y bajar para tomar muestras, que instalar una o más estaciones de medición o el uso de drones. Los resultados de los análisis FEA confirman buenos FoS, siendo un buen indicador de un prototipo mecánicamente estable. Es importante considerar que los tiempos de funcionamiento pueden ir disminuyendo por el desgaste de la batería, así como por cuestiones climáticas, como humedad o calor, recordando que una de sus ventajas es no conectarse a una red eléctrica. Se considera un avance significativo y posible nuevo punto de partida para nuevos proyectos de investigación y tecnológicos, como su aplicación en otras áreas, por ejemplo, en un sistema de antenas provisional.

Referencias

- Ashby, M. F. (2005). Materials selection in mechanical design (3.ª ed.). Butterworth-Heinemann.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials science and engineering: An introduction (10.ª ed.). Wiley.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (2007). Engineering design: A systematic approach (3.ª ed.). Springer.
- Arduino. (s. f.). Arduino Nano. Recuperado el 16 de abril de 2025, de https://docs.arduino.cc/hardware/nano
- Bambu Lab. (s. f.). X1 Carbon 3D Printer Specifications. Recuperado el 16 de abril de 2025, de https://bambulab.com/en/x1-carbon

Análisis del Desarrollo de Celdas Solares Sensibilizadas por Colorantes en México

Oscar Uriel Mendoza Hernández, Ángel Custodio Navarrete Fernández, Cornelio Morales Morales
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, C.P. 76800, San Juan del Río, Querétaro, México
cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx

Resumen

Este trabajo analiza los desafíos en el desarrollo de celdas solares sensibilizadas por colorantes (CSSC) en México. Aborda la problemática de que el 61% de las emisiones nacionales provienen del sector energético, mientras solo el 0.25% de viviendas emplean sistemas fotovoltaicos. Se destacan las CSSC como alternativa con limitaciones (eficiencia <3% con pigmentos naturales y degradación química). El estudio se centra en retos técnicos, económicos y regulatorios, especialmente en la eficiencia de pigmentos naturales (betabel, tuna roja, jitomate y chile) y su estabilidad. Se proponen soluciones como arquitecturas multicapa con TiO_2 (dióxido de titanio), encapsulados híbridos y sustitución de materiales costosos, organizadas en una tabla comparativa. La investigación considera cuatro ejes: técnico (eficiencia), temporal (degradación 0–500 h), económico (viabilidad) y político (marco regulatorio 2010–2022). El póster incluye figuras sobre distribución de viviendas con electricidad y la relación entre solventes y eficiencia en DSSC.

Introducción

El sector energético mexicano enfrenta una paradoja crítica: contribuye con el 61% de las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero (Guzmán et al., 2012), mientras que solo el 0.25% de las viviendas utilizan sistemas fotovoltaicos (INEGI, 2018). Las celdas solares sensibilizadas por colorantes (CSSC) emergen como una alternativa prometedora; sin embargo, presentan significativas, esto, limitaciones debido a técnicas reportes de investigaciones recientes documentan eficiencias inferiores al 3% con pigmentos naturales (Hossain et al., 2017). Adicionalmente, estos dispositivos enfrentan problemas de degradación química y fototérmica.

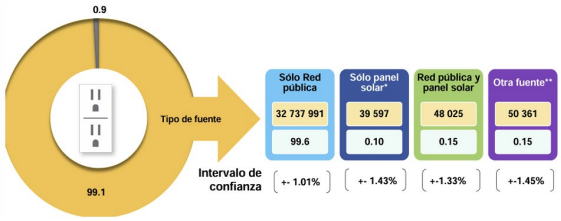


Figura 1. Distribución porcentual de viviendas particulares habitadas por condición de disponibilidad de energía eléctrica, y viviendas habitadas con energía eléctrica, INEGI (2018).

Justificación

La investigación en celdas solares sensibilizadas con colorantes (CSSC) se justifica técnicamente por su potencial para implementar tecnologías fotovoltaicas innovadoras, siendo una alternativa viable pero subutilizada (Kutlu, 2020) que, al superar limitaciones como su eficiencia y estabilidad, podría acelerar la transición energética; socialmente, adquiere relevancia en el contexto mexicano debido a la abundancia de pigmentos naturales útiles para su fabricación (Carbó-Vela et al., 2016) y a la necesidad urgente de diversificar la matriz energética nacional, lo que las posiciona como una solución alineada con los recursos y demandas del país.

Objetivos

Objetivo General

Analizar los principales desafíos técnicos, económicos y regulatorios que limitan el desarrollo y la implementación de las CSSC a gran escala en México.

Objetivos Específicos

-Analizar la eficiencia de CSSC con pigmentos naturales (betabel, tuna roja, jitomate y chile), particularmente en interfaces TiO_2/colorante.

-Evaluar a nivel de revisión bibliográfica la estabilidad química de pigmentos mexicanos bajo condiciones operativas de laboratorio.

Resultados

Las celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC) enfrentan desafíos críticos, en el uso de electrolitos líquidos, los cuales presentan problemas de estabilidad térmica, riesgos ambientales y de salud debido a compuestos orgánicos volátiles, y altos costos por materiales como rutenio y platino (Hossain et al., 2017; Reyes Lemus, 2014).

Tabla 1. Principales Desafíos del Desarrollo de CSSC

Desafío	Solución Propuesta	Base Científica
Baja eficiencia (2-3%)	Arquitecturas TiO_2 multicapa + sensibilización con antocianinas/porfirinas	Reyes Lemus (2014) Kutlu (2020)
Degradación de pigmentos	Encapsulado híbrido (UV + antioxidantes naturales)	Hossain et al. (2017) Reyes Lemus (2014)
Alto costo de materiales	Sustitución de rutenio por colorantes naturales (ej. flavonoides, carotenoides)	Reyes Lemus (2014,) Guzmán et al. (2012)
Brecha tecnológica	Centros comunitarios de fabricación + capacitación en síntesis de sensibilizadores	Carbó-Vela et al. (2016) Reyes Lemus (2014)
Electrolitos volátiles	Electrolitos sólidos basados en Bi_2WO_6 (alternativa a TiO_2)	Reyes Lemus (2014) Madriz et al. (2014)

Los colorantes naturales derivados de fuentes vegetales —como antocianinas, flavonoides y curcumina— han surgido como sensibilizadores prometedores, debido a su compatibilidad redox con semiconductores y bajo impacto ambiental (Kutlu, 2020; Reyes Lemus, 2014).

Hoy aún presentan desafíos en escalabilidad y vida útil, lo que requiere optimizar parámetros como la selección de solventes y pretratamiento de los colorantes. Un estudio clave de Hossain et al. (2017) demostró cómo estos factores influyen en el rendimiento fotovoltaico. En su Figura 2, se comparan sistemáticamente cinco solventes (etanol, metanol, acetona, agua destilada y agua caliente) y tres fuentes de cúrcuma, revelando diferencias significativas en eficiencia y estabilidad. Estos hallazgos subrayan la importancia de optimizar las condiciones de extracción y procesamiento para maximizar el potencial de los colorantes naturales.

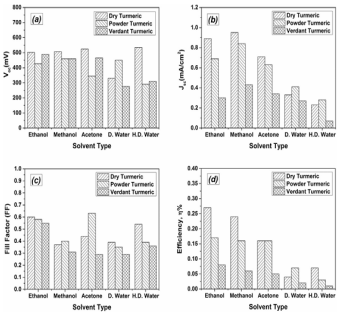


Figura 2. Relación entre solventes de extracción, fuentes de cúrcuma y eficiencia en DSSC, Fuente: Hossain et al., 2017.

Conclusiones

La investigación analiza el potencial de celdas solares con colorantes naturales mexicanos (betabel, tuna roja, jitomate y chile) mezcaldo con sensibilizadores de TiO_2, midiendo su eficiencia fotovoltaica bajo condiciones estándar (masa de aire (AM) 1.5, 25°C). Además, estudia la degradación de los pigmentos mediante pruebas aceleradas (0–500 horas) con radiación UV y estrés térmico, en condiciones ambientales para estimar su vida útil. Y analiza el marco regulatorio energético (2010–2022), identificando oportunidades para integrar esta tecnología en políticas de electrificación y transición energética, con enfoque en los objetivos de desarrollo sostenible.

Referencias

Carbó-Vela, P. C., Rocha-Rangel, E., Rodríguez-García, J. A., Martínez-Peña, E., López-Hernández, J., & Armendáriz-Mireles, E. N. (2016). Construction of dye-sensitized solar cells with natural pigments. Materials Today: Proceedings, 3(1), 194–200. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.01.056

Guzmán, S., Niño, G., Olivera, B., & de la Fuente, Á. (2012). La lucha contra el cambio climático requiere un presupuesto público orientado hacia la transición energética. Fundar, Centro de Análisis e Investigación.

Hossain, M. K., Pervez, M. F., Mia, M. N. H., Mortuza, A. A., Rahaman, M. S., Karim, M. R., Islam, J. M. M., Ahmed, F., & Khan, M. A. (2017). Effect of dye extracting solvents and sensitization time on photovoltaic performance of natural dye sensitized solar cells. Results in Physics, 7, 1516–1523. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.04.011

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI 2018).

Kutlu, N. (2020). Investigation of electrical values of low-efficiency dye-sensitized solar cells (DSSCs). Energy, 199, 117222. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117222

Evaluación de la actividad antifúngica e inhibición de la producción de esporas de especies de la familia Asteraceae

Alexei González-Arizmendi*, José Francisco Carpio-Pineda**, Macdiel Acevedo-Quiroz*

*Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, TecNM/IT de Zacatepec.

**Departamento de Ciencias Básicas, TecNM/IT de Zacatepec.

Resumen

Los hongos fitopatógenos amenazan la agricultura global, causando pérdidas económicas y resistencia a fungicidas sintéticos. Este estudio evaluó la actividad antifúngica de extractos de *Tagetes lucida*, *T. remotiflora* y *Dyssodia tagetiflora* (Asteraceae) contra *Fusarium oxysporum* y *Colletotrichum sp.* Los extractos, obtenidos por maceración con solventes de polaridad creciente (hexano, diclorometano, acetona y metanol), fueron caracterizados mediante CCF y GC-MS. El extracto metanólico de *T. lucida* mostró la mayor eficacia, inhibiendo 50–90% del crecimiento micelial y hasta el 100% de la esporulación a 16 mg/mL. Se identificaron cumarinas (herniarina y escoparona) como compuestos bioactivos clave. Los resultados respaldan el potencial de estas especies como fuente sostenible de antifúngicos naturales para el control agrícola.

Introducción

Los hongos fitopatógenos causan pérdidas agrícolas y resistencia a fungicidas, lo que demanda alternativas sostenibles. Los metabolitos secundarios vegetales ofrecen actividad antifúngica con bajo impacto ambiental. Este estudio evaluó extractos de *Tagetes lucida*, *T. remotiflora* y *Dyssodia tagetiflora*, especies de Asteraceae utilizadas en México, identificando compuestos bioactivos y comparando solventes de extracción. Los resultados respaldan su uso potencial como biofungicidas.



Tagetes Lucida

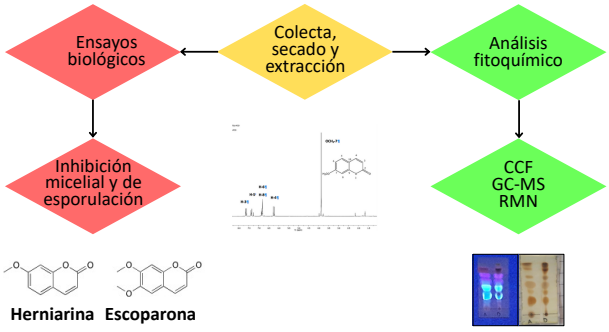


Tagetes remotiflora



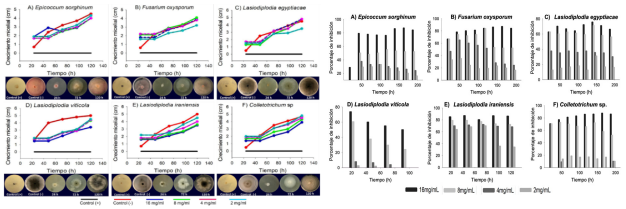
Dyssodia tagetiflora

Metodología

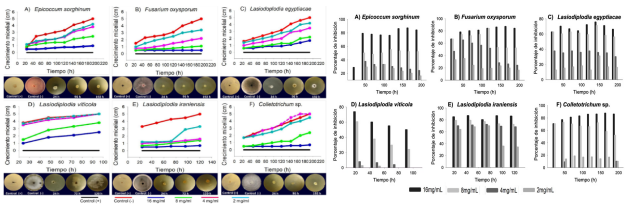


Resultados

El extracto metanólico de *T. lucida* presentó el mayor rendimiento (5.44%), seguido por el de diclorometano (1.26%) y acetona (3.45%). El perfil fitoquímico del extracto metanólico (TLM) mostró un alto contenido de flavonoides (83%) y alcaloides (33.3%). Mediante GC-MS se identificaron 23 compuestos, entre los que destacaron herniarina (70% en el extracto diclorometánico) y escoparona. En cuanto a la actividad antifúngica, TLM alcanzó una inhibición micelial del 90% en *Fusarium oxysporum* y del 86% en *Colletotrichum sp.* a una concentración de 16 mg/mL, suprimiendo además al 100% la esporulación en ambas cepas. En contraste, los extractos diclorometánico (DTM) y acetónico (DTD) presentaron efectos menores (30–50% de inhibición), con excepción del DTM frente a *Lasiodiplodia vitícola*, donde alcanzó un 96% de inhibición. El extracto metanólico de *T. remotiflora* (TRM) mostró una inhibición moderada (47.5%) en *L. vitícola*, pero promovió la esporulación en *L. egyptiacae*. Los análisis estadísticos revelaron una correlación significativa entre la concentración de los extractos y el efecto inhibitorio observado ($p < 0.05$).



Evaluación del extracto DTD, sobre la inhibición del crecimiento micelial de las cepas de HFTP



Evaluación del extracto TLM, sobre la inhibición del crecimiento micelial de las cepas de HFTP

Conclusiones

Los extractos metanólicos de *T. lucida* mostraron alta actividad antifúngica por herniarina y escoparona, inhibiendo crecimiento micelial y esporulación. El metanol fue más eficaz para extraer metabolitos, y el diclorometano selectivo para cumarinas. *D. tagetiflora* podría generar sinergias. *T. remotiflora* incrementó esporulación en *L. egyptiacae*. Las Asteraceae destacan como fuente sostenible de antifúngicos.

Referencias

1. Almazán-Morales, A. et al. (2022). Actividad antifúngica de extractos vegetales. Rev. Mex. Fitopatol., 40(1), 25–32.
2. Ríos, M. Y. et al. (1988). Métodos de evaluación antifúngica. Rev. Latinoam. Quím., 19(3), 143–150.
3. Nárdez, L. R. et al. (2006). Control biológico de enfermedades vegetales. UAChapingo.
4. INIFAP. (s.f.). Investigación para el desarrollo rural sustentable. https://www.gob.mx/inifap
5. NCBI. (s.f.). PubChem. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/

MODELO DE PLANEACIÓN Y GESTIÓN DE UNA EMPRESA AGROPECUARIA CASO: EMPRESA MIEL TIERRA GRANDE

A. Texta-Nogueda *, M. Castro-Bello*, L. Gómez-Muñoz *. A. Bárcenas-Nava*, C.V Marmolejo-Vega*, A. Arzate-Salgado*
Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Chilpancingo*

Resumen

La apicultura representa una actividad económica importante, actualmente su producción se ha visto desafiada por el progreso tecnológico, desregulación, y el cambio climático. Esta investigación tiene como objetivo, analizar los procesos de planeación y gestión de la empresa apícola Tierra grande ubicada en Hueyitlalpan, municipio de Mártir de Cuilapan, Guerrero para su aplicación a otras empresas. Mediante una metodología de siete etapas: 1. Reconocimiento de la empresa; 2. Documentación de los procesos; 3. Revisión documental de certificaciones para las empresas apícolas; 4. Análisis de los canales de distribución; 5. Revisión documental y/o entrevistas a los directivos para identificar compradores al mayoreo y menudeo; 6. Análisis FODA; y 7. Documentación del modelo de la empresa. Los resultados serán los procesos de planeación, gestión documentada y estructurados en diagramas prácticos para su operatividad, las certificaciones aplicables en este tipo de organizaciones y una matriz FODA.

Introducción

En los últimos años la producción apícola se ha visto desafiada por la interacción de la tecnología, globalización, desregulación y liberalización del mercado de productos y servicios, y el cambio climático, lo que exige adaptarse e implementar innovaciones para poder sobrevivir, crecer y desarrollarse, figura 1, (Cavlin et al, 2023). Algunos autores como Mais et al. (2025) sugieren el desarrollo de modelos de negocios ecológicos y sustentables. Esta investigación propone analizar los procesos de planeación y gestión de la empresa apícola Tierra grande ubicada en Hueyitlalpan, municipio de Mártir de Cuilapan, Guerrero. A través de visitas y estancias, revisión documental de sus certificaciones y procesos, el desarrollo de una base de datos que concentre los canales de distribución y ubicación, y una matriz FODA. El resultado de este proyecto será documentar un modelo de planeación y gestión para su aplicación a otras empresas apícolas.

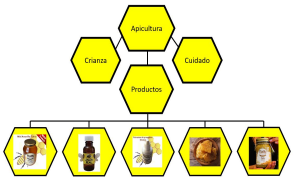


Figura 1. Proceso apícola (SADER, 2020)

Metodología



Objetivo general

- Analizar los procesos de planeación y gestión de la empresa apícola Tierra grande ubicada en Hueyitlalpan, municipio de Mártir de Cuilapan, Guerrero para su aplicación a otras empresas.

Resultados esperados

- Análisis de la matriz FODA de la empresa miel tierra grande.
- El tipo de certificaciones que debe tener una empresa apícola en sus procesos desde su planeación hasta su gestión.
- Un análisis de los canales de distribución y ventas.
- Un modelo de planeación y gestión de una empresa apícola.



Conclusiones

La propuesta de un modelo de planeación y gestión de una empresa apícola con prácticas sustentables permitirá enfrentarse a desafíos del cambio climático, podrá sobrevivir a un entorno empresarial competitivo, proponiendo soluciones innovadoras que preserven la conservación del ambiente natural, que incluyan programas de garantía de calidad de la miel, desarrollo de productos, así como la creación de productos derivados con valor añadido que se traduzcan en un buen rendimiento. Este proyecto permitirá transferir el modelo como mínimo a seis empresas apícolas de Guerrero formalmente constituidas, que integran 62 productores, llegando a un total de 6000 colmenas.

Referencias

Alleri, M., Amoroso, S., Catania, P., Lo Verde, G., Orlando, S., Ragusa, E., Sinacori, M., Vallone, M., & Vella, A. (2023). *Recent developments on precision beekeeping: A systematic literature review. In Journal of Agriculture and Food Research, 14(100726).* https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100726

Arguello, A. M., Llumiguano, M. E., Gavilánez, C. V., & Torres, L. H. (2020). *Administración de empresas. Elementos básicos.* Multimedia Larga. ISBN: 978-1-59973-562-7

Navío, M. J., Fernandez, M. V., Pérez, G. E., Rodrigo, M. B., Rodríguez, F. L., Sevilla, S. C., & Solórzano, G. M. (2022). *La empresa, sus clases y su estructura.* (Sanz y Torres), *Fundamentos de gestión empresarial (3-35).*

Téllez, G., Daniel, I., Yara, F. R., & Figueroa Ramírez, J. (2021*). Herramientas para la gestión integral en empresas apícolas colombianas* (1era edición). ISBN: 978-958-794-638-3

LA CONSTRUCCIÓN VERNÁCULA RESIDENCIAL EN EL ESTADO DE GUERRERO

C. Bello Pastor*, M. Castro Bello*, C. Morales Morales **, C. V. Marmolejo Vega*, D. Ángeles Herrera*, A. Bárcenas Nava*
* Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chilpancingo.
** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Juan del Río.

Resumen

Los materiales vernáculos son aquellos que se obtienen de manera local o regional, siendo una alternativa sustentable al generar una baja emisión de CO_2. Esta propuesta tiene como objetivo caracterizar los materiales y técnicas de construcción residencial vernácula en el estado de Guerrero, México. Con una metodología mixta de cuatro fases: 1. Distribución geográfica de los materiales vernáculos: investigación documental, análisis estadístico descriptivo y sistemas de información geográfica; 2. Análisis de materiales y técnicas de aplicación residencial: métodos descriptivos y exploratorios, y análisis correlacional multivariado; 3. Impacto ambiental de los materiales; y 4. Documentación de materiales y técnicas: recopilación y organización de la información**.** Los resultados esperados incluirán: Identificación de materiales vernáculos en cada región, un mapa representativo de los tipos de materiales distribuidos en todo el estado, un análisis de la composición, técnicas de aplicación en edificios residenciales, indicadores de impacto ambiental y documentación de fácil acceso.

Introducción

El aumento de Gases de Efecto Invernadero (GEI) se da principalmente en el sector energía con 37,407.79 millones de toneladas de CO_2 equivalente ($MtCO_2e$) representando el 75% del total de las emisiones. Los subsectores residencial y manufactura/construcción representan 3,054.94 y 6,384.05 $MtCO_2e$, respectivamente (Climate Watch, 2024). En la construcción las fuentes de contaminación van desde los procesos de producción de materiales hasta la disposición de residuos (Enshassi et al., 2014). Siendo el concreto resultado de la mezcla de cemento, arena y grava, responsable de emitir hasta 2.8 $MtCO_2$ al año (Jonathan Watts, 2019).

Ante esta situación diversos estudios han analizado las construcciones vernáculas como opción sustentable para edificar y reducir los GEI producidos en la construcción, al tener un consumo bajo de energía desde la obtención de materiales hasta su construcción (Agyekum et al., 2020). En este sentido, Morales-Cristóbal et al. (2020) establece que la construcción vernácula representa una disminución de 28 puntos en el consumo de energía respecto de las viviendas construidas con materiales industrializados.

Los materiales vernáculos utilizados varían en función de la región en que se ubican, a pesar de tener similitudes de tipología y técnicas constructivas. De esta manera, este proyecto de investigación proporcionará un registro de los materiales y técnicas de construcción vernácula en el estado de Guerrero para su posible uso en la industria de la construcción permitiendo conocer su uso y disposición con la finalidad de contribuir en la mitigación del cambio climático.

Esta investigación tiene como objetivo caracterizar los materiales vernáculos y técnicas de construcción residencial en el estado de Guerrero, México, con una metodología mixta de dos ejes centrales: 1. Aplicación de cuestionarios y tomas de fotografía para reconocer técnicas y materiales existentes; 2. Análisis estadístico descriptivo de bases de datos de INEGI y literatura; teniendo como resultados la identificación de materiales vernáculos en cada región de la entidad, un mapa representativo por tipo de material; un análisis de la composición y técnicas de aplicación en edificaciones residenciales; indicadores de impacto ambiental; y su documentación correspondiente.

Metodología

Fase 1

1. Distribución geográfica de los materiales en el estado

- Investigación documental.
- Elaboración y aplicación de un cuestionario: Análisis estadístico descriptivo.
- Distribución geográfica de materiales: Mapa con SIG´s.

Fase 2

2. Análisis de materiales y técnicas de aplicación residencial

- Análisis descriptivo y exploratorio.
- Análisis multivariante correlacional.

Fase 3

3. Impacto ambiental

- Índice de Impacto ambiental: Cálculo de indicadores.

Fase 4

4. Documentación de los materiales y técnicas

Caracterización de materiales y técnicas vernáculas

Objetivo General

Caracterizar los materiales y técnicas de construcción vernácula residencial y calcular su impacto ambiental en el estado de Guerrero.

Resultados

Figura 1
Distribución del uso de la madera en Guerrero, Mx.



En la Figura 1 se visualiza la distribución geográfica de materiales vernáculos de las regiones del estado de Guerrero. La Figura 2 muestra las técnicas de aplicación de los materiales que componen una vivienda residencial para su comparación en función del área geográfica que se localice.
Otro resultado relevante es un documento que contendrá la descripción y técnicas de aplicación vernácula en la entidad, promoviendo la identidad cultural.

Figura 2
Materiales vernáculos en el estado de Guerrero, Mx.



Conclusiones

Este estudio mostrará la caracterización de materiales y construcciones vernáculas en el estado de Guerrero mediante una metodología mixta con el fin de recabar información de estos. Como resultado se pretende tener un documento que exponga la caracterización y distribución geográfica de elementos vernáculos por región, que sirva como una base de información para proyectos futuros.

Referencias

Agyekum, K., Kissi, E. & Danku, J. C. (2020). Professionals' views of vernacular building materials and techniques for green building delivery in Ghana. Scientific African, 8. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00424

Enshassi, A., Kochendoerfer, B., & Rizq, E. (2014). An evaluation of environmental impacts of construction projects. Revista ingeniería de construcción, 29(3), 234-254.

Jonathan Watts. (2019, 25 de febrero). Concrete: the most destructive material on Earth. The Guardian. https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth#top

Morales-Cristóbal, R., Sánchez-Medrano, M. T., Arista-González, G. J. & Suárez-Domínguez, E. J. (2020). Comparison of housing construction systems in the huasteca zone: Vernacular, industrialized and hybrid. Study cases. Case Studies in Construction Materials, 13. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00359

ISBN: En trámite

CONVECCION NATURAL DE UN FLUIDO EN UN TUBO HORIZONTAL

Gerardo Ruiz Chavarría *, Mónica Borunda Pacheco**, Sergio Hernández Zapata*
* Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM
** SECIHTI. CENIDET, Tecnológico Nacional de México.

Resumen

En el siglo XIX Osborne Reynolds mostró que el flujo dentro de un tubo es laminar si el número de Reynols es inferior a 2000. La introducción de efectos térmicos o magnéticos modifica las características de este flujo. En este trabajo se resuelven numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes, de calor y de continuidad. Los resultados dependen de tres parámetros, los números de Reynolds (Re), de Prandtl (Pr) y de Grashof (Gr). En esta investigación se toman Pr=7 (agua) , 0 < Re < 2000 y 50000<Gr<500000. Se observa la formación de dos celdas convectivas cuyo tamaño depende de los números de Reynolds y de Grashof. Por otra parte cuando se supera un valor umbral del número de Grashof (~ 200,000) surgen inestabilidades. Finalmente, se discute una aplicación en las energías renovables (calentamiento de agua que fluye por un tubo).

Introducción

El calentamiento de un fluido dentro de un recipiente es un problema con aplicaciones en las energías renovables. Un ejemplo es el calentamiento de agua que fluye por un tubo usando la energía del Sol. Una manera de mejorar la transferencia de calor de un líquido que se mueve dentro de un tubo es la inserción de una lamina torcida con el fin de producir convección forzada. Una manera diferente es produciendo convección natural. La convección natural puede surgir si se tiene un flujo de calor en el hemisferio inferior del tubo. En este trabajo se van a considerar dos casos:
a) un flujo de calor con una distribución senoidal con respecto al ángulo.
b) un flujo de calor producido por un concentrador solar.

El problema depende de 3 parámetros:
1) Número de Reynolds, $Re = \frac{U\,D}{\nu}$
2) Número de Grashof, $Gr = \frac{g\alpha\Delta T D^3}{\nu^2}$
3) Número de Prandtl, $Pr = \frac{\nu}{\kappa}$

Metodología

Se resuelven numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes, de calor y de continuidad suponiendo flujo laminar. Se utiliza simulación numérica directa (DNS):

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u} = -\nabla p + \frac{Gr}{Re^2}T + \frac{1}{Re}\nabla^2\vec{u}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u}\cdot\nabla T = \frac{1}{Pe}\nabla^2 T$$

$$\nabla\cdot\vec{u} = 0$$

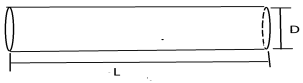
Con las condiciones iniciales siguientes:

$$T=T_0\ ,\ u_r = 0,\ u_\theta = 0,\ u_z = u_{max}\left(1-\frac{r^2}{R^2}\right)$$

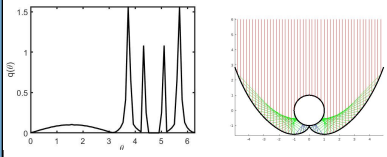
Solución de ecuaciones con método de diferencias finitas para variables r y z, método espectral de Fourier para θ. Uso de método de proyección para resolver ecuación de Navier-Stokes

Resultados

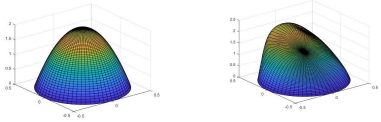
Dominio. tubo de diámetro D y longitud L



Distribución angular de flujo de calor
Casos
$a)\ \dot{q}(\theta) = -\frac{1}{2}\sin(\theta)\,, \qquad \pi < \theta < 2\pi$
b) Flujo de calor producido por concentrador solar

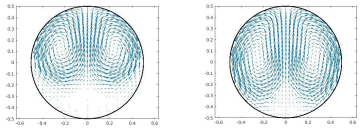


Modificación de la componente axial de velocidad por la convección natural u_z en z=0 y z=L/2



z=0 z=L/2

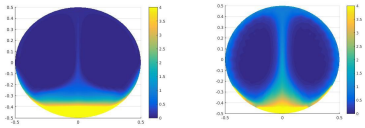
Campo de velocidades en el plano vertical. z=0.9L para t=16



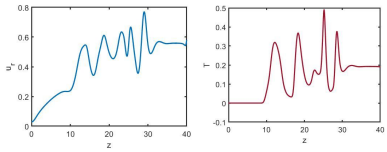
a) b)

Valores de números adimensionales:
Re=1000, Gr=500,000, Pr=7

Distribución de temperatura en el plano vertical z=0.09L para t=16



a) b)
Variación espacial de la componente vertical de velocidad y de la temperatura a lo largo del tubo (caso a). r=0.25, θ=π/2, t=24



Conclusiones

Un flujo de calor no uniforme en el hemisferio inferior del tubo da lugar a la formación de celdas convectivas lo que produce un aumento de la transferencia de calor . Esta transferencia de calor es mayor para el caso del calentamiento con el concentrador solar. El efecto observado es comparable al producido en la convección forzada producida por la inserción de una lamina torcida. Sin embargo se requiere aplicar un menor gradiente de presión.

AGRADECIMIENTOS: Trabajo realizado dentro del proyecto PAPIIT-UNAM 113621 “Transporte de partículas, convección y vorticidad”

Referencias

1) Sánchez TorresN.Y., E.J. López Sánchez, S. Hernández Zapata y G. Ruiz Chavarría (2015) 3D numerical simulation of Rayleigh-Benard convection in a cylindrical container en. Selected Topics of Computational and Experimenotal Fluid Mechanics .Springer International Publishing, Heidelberg, 2015. 367-374.
2) Hasan N., Fahad Anwer & Sanhi. S (2005)- Natural convection in a bottom heated horizontal cylinder. Phys Fluids 17. 064105

CORREO DE CONTACTO:
gruiz@unam.mx

Modelado y control de temperatura del electrolito de un electrolizador alcalino

Arlett Adame Najera, Ricardo Fabricio Escobar Jiménez, Gerardo Vicente Guerrero Ramírez, Gloria Lilia Osorio Gordillo, Manuel Adam Medina.
Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.

Introducción

El uso excesivo de combustibles fósiles ha provocado un aumento significativo en la contaminación global, lo que ha motivado la búsqueda de alternativas sostenibles y fuentes de energía limpia. En este contexto, el gas oxihidrógeno (HHO) se presenta como una opción prometedora por ser un combustible limpio y renovable, obtenido mediante la electrólisis del agua. Entre las tecnologías utilizadas para su generación, los electrolizadores alcalinos destacan por ser ampliamente desarrollados y aplicados. En estos sistemas, la temperatura es una variable clave, ya que influye directamente en la cinética de las reacciones electroquímicas, en la corriente de alimentación y en la eficiencia y pureza del gas producido [3]. Generalmente, estos electrolizadores operan en un rango de 60 °C a 80 °C utilizando soluciones de hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH) como electrolito, este intervalo de temperatura ha demostrado ser óptimo para mejorar la eficiencia del proceso de electrólisis y, en consecuencia, para la producción de HHO. Con el fin de optimizar este proceso, se han implementado modelos matemáticos y controladores como PI, PID y MPC para regular la temperatura del sistema. Este proyecto analizará el impacto de la variabilidad térmica en la producción de HHO y establecerá un modelo matemático junto con un sistema de control de temperatura, con el objetivo de optimizar la eficiencia en la generación de HHO [4,6].

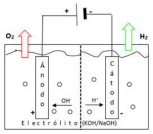


Figura 1. Electrólisis Alcalina.

Objetivo

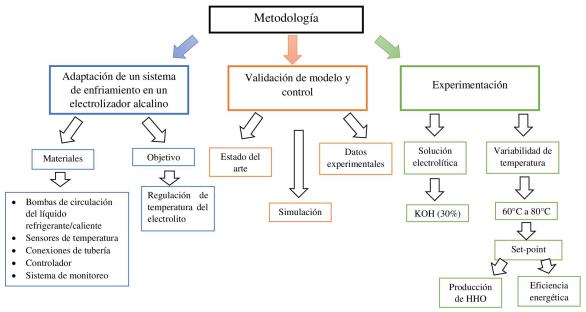
General

Analizar el impacto de la variabilidad de temperatura del electrolito en un electrolizador alcalino en la producción de oxihidrógeno.

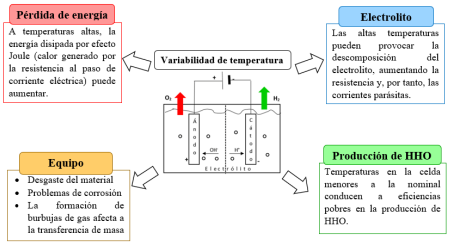
Específicos

- Establecer un modelo matemático que describa el comportamiento de la temperatura del electrolito (KOH) en un intercambiador de calor.
- Simular el modelo obtenido para la estimación de la temperatura y compararlo con datos experimentales.
- Definir una ley de control adecuada para regular la temperatura del sistema con la finalidad de operarlo de manera regulada.
- Simular la ley de control para regular la temperatura del electrolito y compararlo con datos experimentales.
- Implementar el sistema de regulación de temperatura en un electrolizador alcalino.
- Desarrollar el análisis experimental del impacto de la variación de la temperatura del electrolito.

Metodología



Problemática



Propuesta de solución

Para optimizar la producción de HHO en el electrolizador alcalino, se adaptará un sistema térmico basado en un intercambiador de calor (Figura 2), permitiendo regular la temperatura del electrolito. Este intercambiador será instrumentado e integrado al sistema electrolítico para mejorar su desempeño.

Se implementará una estrategia de control para el intercambiador de calor de placas con el objetivo de mantener el sistema en un punto de operación, asegurando condiciones favorables para maximizar la eficiencia en la generación del gas. Además, se establecerá un modelo matemático que describa el comportamiento térmico del electrolito dentro del intercambiador.

Finalmente, se realizarán pruebas experimentales para validar el desempeño del sistema y evaluar el impacto de la variabilidad térmica en la producción de oxihidrógeno. Analizar la influencia de la temperatura y encontrar un punto de operación adecuado es fundamental por tres razones principales: **1) seguridad, 2) pureza del gas y 3) eficiencia (energética y de generación del gas HHO)** en el electrolizador.

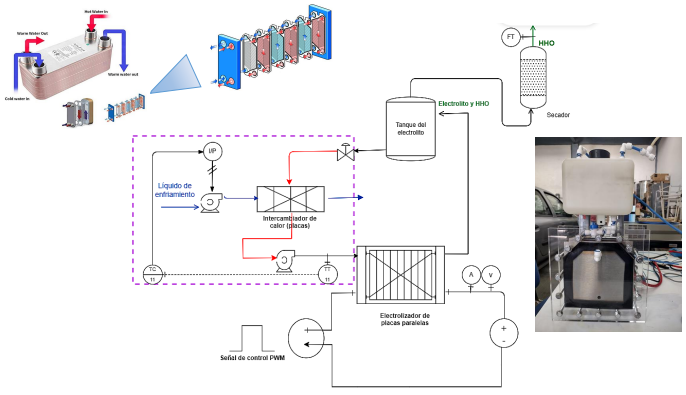


Figura 2. Sistema electrolítico con adaptación de un sistema de enfriamiento.

Referencias

[1] P. A. Goud and M. S. Baba, "Optimizing diesel engines with oxyhydrogen dual fuel: Enhancing performance with green methyl ester using MCDM techniques," *Heat Transfer*, vol. 54, no. 1, pp. 670–693, Sep. 2024, doi: 10.1002/htj.23190.

[2] P. Zhao, J. Wang, W. He, L. Sun, and Y. Li, "Alkaline zero gap bipolar water electrolyzer for hydrogen production with independent fluid path," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 352–360, May 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.05.135.

[3] G. Sakas, A. Ibáñez-Rioja, V. Ruuskanen, A. Kosonen, J. Ahola, and O. Bergmann, "Dynamic energy and mass balance model for an industrial alkaline water electrolyzer plant process," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 7, pp. 4328–4345, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.126.

[4] A. K. E. Soly, M. A. E. Kady, A. E. F. Farrag, and Gad, "Comparative experimental investigation of oxyhydrogen (HHO) production rate using dry and wet cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 24, pp. 12639–12653, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.110.

[5] E. D. R. Castrillo, J. R. B. Santaella, M. E. H. Assad, A. Khosravi, and J. J. G. Pabon, "Modeling and validation of a comercial dry electrolytic cell for the production of oxyhydrogen," *2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, vol. 22, pp. 1–6, Feb. 2020, doi: 10.1109/aset48392.2020.9118280.

[6] V. M. Sanchez, C. A. Cedano, J. Posada, R. Barbosa, and F. I. Chan, "Diseño e Implementación de un Sistema de Control para un Electrolizador Alcalino," *IEEE ANDESCON*, pp. 1–6, Aug. 2018, doi: 10.1109/andescon.2018.8564687.

ISBN: En trámite

Estudio Comparativo de Mejoras a la Eficiencia de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos con Batería de Almacenamiento

Ing. Josefina Jiménez Juárez, Dr. Carlos Aguilar Castillo, Dr. Jaime Arau Roffiel
Tecnológico Nacional de México - CENIDET - Departamento de Ingeniería Electrónica

Resumen

Los sistemas fotovoltaicos autónomos son esenciales en zonas remotas, permitiendo el almacenamiento y uso eficiente de la energía solar. Sin embargo, una gestión ineficiente en la carga y descarga de baterías genera pérdidas y reduce la vida útil del sistema. Este estudio analiza estrategias de gestión, incluyendo enlaces en corriente directa (CD) y alterna (CA), conexión en paralelo y convertidores multipuerto. Los resultados muestran que la conexión en paralelo es la opción más eficiente, minimizando pérdidas y mejorando la sostenibilidad. Esta configuración evita procesamientos innecesarios, prolonga la vida útil de las baterías y reduce la dependencia de convertidores únicos, optimizando el rendimiento del sistema fotovoltaico autónomo.

Introducción

1. Captación de energía solar.
2. Conversión CD-CD con MPPT.
3. Almacenamiento de energía en baterías.
4. Inversión de CD a CA.
5. Suministro al usuario.



Fig. 1 Fases de un sistema fotovoltaicos autónomo.

Los sistemas fotovoltaicos (PV) autónomos son una solución importante para el ahorro de energía en zonas remotas o de difícil acceso a la red eléctrica, reduciendo costos de infraestructura e impacto ambiental [1]. Estos sistemas siguen un esquema típico de conexión, representado en la Fig. 1, con cinco etapas.

Sin embargo, la gestión ineficiente en la carga y descarga de baterías genera pérdidas energéticas y acorta la vida útil del almacenamiento [2]-[3]. Para optimizar el rendimiento, se han desarrollado estrategias de gestión de energía, como el enlace PV a Batería en corriente directa (CD), enlace PV y Batería en corriente alterna (CA), la conexión en paralelo con la batería y el uso de convertidores multipuerto, orientadas a mejorar la eficiencia y confiabilidad del sistema [4]. Este estudio compara estas estrategias para identificar la opción más eficiente y sostenible en sistemas fotovoltaicos autónomos, aportando al desarrollo de soluciones energéticas confiables y duraderas.

Metodología

1. Identificación del problema.
2. Estudio y evaluación de sistemas fotovoltaicos autónomos.
3. Análisis de los requerimientos en sistemas fotovoltaicos autónomos.
4. Comparativa de estrategias de gestión de energía.
5. Análisis de la comparativa.
6. Aplicación del análisis en el diseño de un convertidor.

Resultados

Las estrategias de gestión energética en sistemas fotovoltaicos buscan optimizar la eficiencia y reducir pérdidas. La revisión bibliográfica permitió comparar sus ventajas, desventajas y características, representados en las Fig. 2-5:

Enlace PV-Batería en CD:

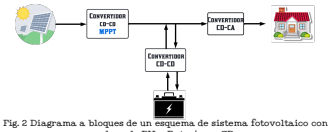


Fig. 2 Diagrama a bloques de un esquema de sistema fotovoltaico con enlace de PV y Batería en CD.

Características:
- Implementa convertidores CD-CD.
- Reducción de pérdidas energéticas.

Ventaja principal:
- Alta eficiencia y control preciso.

Desventaja principal:
- Requiere un control avanzado para evitar degradación de la batería.

Enlace PV-Batería en CA:

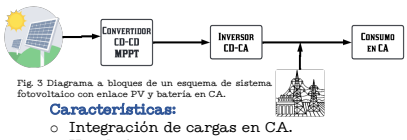


Fig. 3 Diagrama a bloques de un esquema de sistema fotovoltaico con enlace PV y batería en CA.

Características:
- Integración de cargas en CA.
- Uso de inversores.

Ventaja principal:
- Integración con la red y estabilidad del sistema.

Desventaja principal:
- Mayores pérdidas de conversión.

Conexión en paralelo con la batería

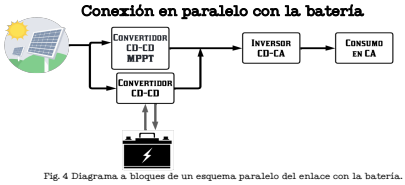


Fig. 4 Diagrama a bloques de un esquema paralelo del enlace con la batería.

Características:
- ✓ Distribución equilibrada de carga.
- ✓ Mejora de estabilidad del sistema.

Ventaja principal:
- ✓ Minimiza pérdidas de conversión y mejora la eficiencia.

Desventaja principal:
- ✓ Requiere un sistema de gestión avanzado para evitar sobrecargas.

Convertidor multipuerto

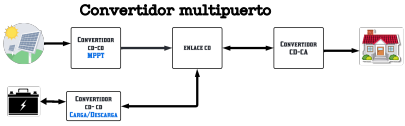


Fig. 5 Diagrama a bloques de un esquema de sistema fotovoltaico con enlace de PV y Batería con convertidor multipuerto.

Características:
- Gestión simultánea de múltiples fuentes.
- Mejora de eficiencia en microrredes.

Ventaja principal:
- Integración flexible de múltiples fuentes.

Desventaja principal:
- Mayor complejidad en el diseño y control.

El análisis de las estrategias muestra que la conexión en paralelo de la batería con el panel fotovoltaico es la opción más eficiente, reduciendo pérdidas energéticas y prolongando la vida útil de la batería al evitar procesamientos innecesarios.

Conclusiones

Los sistemas fotovoltaicos autónomos representan una solución viable para el suministro energético en zonas remotas. Las estrategias de gestión energética buscan optimizar su rendimiento y prolongar la vida útil de los componentes. El análisis de las técnicas existentes muestra que cada una impacta de manera diferente en el desempeño del sistema. La conexión multipuerto mejora la resiliencia, pero aumenta la complejidad del control. La conexión PV y batería en CD es eficiente, aunque requiere una gestión precisa. Por otro lado, la conexión en paralelo optimiza el uso de la energía solar y reduce la dependencia externa, fortaleciendo la sostenibilidad del sistema.
Los resultados destacan que el procesamiento paralelo de carga y descarga ofrece mayor eficiencia y menor estrés en los componentes al no depender de un solo convertidor.

Referencias

[1] World energy outlook 2022. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022Sunsteel. (2025, marzo 30).
[2] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes. Wiley.
[3] He, J., Yang, Y., & Vinnikov, D. (2020). Energy sorraje for 1500 V sorraje systems: A comparative reliability analysis of DC- and AC-coupling. Energies (Basel), 13.
[4] Wu, X., Tang, Z., Stroe, D. I., & Kerekes, T. (2022). sorraje and comparative saudi of energy management estrategias for residencial PV systems with battery sorraje. Batieres, 8.
[5] Wang, J., Sun, K., Xue, C., Liu, T., & Li, Y. (2022). Multi-port DC-AC converter with differential power processing DC-DC converter and flexible power control for battery ESS integrated PV systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 69, 4879-4889.
[6] Jain, S., Dhara, S., & Agarwal, V. (2021). A voltage-zone based power management scheme with seamless power transfer between PV-battery for off-grid stand-alone system. IEEE Transactions on Industry Applications, 57, 754-763.

CONDICIONES DE UN GENERADOR DIESEL PARA UN SISTEMA HÍBRIDO EN UN EDIFICIO EDUCATIVO

M.C.I.E. Daniel Alejandro Pérez Uc, Dra. Susana Estefany De León Aldaco, Dr. Jesús Aguayo Alquicira., Ing. Mardero José Toledo Wong
Area: Energía Renovable y Eficiencia Energética

INTRODUCCIÓN

El creciente interés por incorporar fuentes de energía renovable en instalaciones conectadas a la red eléctrica ha impulsado el desarrollo de sistemas híbridos que combinan generación convencional y energías limpias. En este contexto, el presente trabajo tiene como finalidad demostrar parámetros como la eficiencia y tiempo de operación en un generador diésel para un sistema híbrido de energía renovable en un edificio educativo. Se considera la tarifa de Gran Demanda en Media Tensión Horaria (GDMTH) [1,2], para evaluar el comportamiento del sistema en un entorno realista.

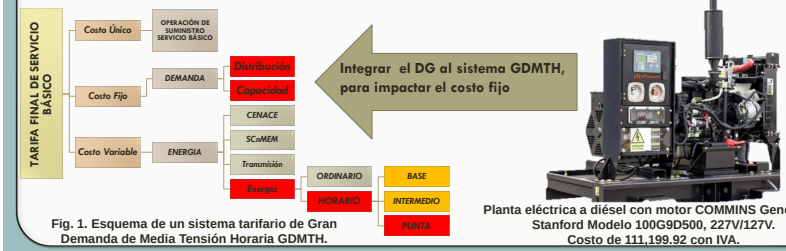


Fig. 1. Esquema de un sistema tarifario de Gran Demanda de Media Tensión Horaria GDMTH.

Planta eléctrica a diésel con motor COMMINS Generador Stanford Modelo 100G9D500, 227V/127V. Costo de 111,199.92 con IVA.

OBJETIVO

- Acondicionar parámetros del generador diésel
- Integrar los parámetros en Home Pro
- Dimensionar bajo el esquema tarifario GDMTH el Sistema Hibrido de Energía Renovable.
- Analizar su comportamiento energético.

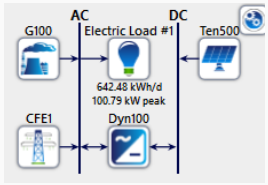


Fig. 2. Esquema para un caso de estudio de un edificio con una demanda promedio de 644.48kWh/d.

PROPUESTA SOLUCIÓN

- El caso de estudio se realiza en un edificio educativo, la topología se observa en la figura 2. Se analiza un generador diésel 100kW, funcionamiento de encendido y apagado esta controlado para cubrir el horario punta. Su consumo a plena carga es de 27.55L7hr y su factor de pendiente es de 0.221 L/hr/kW y una intersección de 5.435 L/hr.

$$F(t) = 0.2P_{DG} + 5.435$$

$F(t) = Consumo\ de\ combustible$ (L/h)

$P_{DG} = Potencia\ generada\ (kW)$

GDMTH

Demanda ≥ 100kW/Mes
Horarios
Base Intermedio Punta

Cargo por capacidad

$$min\left\{Dmax_{punta}, \left[\frac{Q_{mensual}}{24 * d * F.C}\right]\right\}$$

Cargo por distribución

$$min\left\{Dmax_{mens}, \left[\frac{Q_{mensual}}{24 * d * F.C}\right]\right\}$$

Referencia [2]

Reducción del Tarifa Punta

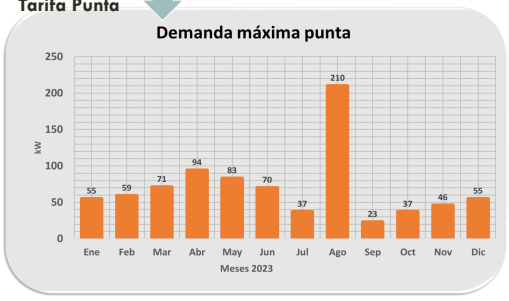


Fig. 3 Gráfica de la potencia máxima en demanda de horario punta, correspondiente a los datos de facturación del año 2023.

$$P_G = \eta_G P_{Gi}(t)$$

$\eta_G = Eficiencia\ del\ generador$

$P_{Gi} = Potencia\ nominal\ del\ generador$

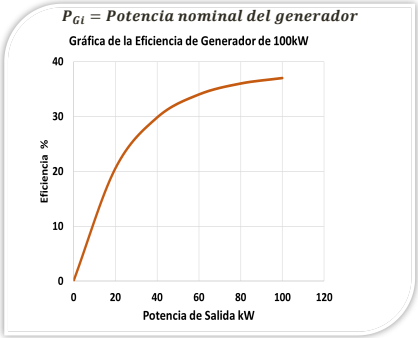


Fig.4 Gráfica de la eficiencia de la potencia del generador de 100kW, basada al consumo de combustible.

RESULTADOS ESPERADOS

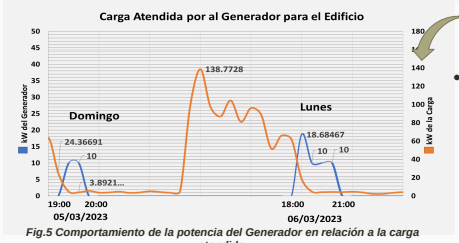


Fig.5 Comportamiento de la potencia del Generador en relación a la carga atendida

- El Generador Diésel solo atiende la demanda de la carga primaria en el horario punta correspondiente de las 18:00 a las 21:00 hrs, de lunes a sábado y de 19:00 a 20:00 los domingos.
- La premisa es reducir al mínimo la potencia máxima para reducir o anular el pago por la capacidad y el consumo en horario punta.

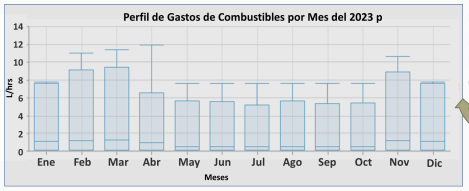


Fig.6 Perfil del consumo en L/h mensuales del año 2023

CONCLUSIÓN

El consumo de combustible total anual es de 6,732 litros. Se estima un promedio de 18.4 litros por día. Es evidente que el generador cubre la demanda en horario punta neutralizando este cargo y por otra parte la energía fotovoltaica (PV) mejora la sostenibilidad y ofrecer una solución para hacer rentable el Sistema Hibrido de Energías Renovables bajo la esta condición tarifaria [3].

BIBLIOGRAFÍA

[1] PRODESEN, "Centrales de Producción de Energía Eléctrica en México," Universidad Valenciana, Mexico2018.
[2] D. O. d. l. Federación, "Secretaría de Energía. PROGRAMA SECTORIAL DERIVADO DEL PLAN NACIONAL DE DESARROLLO 2019-2024," DOF, Mexico2020.
[3] D. A. Pérez Uc, S. E. de León Aldaco, and J. J. E. Aguayo Alquicira, "Trends in Hybrid Renewable Energy System (HRES) Applications: A Review," vol. 17, no. 11, p. 2578, 2024.

Manejo de desechos sólidos usando tecnologías renovables

Diana Gabriela Aguirre-Ortiz[1], Gabriela Hernández-Luna[2,3*], Rosenberg Javier Romero[2], Moisés Montiel González[1], Jesús Cerezo Román[2]
[1]Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, [2]Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, [3]Escuela de Técnicos Laboratoristas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad 1001. 62209. Morelos
*gabriela.hernandez@uaem.mx

Resumen

El PET (polietileno teleftalato) es uno de los materiales más versátiles gracias a sus propiedades para múltiples aplicaciones industriales y comerciales. Su amplio uso tiene impactos ambientales isignificativos, no sólo en la etapa de producción sino además durante el proceso de reciclado. La importancia de reciclar reside en contribuir en la resolución de algunos de los problemas ambientales, así como lograr un aprovechamiento más racional de los recursos no renovables. Este trabajo presenta el proceso de adaptación y experimentación de un sistema de aprovechamiento de calor solar de proceso para prolongar la vida útil del PET utilizando un concentrador solar cilindro parabólico (CSCP). Los resultados alcanzados son favorables rumbo a alcanzar temperaturas de fundición del PET con energía renovable, logrando una eficiencia térmica aceptable para el proceso.

Introducción

Los plásticos son materiales únicos con una atención destacada en la economía global (Plastics Europe, 2018). Sus características le brindan facilidad para ser usados en casi todos los ámbitos de la vida, sin embargo, aquellos de un solo uso generan desperdicio inevitable que, al paso del tiempo, su disposición final representa uno de los retos ambientales más grandes al que enfrentamos como humanidad (Babaremu *et al*., 2022).

Con la idea de proponer estrategias para prolongar la vida útil de estos materiales, en esta propuesta se plantea utilizar un sistema de concetración solar cilindro parabólico (CSCP) para la gestión de residuos de PET y su procesamiento con la idea de prolongar su vida útil. El objetivo es reducir la contaminación ambiental generada por el uso de este tipo de plásticos, minimizar el consumo de recursos fósiles además de promover la sostenibilidad en la cadena de valor del PET.

Metodología

El desarrollo de este proyecto inicia con un proceso de adaptación del sistema CSCP seguido de la etapa de experimental. El sistema empleado requirió adaptaciones ya que fue utilizado en proyectos previos (Rosas, 2016) y (Bazán, 2019).

Una vez adaptado, se realizaron tres pruebas, en cada prueba el PET se cortó en tiras de 3 m de largo y 1 cm de ancho, colocándolas en el foco de la parábola del CSCP.

Durante cada uno de los tres experimentos, se midió

- irradiacia y velocidad del viento. La irradiancia se midió utilizando un piranómetro mientras para la velocidad del viento se empleó la base de datos de la National Aeronautic Space Administration (NASA) (Data access Viewer (DAV), 2025)
- temperatura del PET. Ésta se midió usando una cámara termográfica, marca FLIR E8. Por sus características, el área de medición fue seccionada en tres partes, la imagen del sistema se presenta en la Figura No. 1.

Resultados



Figura 1. Colector solar cilindro parabólico en experimentación seccionado.

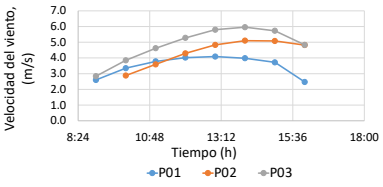


Figura No. 4. Velocidad del viento en pruebas



Figura 6. Tiras de PET al final del experimento



Figura 2. Tiras de PET al inicio del experimento

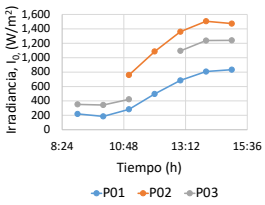


Figura No. 3. Irradiancia, I_o, en pruebas

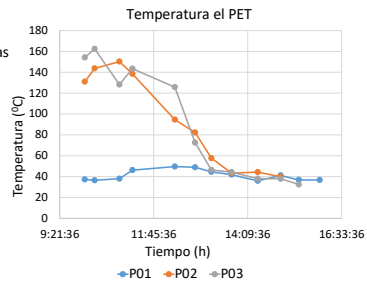


Figura No. 5. Temperatura del PET

El objetivo de adaptación del sistema se cumplió exitosamente evidenciado en la realización de experimentos.

- Las mediciones de irradiancia, presentadas en la Fig. 3, junto con las velocidades del viento, presentadas en la Fig. 4, presentan las condiciones ambientales de los días de prueba para el proceso de fundición de PET.
- En la prueba 01, se observa una máxima temperatura de 47°C, bajo esta condición el PET permanece sin cambio notable a simple vista.
- En las pruebas P2 y P03 se alcanzaron temperatura máxima de 162.5°C observando cambios en el PET apreciable en Fig. 06.

Se observa que las temperaturas más altas son directamente relacionadas con las irradiancias de mayor magnitud a pesar de observar también velocidades del viento mayores.

Conclusiones

Las adaptaciones realizadas al sistema fueron exitosas pues se logró emplearlo satisfactoriamente como alternativa potencialmente viable en el proceso de reciclado del PET. La disposición del sistema para lograr que la radiación incida perpendicularmente en el foco se determinó favorablemente garantizando así óptima intercepción de la radiación reflejada por el concentrador.

La radiación solar máxima registrada ≈ 1,240 (± 300) W/m², permitiendo alcanzar una temperatura en el foco del sistema, transferida al PET, de ≈ 170 °C. Esta temperatura logra alcanzar el intervalo de temperatura vítrea del PET dejando evidente la posibilidad de observar cambios físicos en la materia prima experimentada. Algunas razones de este límte de temperatura alcanzado, es debido a las condiciones de los materiales del sistema, a las pérdidas convectivas originadas por la velocidad del viento al sistema, impidiendo que el sistema conserve el calor obtenido, sin embargo, a pesar de las condiciones experimentales, se lograron obtener resultados favorables que se pueden observar físicamente en el cambio de la estructura del material utilizado.

Los resultados alcanzados son convenientes rumbo a alcanzar temperaturas de fundición del PET utilizando energía renovable. Además, bajo estas condiciones se logra una eficiencia térmica aceptable para el proceso.

Referencias

- Babaremu, K., Okoya, S. A., Hughes, E., Tijani, B., Teidi, D., Akpan, A., Igwe, J., Karera, S., Oyinlola, M., & Akinlabi, E. T. (2022). Sustainable plastic waste management in a circular economy. *Heliyon*, *8*(7), e09984. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09984
- Bazán Barojas I. (2019). *Análisis energético de dos configuraciones con y sin seguimiento para prototipos de colectores cilindro-parabólicos.* Tesis de Maestría en Sustentabilidad Energética. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER). Data Access Viewer (DAV).* (Enero 2024). Recuperado en enero 15 de 2024. https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/
- Plastic Europe. 2018. Plastics – the Facts. An analysis of European plastics production, demand and waste data. (2018). Recuperado en enero de 2024. https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2018-Plastics-the-facts.pdf
- Rosas Méndez, P. A. (2016). *Diseño mecánico, construcción y caracterización térmica de un prototipo termosolar para la generación de calor de proceso.* Tesis de licenciatura Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

POLÍTICAS PÚBLICAS PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS COMERCIALES EN MÉXICO

J. Z. Nava -Salazar*, M. Castro-Bello*, C. Morales-Morales**, L. Gómez-Muñoz*, C. V. Marmolejo-Vega*, D.E. Gutiérrez-Valencia*

- Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chilpancingo*.
- Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Juan del Río**

Resumen

La acumulación de gases de efecto invernadero provocan el aumento de la temperatura a nivel global, donde la industria de la construcción es responsable de más del 34% de la demanda energética y alrededor del 37% de las emisiones de CO_2, debido a la demanda de energía para la calefacción, refrigeración, iluminación y equipamiento en los edificios. Esta investigación propone analizar las políticas públicas de Eficiencia Energética (EE) en edificios comerciales implementadas en México. Con una metodología de cinco fases: 1. Revisión del marco normativo mexicano vigente de EE: Método PRISMA; 2. Investigación de políticas públicas de EE: Revisión documental; 3. Verificación de la regulación de políticas públicas gubernamentales: Análisis estadístico cualitativo y cuantitativo; 4. Análisis de indicadores de EE: Revisión e identificación; 5. Determinación del impacto ambiental y socio-económico: Estimación de indicadores. Los resultados esperados derivarán en un análisis del marco normativo vigente de eficiencia energética, políticas públicas, regulaciones de las políticas públicas gubernamentales, tipos de indicadores de eficiencia energética, su impacto ambiental y socio-económico.

Introducción

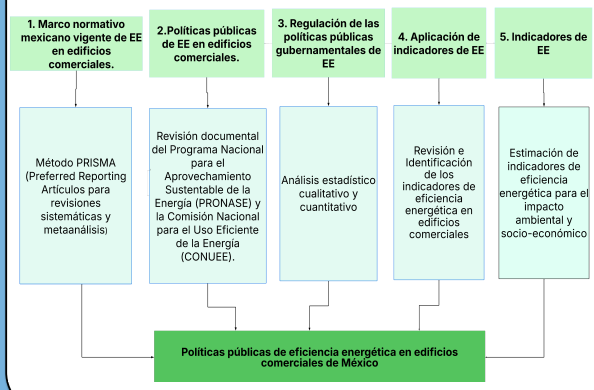
La acumulación de gases de efecto invernadero provocan el aumento de la temperatura a nivel global, donde la industria de la construcción es responsable de más del 34% de la demanda energética y alrededor del 37% de las emisiones de CO_2 (Naciones Unidas, 2024).

Actualmente en América Latina la crisis energética es causada por la dependencia en los servicios energéticos y la importación de combustibles fósiles, lo que representa una perdida significativa en el aprovechamiento de energía. Es por ello, que gobiernos de diferentes partes del mundo para maximizar la eficiencia en los servicios y minimizar la huella de carbono han establecido políticas públicas (Castro-Bello et al., 2024).

Para garantizar la eficiencia energética en edificios comerciales en México es necesario actualizar el marco normativo endureciendo los límites de la Densidad de Potencia en Iluminación (NOM-008-ENER-2001, DOF 2001) y coeficiente de transferencia de calor (U) (NOM-018-ENER-2011, DOF 2011) para equipararlos con estándares internacionales, establecer metas claras como <120 kWh/m²/año CONUEE (2021) para reducir el desperdicio energético e implementar mecanismos de verificación, utilizando como referencia los criterios de certificaciones EDGE (Banco Mundial, 2023) y LEED v4.1 (USGBC, 2023) para evaluar el cumplimiento.

Con la evidencia obtenida y tomando en consideración la normatividad y políticas vigentes que garanticen la calidad de las normas a cumplir, es importante analizar las regulaciones de las normas para la EE en edificios comerciales, para conocer el estatus actual de la eficiencia energética en edificios comerciales.

Metodología



Objetivo General

- Analizar las políticas públicas de eficiencia energética en edificios comerciales implementadas en México.

Resultados Esperados

- Análisis de un marco normativo vigente de eficiencia energética.
- Análisis de las políticas públicas de eficiencia energética en edificios comerciales de México.
- Análisis de las regulaciones de las políticas públicas gubernamentales de eficiencia energética.
- Tipos de indicadores de eficiencia energética.
- Indicadores de impacto ambiental y socio-económico.

Conclusiones

Garantizar la EE en edificios comerciales en México requiere actualizar el marco normativo, endurecer los límites de Densidad de Potencia en Iluminación (NOM-008-ENER-2001, DOF 2001) y el coeficiente de transferencia de calor (U) (NOM-018-ENER-2011, DOF 2011) para equipararlos con estándares internacionales y así reducir el desperdicio energético. Así mismo es necesario implementar mecanismos de verificación, utilizando como referencia los criterios de certificaciones EDGE (Banco Mundial, 2023) y LEED v4.1 (USGBC, 2023). Por lo que es necesario una regulación mas estricta para el cumplimiento de las normas y lograr edificios comerciales sostenibles en México, con ello reducir el impacto ambiental.

Referencias

Castro-Bello, M., Gómez-Muñoz, L., Marmolejo-Vega, C. V., Morales-Morales, C., Valencia-Díaz, E. F., Maldonado-Catalán, J. F., & Marmolejo-Duarte, C. (2024). *Public Policies for the Energy Efficiency of Buildings in Mexico. Buildings, 14(11).* https://doi.org/10.3390/buildings14113437

Diario Oficial de la Federación (DOF). (2001, 29 de noviembre). *NORMA Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en sistemas de alumbrado en edificios no residenciales*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=761405&fecha=29/11/2001

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2021). *Guías de eficiencia energética para edificaciones*. https://www.gob.mx/conuee

U.S. Green Building Council. (2023). *LEED v4.1 Building Design and Construction*. https://www.usgbc.org/leed/v41

International Finance Corporation. (2023). *EDGE Buildings: Excellence in Design for Greater Efficiencies*. https://edgebuildings.com/country/mexico/

Naciones Unidas. (2024). *Naciones Unidas: Acción por el clima*. https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change

Dispositivo supresor del modo “standby”

David Flores Hernández*, Luis Alberto Rubio Saavedra**, Cynthia Arroyo Reyes**
* Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No. 76, DGETI Morelos
** Centro de Estudios Tecnológicos, industrial y de servicios No. 12, DGETI Morelos

Resumen

En este trabajo se desarrolla un dispositivo electrónico capaz de interrumpir de forma automática el flujo de corriente eléctrica de cualquier aparato electrónico que se encuentre en modo standby por medio de una bobina de Rogowski, la cual genera una diferencia de potencial en función del campo magnético generado por la corriente de carga del aparato, y activa un elemento que abre el circuito después de un tiempo definido por el usuario, una vez que el modo de espera ha comenzado. El uso de este dispositivo generaría un ahorro a largo plazo en el pago del consumo eléctrico doméstico, así como un aumento en la seguridad de los inmuebles evitando cargas innecesarias en la red eléctrica. Si se usa de forma masiva, se dejaría de emitir una cantidad considerable de gases de efecto invernadero, debidos a la quema de combustibles fósiles durante la generación de energía eléctrica.

Introducción

Los electrodomésticos que se apagan, pero permanecen conectados, continúan consumiendo una corriente mínima necesaria para poder responder una orden. Esto se conoce como modo en espera o “standby” y representa un consumo constante denominado “consumo fantasma”. Por otro lado, el mantener conectados los aparatos genera riesgo de sobrecalentamiento o fallos eléctricos, especialmente si los aparatos tienen defectos o están envejecidos. Aunado a lo anterior, el modo en espera contribuye a un mayor uso de recursos energéticos, considerando los aparatos conectados al mismo tiempo a nivel global.

En México, el informe emitido por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía en 2018 (CEPAL, 2018), así como las recomendaciones de ahorro energético generadas durante la pandemia de COVID-19 por la CFE (CFE, 2023), destacan la tendencia al alza del consumo energético impulsada por la creciente dependencia tecnológica. Según el estudio de 2023, el consumo standby es del 11% (Fig. 1), en comparación con el resultado del estudio de 2018 que es del 5.6%.

En este trabajo se propone un circuito electrónico que se puede adaptar a los contactos tomacorriente convencionales y que permite interrumpir de forma automática el suministro de corriente eléctrica en aparatos que entran en modo standby.

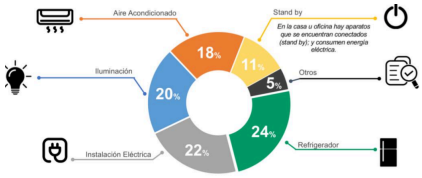


Fig. 1. Consumo energético en el sector doméstico en 2023. Extraído de (CFE.mx,2023)

Metodología

La metodología empleada se resume en las tres etapas mostradas en la Fig. 2:

Diseño: se estudiaron los elementos que permitieron el diseño del circuito, principalmente el funcionamiento de la bobina de Rogowski. **Desarrollo:** en esta etapa se armó el circuito de control, y se determinó la configuración del sensor de detección de flujo de corriente (bobina de Rogowski). Dicha corriente disminuye cuando los aparatos entran en modo de espera; la bobina detecta este cambio y emite una señal eléctrica que energiza otra parte del circuito que activa un conmutador (relevador de estado sólido), lo que resulta en la interrupción total de la corriente que alimenta al aparato, y que puede reestablecerse por medio de un botón físico. **Pruebas:** en esta etapa se ajustó el circuito y se detectaron anomalías no consideradas en la etapa 1 y 2. Finalmente el circuito se adapta a un contacto tomacorriente (Fig. 3).

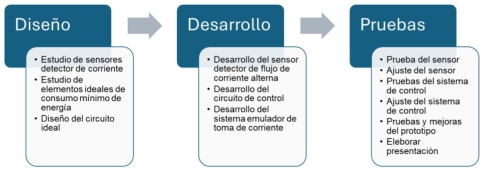


Fig. 2. Diagrama que muestra la metodología aplicada en el diseño y desarrollo del circuito supresor del modo standby.



Fig. 3. Dispositivo supresor del modo “standby” adaptado a un contacto tomacorriente. El botón rojo reinicia el controlador y la perilla gris controla el tiempo de espera antes de que se interrumpa la corriente por completo, una vez comenzado el modo de espera de un electrodoméstico.

Resultados

La Tabla 1 muestra los resultados de las pruebas en campo del consumo energético de dos electrodomésticos comunes en un hogar mexicano en modo de espera y en Kilowatts-hora para un mes de 30 días. Se analizaron una pantalla de 42 pulgadas y un microondas, ambos de la marga LG y con una energización de 127 Vca, los cuales tienen un consumo de 0.576 KWh y 1.656 KWh, respectivamente. Si estas cantidades se suman y se multiplican por doce meses, y posteriormente por el costo por KWh de la CFE ($1.071 MXN), resulta en un total anual de **$26.68 MXN**. Esta cantidad se ahorraría con el dispositivo propuesto funcionando, con solo dos aparatos.

Tabla 1. Consumo energético en modo standby de dos electrodomésticos. Se supuso que el televisor está en promedio encendido 8 horas diarias y el horno una.

	Aparato	Potencia (W)	KWh consumido standby en las horas en modo espera,(P/1000) x 30 días
1	Smart TV 42"	55 W	((1.2 W x 16 Horas) / 1000) KWh=0.0192 W (KWh x 30 días) (0.0192 W x 30 días) **Total, mes = 0.576 KWh**
2	Microondas	750 W	((2.4 W x 23 Horas) / 1000) KWh=0.0552 W (KWh x 30 días) (0.0552 W x 30 días) **Total, mes = 1.656 KWh**

Con base en las pruebas de campo se determinó el ajuste ideal de detección de carga mínima y máxima de varios electrodomésticos y dispositivos electrónicos con los que el sensor de corriente trabajaría (bobina de Rogowski), como una lavadora, una Smart TV, un microondas, un cargador de celular, entre otros. El circuito armado (Fig. 3 A) se probó y fue capaz de activar la desconexión automática de un cargador de celular tras detectar una corriente inferior a 50 mA. Se determinó el flujo de funcionamiento del circuito supresor de corriente (Fig. 3 B):

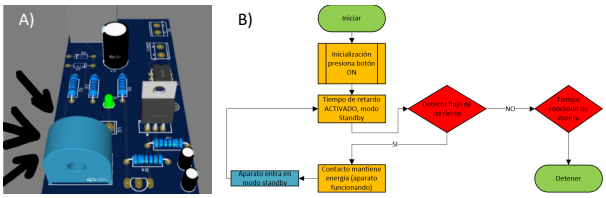


Fig. 3. A) Circuito detector y supresor de corriente standby. El sensor (bobina de Rogowski) es el cilindro azul señalado con flechas. B) Secuencia sugerida de funcionamiento del dispositivo final.

Conclusiones

- Se logro construir un dispositivo supresor del consumo standby, capaz de detectar automáticamente el estado de reposo en dispositivos eléctricos y desconectarlos de la red para evitar el consumo innecesario de energía.
- Las pruebas realizadas evidenciaron una reducción significativa del consumo standby, lo que se traduce en ahorros económicos para el usuario final.
- La bobina de Rogowski funciona de forma eficiente como sensor de la disminución de la corriente de carga debida al modo standby de cualquier aparato electrodoméstico.
- El dispositivo es asequible (unos $70.00 MXN), ya que el costo de los elementos electrónicos como la bobina de Rogowski y el relevador de estado sólido es relativamente bajo.
- El prototipo demostró ser una solución técnica viable y funcional a un problema real: el consumo fantasma por modo standby y sus consecuencias económicas y ecológicas.

Referencias

Comisión Federal de Electricidad (2023). Informe recomendaciones para el ahorro de energía en los hogares durante la emergencia sanitaria COVID-19. https://www.cfe.mx/documents/recomendaciones-CFE-COVID-19.pdf.

CEPAL,N. (2018). Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México,2018. https://hdl.handle.net/11362/43612.

Agualsaca, D., Ayala, P., & Yépez, W. (2012). Diseño e implementación de un supresor de energía en standby para equipos electrónicos de potencia media. MASKAY, 2(1), 33-38. https://doi.org/10.24133/maskay.v2i1.145

POLÍTICAS PÚBLICAS PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS ESCOLARES: CASO TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

J.A Ocampo-Pineda, M. Castro-Bello, L. Gómez-Muñoz, C.V. Marmolejo-Vega, A. Bárcenas-Nava, D.E. Gutiérrez-Valencia
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chilpancingo.

Resumen

El sector de la construcción es responsable del 37% de las emisiones de CO2 y sigue siendo el que más energía demanda con aproximadamente el 55% del consumo total mundial de electricidad. Esta investigación tiene como objetivo analizar las políticas públicas de Eficiencia Energética (EE) en edificios escolares del Tecnológico Nacional de México. Con una metodología de cuatro fases: 1. Revisión y documentación del marco normativo vigente de EE en edificios escolares con el método PRISMA y un análisis cualitativo; 2. Revisión documental de indicadores de EE; 3. Impacto ambiental y socio-económico de las políticas públicas en edificios escolares con indicadores de EE; y 4. Análisis de resultados mediante una matriz correlacional y estadística descriptiva. Los productos esperados de esta investigación serán un compendio de políticas públicas, el marco normativo actual e indicadores de impacto ambiental y socio-económicos que evalúen la de EE aplicadas a edificios escolares. La incorporación de esquemas de evaluación basados en certificaciones reconocidas facilitará la verificación y el cumplimiento estándares de EE.

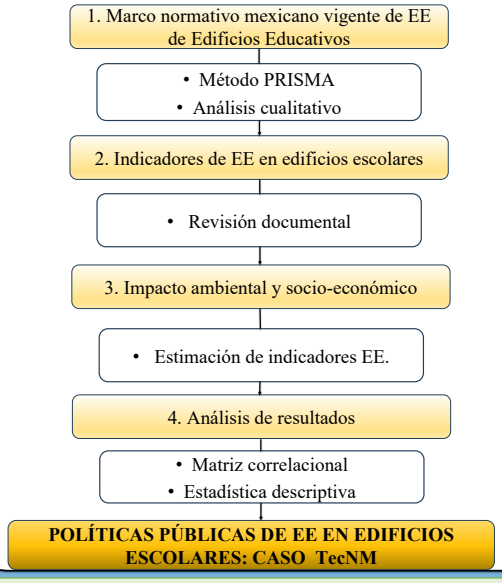
Introducción

En los últimos 200 años las actividades humanas han sido la principal causa de la emisión de gases efecto invernadero, provocando un aumento en la temperatura del planeta de 1.1°C en los últimos 2000 años. El sector de la construcción es el responsable de más del 37% de las emisiones de CO_2 y sigue siendo el que más energía demanda con aproximadamente el 55% del consumo total mundial de electricidad, alcanzando niveles sin precedentes de acuerdo con el resumen ejecutivo del informe sobre el estado mundial de los edificios y la construcción 2020 publicado por el programa de las naciones unidas para el medio ambiente (ONU, 2023). Ante esta situación, organismos internacionales y gobiernos de diferentes países han mostrado interés para revertir el impacto negativo del cambio climático.

En el caso de México, resulta imperativo fortalecer el marco normativo en materia de EE para edificaciones. Esto implica actualizar los estándares de la densidad de potencia en iluminación, coeficiente de transferencia de calor y aplicación de los niveles de EE para homologarlos con las mejores prácticas internacionales. Además, es necesario establecer metas cuantificables, como un consumo energético inferior a 120 kWh/m²/año (CONUEE, 2021); incorporar esquemas de evaluación basados en certificaciones reconocidas, como EDGE (Green Business Certification Inc., 2025); y LEED v4.1 (USGBC, 2023); que permitan verificar el cumplimiento de estos parámetros.

Tomando como punto de referencia el sector educativo, se hace indispensable la regulación aplicable a la EE en edificios escolares, con el propósito de identificar su grado de estudio, su impacto real en la reducción del consumo y áreas de oportunidad para una reconversión sustentable. Así, este proyecto tiene como objetivo analizar las políticas públicas de eficiencia energética en edificios escolares, particularizando en el Tecnológico Nacional de México.

Metodología



Objetivo general

Analizar las políticas públicas de eficiencia energética en edificios escolares: caso Tecnológico Nacional de México.

Resultados esperados

- Análisis de las políticas públicas de EE en edificios escolares de México.
- Análisis del marco regulatorio actual sobre EE en edificios educativos.
- Análisis de las regulaciones de las políticas públicas gubernamentales de eficiencia energética.
- Tipos de indicadores de eficiencia energética en edificios escolares.
- Indicadores de impacto ambiental y socio-económico.
- Propuesta de implementación de las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) en la infraestructura del TecNM.

Conclusiones

En el escenario actual de la crisis climática, recursos limitados y una urgente necesidad de sostenibilidad, mejorar la eficiencia energética en las instituciones educativas se ha convertido en un objetivo transcendental. En el sector público, los centros educativos representan un porcentaje alto del consumo energético en México, por lo que optimizar su desempeño no solo contribuye a disminuir las emisiones de CO_2 y gastos operativos, sino que también fomenta una conciencia ecológica en los estudiantes y la comunidad académica (Secretaría de Energía [SENER], 2019).

Con la información recopilada, es pertinente una regulación aplicable a la EE en edificios escolares, con el propósito de identificar su grado de estudio, su impacto real en la reducción del consumo y áreas de oportunidad para una reconversión sustentable. Lo anterior permitirá identificar el estado actual del TecNM referente a estudios sobre políticas públicas de EE aplicadas en sus edificios.

Referencias

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2021). Guías de eficiencia energética para edificaciones. https://www.gob.mx/conuee

Green Business Certification Inc. (2025). EDGE: Certificación de construcción sostenible. https://edge.gbci.org/home?language=es

Naciones Unidas. (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023 [Versión en español, archivo PDF]. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/

Secretaría de Energía (SENER). (2019). Prospectiva del sector eléctrico 2019–2033. Gobierno de México. https://www.gob.mx/sener/documentos/prospectiva-del-sector-electrico-2019-2033

U.S. Green Building Council. (2023). LEED v4.1 Building Design and Construction. https://www.usgbc.org/leed/v41

Motor reciprocante magnético bicilíndrico: Alternativa sustentable

Arturo Daniel Espinosa Pedroza*, Manuel Adam Medina*, Jarniel García Morales*, Marisol Cervantes Bobadilla*
* Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

Resumen

Este proyecto propone un **motor reciprocante magnético** (**MRM**) **bicilíndrico** como alternativa sustentable, aprovechando **ambos polos de un electroimán** para accionar dos pistones sincronizados mediante fuerzas alternas de **repulsión y atracción**. A diferencia de los motores eléctricos convencionales (que usan un solo polo), este diseño pretende incrementar la eficiencia energética y el par motor, manteniendo la **infraestructura de motores de combustión interna (MCI)**, facilitando su adaptación en vehículos eléctricos. Su aplicación prioritaria es la **electromovilidad**, donde se combina ambas tecnologías: los motores tradicionales y los sistemas magnéticos. Esta innovación representa un **puente tecnológico** hacia la transición energética, reduciendo costos de manufactura y acelerando la adopción de transporte sostenible.

Introducción

La dependencia global de los **combustibles fósiles** ha llevado a graves problemas ambientales, impulsando iniciativas para adoptar tecnologías limpias. No obstante, uno de los principales obstáculos para su implementación masiva sigue siendo el **factor económico**.

Los **MRM** se presentan como una **tecnología eléctrica alternativa**, que al igual que los vehículos eléctricos, utiliza energía eléctrica para generar movimiento mediante atracción y repulsión magnética, pero con la ventaja de poder reutilizar componentes de los motores tradicionales, lo que reduce costos.

Los avances en los **MRM** abarcan mejoras en **modelado** y **control**. Entre los desarrollos recientes destacan el **controlador neuronal** de Ríos et al. (2024). La Tabla 1 compara los trabajos relevantes, analizando sus parámetros clave como torque, eficiencia y velocidad.

Tabla 1. Características y parámetros clave de los MRM, reportados en la literatura.

Autor, Año	Configuración	Modelado	Torque	Eficiencia	Velocidad
(Joyson et al., 2018)	Monocilíndrico	No	0.3685 Nm	21.44 %	200 RPM
(Tiwari et al., 2019)	4 cilindros tipo boxer	No	0.294 Nm	No reportado	612 RPM
(Morgado et al., 2022)	v8	No	No reportado	24.1 %	750 RPM
(Rios et al., 2024)	Monocilíndrico	Si	0.025 Nm	3.5 %	400 RPM

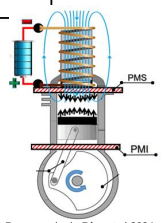
Resultados experimentales Resultados teóricos

Esta investigación propone un diseño que utiliza un solo electroimán para accionar dos pistones en fase opuesta, abordando los **desafíos existentes** en los MRM: **Aumento de torque y eficiencia**.

Problemática

Los **resultados experimentales** en prototipos de **MRM** revelan las siguientes **limitaciones**:

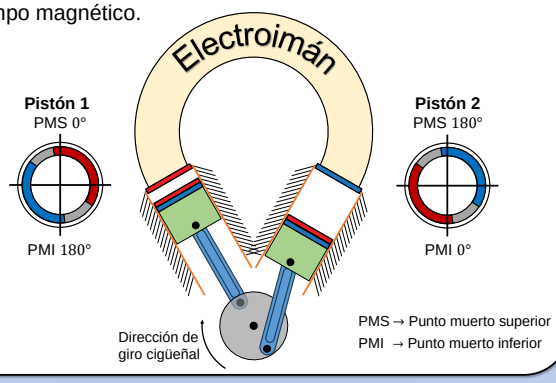
- Rendimiento energético bajo.
- Par bajo.
- Desaprovechamiento de un polo, debido al tipo de configuración.



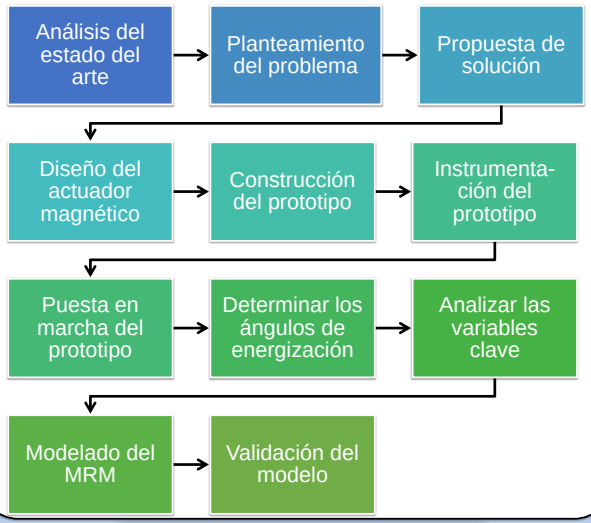
Recuperado de Ríos et al.2024.

Propuesta de solución

Mientras **estudios experimentales** reportan eficiencias inferiores al 4% en **configuraciones monocilíndricas**, esta propuesta busca superar esta barrera mediante un diseño bicilíndrico que aproveche de manera eficiente el campo magnético.



Metodología



Conclusiones

Este trabajo presenta una **propuesta** de MRM bicilíndrico que busca explorar alternativas en los diseños tradicionales.
El diseño plantea el uso simultáneo de ambos polos de un electroimán para accionar pistones mediante atracción y repulsión alternada, lo que teóricamente podría mejorar la eficiencia respecto a sistemas unipolares convencionales.
El proyecto abre líneas de investigación para desarrollar alternativas de transición energética que aprovechen infraestructuras existentes.

Referencias

Rios-Enriquez, C., Adam-Medina, M., García-Morales, J., Guerrero-Ramírez, G. V., & Cervantes-Bobadilla, M. (2024). Modeling and Simulation of a Magnetic Reciprocating Engine. *IEEE Access*.
Ríos Enríquez, C. (2024). Modelado y control de un motor reciprocante magnético [Tesis doctoral, Tecnológico Nacional de México - Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico].
Tiwari, A., Singh, A., Agarwal, D., & Verma, A. K. (2019). Design and Fabrication of 4-Stroke Solenoid Engine. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 6(12).
Morgado, J. E., Enojas, M. J. B., Bongao, H. C., Bongao, H. L. C., Rufo, J. C., Arribas, R. G., ... & Icuspit, C. P. (2022, July). Design and Fabrication of Improved V-8 Solenoid Engine with Splash Lubrication System. In 2022 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications (ISIEA) (pp. 1-4). IEEE.
W. H. M. Joyson, D. R. T. Neil, N. J. Jagan, J. D. Kiruba, and B. Vigneshwaran, "Magnetic repulsation engine," Int. J. Emerg. Technol. Comput. Sci. Electron., vol. 25, no. 5, pp. 481–486, 2018.vol. 25, no. 5, 2018.

Normatividad vigente y certificaciones que deben cumplir los miniautos eléctricos: transporte de pasajeros y mercancías

Nizaritani Reyes-Alonso[1], Mirna Castro-Bello[1], Lizbeth Gómez-Muñoz[1], Carlos V. Marmolejo-Vega[1], Cornelio Morales-Morales[2]
[1]Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chilpancingo
[2]Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Juan del Río

Resumen

El sector automotriz es uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero en el mundo debido al uso de combustibles fósiles; para disminuir el CO_2 la adopción de vehículos eléctricos ha ido en aumento. Esta investigación tiene como objetivo analizar la normatividad vigente y certificaciones que deben cumplir los miniautos eléctricos: transporte de pasajeros y mercancías para el proyecto Olinia en México. A través del método PRISMA, un análisis descriptivo cualitativo, una matriz que concentre la normativa y las certificaciones que deben cumplir los vehículos eléctricos. Como resultado se obtendrá un manual que se utilice como herramienta de referencia para fabricantes y reguladores para verificación de los estándares establecidos.

Introducción

En la actualidad, el sector transporte depende de los combustibles fósiles que corresponde al 25% del consumo total de energía, responsable de la emisión de gases de efecto invernadero, además de otros contaminantes (Tsemekidi, 2023). Siendo China el mayor importador de petróleo en el mundo con 6.3 millones de toneladas diarias, seguido de Estados Unidos con 6.24 (Schwarz, 2024). Para disminuir las emisiones de carbono se han implementado nuevas tecnologías que sean amigables con el medio ambiente, como el desarrollo de Vehículos Eléctricos (VE) que, desde su introducción al mercado con estándares, normas y políticas requeridas, han demostrado una disminución del CO_2 en un 3.1 % en comparación con los índices registrados en 2021 (Haixu, 2025). Actualmente en América Latina no existe una estructura ni un análisis detallado de las regulaciones que deben poseer los VE, ni de las certificaciones internacionales (Schwarz, 2025). En México, existen dos empresas fabricantes de VE: Zacua y Autos Sev, las cuales no especifican los estándares mínimos de seguridad que deben poseer sus automóviles, tampoco indican su estructura normativa. Esta investigación tiene como objetivo analizar la normatividad vigente y certificaciones que deben cumplir los miniautos eléctricos: transporte de pasajeros y mercancías para el proyecto Olinia. A través del método PRISMA, base de datos, análisis de estadística cualitativa y una matriz que concentre la clasificación de las normas y certificaciones de fabricación de automóviles eléctricos, para crear un manual que sirva como estándar de producción para los fabricantes y guía para los verificadores.

Metodología



Objetivo General: Analizar la normatividad vigente y certificaciones que deben cumplir los miniautos eléctricos: transporte de pasajeros y mercancías para el proyecto Olinia.

Resultados Esperados

- Base de datos que concentre las normas y certificaciones, nacionales e internaciones que apliquen para la fabricación de los vehículos eléctricos.
- Documento de estándares en seguridad, voltaje, homologaciones, entre otros.
- Clasificación de las normativas y certificaciones por nivel de fabricación de los vehículos eléctricos
- Matriz concentradora que estructure las normas y certificaciones según el nivel en que se encuentre la fabricación de los vehículos eléctricos.
- Manual de normas y certificaciones de vehículos eléctricos aplicable al proyecto Olinia.

Conclusiones

Es importante implementar estrategias entre el gobierno, sociedad civil y sector privado, que promuevan e impulsen el desarrollo de normas para un transporte limpio y sostenible para disminuir la emisión de CO_2, accesible para los usuarios.

El desarrollo de esta investigación permitirá conocer la estructura normativa y certificaciones existentes que deben cumplir la fabricación de los miniautos eléctricos: transporte de pasajeros y mercancías para el proyecto Olinia, a través de un manual que considere estos estándares desde sus componentes hasta el ensamblaje, que garanticen seguridad y confiabilidad en su elaboración, además del cumplimiento legal.

Referencias

Tsemekidi Tzeiranaki, S., Economidou, M., Bertoldi, P., Thiel, C., Fontaras, G., Clementi, E. L., & De Los Rios, C. F. (2023). The impact of energy efficiency and decarbonisation policies on the European road transport sector. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *170*, 103623. https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103623

Teng, H., Wang, J., Wang, Y., Song, Z., Liu, D., Liu, Z., Xue, X., Chang, W., & Li, M. (2025). Performance research on a CO_2 heat pump system with novel control strategy in electric vehicle. *Applied Thermal Engineering*, *259*, 124877. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124877

Simão, M. S., Vicente, I., Cardoso, B. B., Gianesini, M. A., Dobes, M. I., Kinceler, R., & Jeremias, T. (2025). Regulations and standards for electric vehicle charging infrastructure: A comparative analysis between Brazil and leading countries in electromobility. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *73*, 104119. https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104119

Presidencia de la República. (06 enero 2025). *Presidenta Claudia Sheinbaum presenta Olinia, primera armadora mexicana de mini vehículos eléctricos desarrollados en México*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/presidencia/prensa/presidenta-claudia-sheinbaum-presenta-olinia-primera-armadora-mexicana-de-mini-vehiculos-electricos-desarrollados-en-mexico

FORMACIÓN DE MEMBRANAS DINÁMICAS ELECTROCONDUCTORAS EN UN REACTOR BIOELECTROQUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES

Wilver Montes Dorantes[1], Edson Baltazar Estrada Arriaga[2]
[1]Universidad Autónoma del Estado de Morelos. (wilver.montes@fcqei.uaem.edu.mx),[2]Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Autor de correspondencia (edson_estrada@tlaloc.imta.mx)

Resumen

La integración de los Sistemas Bioelectroquímicos (SBE) y los biorreactores de membrana, da como resultado un sistema de membrana dinámica electroconductora que mejora el tratamiento de aguas residuales al acoplar estos sistemas., la formación de la membrana dinámica puede verse a través de condiciones hidrodinámicas y señales electroquímicas, en este trabajo se realizaron diferentes estrategias para dar seguimiento a la formación de las biopelículas desarrolladas en un sistema bioelectroquímico acoplado a membranas dinámicas se utilizaron diferentes soportes como tela de nailon y grafito bajo diferentes fluxes (16.8, 30 y 70 $Lh^{-1}m^{-2}$). Ambos soportes mostraron resultados significativos en la disminución del flux y aumento de la presión transmembrana en los primeros días con un flux de 70 $Lh^{-1}m^{-2}$, así como un aumento en la densidad de corriente para la tela de grafito al finalizar la operación.

Palabras clave: Sistemas bioelectroquímicos, membranas dinámicas y aguas residuales

Introducción

Durante las últimas décadas, los SBE han emergido como una tecnología alentadora capaz de acelerar la degradación y eliminación de contaminantes (Rahimi et al., 2020). Aunque los principios fundamentales y la estructura de los SBE están bien establecidos, abarcando la diversidad microbiana, materiales del electrodo y diseño del reactor, su aplicación sigue siendo predominantemente a nivel de laboratorio. Una meta actual es expandir estos sistemas a aplicaciones prácticas en el tratamiento de aguas residuales, optimizando así los costos operativos de las plantas de tratamiento (Kurniawan et al., 2022). Dado que los SBE todavía están bajo investigación, la integración con la tecnología de membranas podría reforzar su eficacia y mejorar la calidad del efluente (Ramanaiah et al., 2023).

Metodología

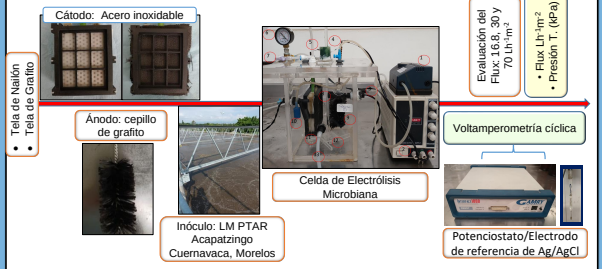


Figura 1. Representación esquemática del sistema experimental.

Resultados

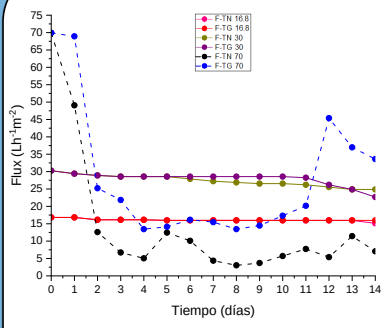


Figura 2. Representación del Flux (16.8, 30 y 70 $Lh^{-1}m^{-2}$) en los soportes tela de nailon y grafito en la formación de la membrana dinámica.

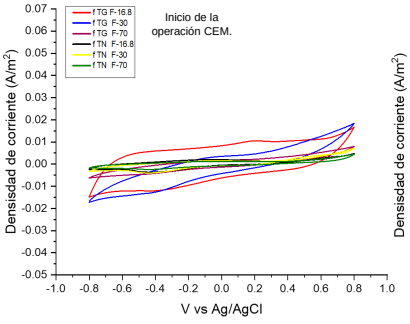


Figura 4. Voltamperogramas cíclicos en un sistema CEM utilizando un soporte de tela de nailon y grafito para la formación de una membrana electroconductora, inicio de la operación (Flux: 16.8, 30 y 70 $Lh^{-1}m^{-2}$).

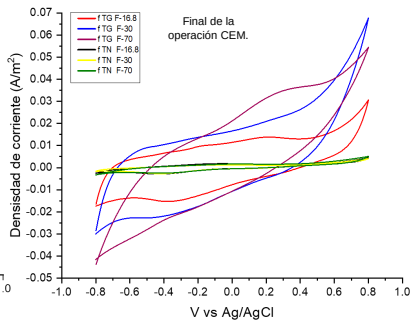


Figura 6. Voltamperogramas cíclicos en un sistema CEM utilizando un soporte de tela de nailon y grafito para la formación de una membrana electroconductora, final de la operación (Flux: 16.8, 30 y 70 $Lh^{-1}m^{-2}$).

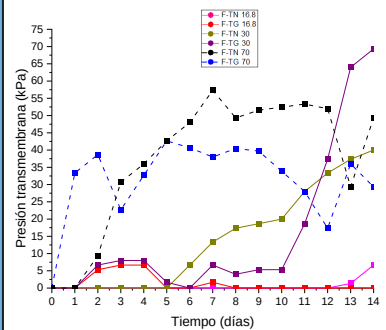


Figura 3. Representación la Presión transmembrana en la formación de la membrana dinámica (Flux: 16.8, 30 y 70 $Lh^{-1}m^{-2}$) en los soportes tela de nailon y grafito.

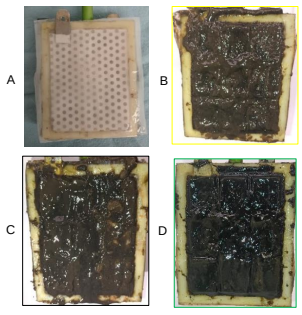


Figura 5. Vista frontal del módulo de la MD A) Tela nailon antes de la operación y módulo de la MD después de la operación B) flux 16.8, C) flux 30 y D) flux 70 $Lh^{-1}m^{-2}$ en la Celda de Electrolisis Microbiana.

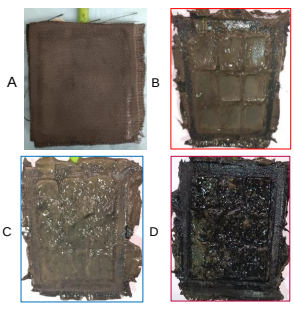


Figura 7. Vista frontal del módulo de la MD A) Tela de grafito antes de la operación y módulo de la MD después de la operación B) flux 16.8, C) flux 30 y D) flux 70 $Lh^{-1}m^{-2}$ en la Celda de Electrolisis Microbiana.

Conclusiones

- La variación del aumento de la presión transmembrana y disminución del flux confirman la formación de la membrana dinámica en el sistema operado.
- El flux de 70 $Lh^{-1}m^{-2}$ presento una mejor formación de la membrana dinámica para los soportes de tela de nailon y grafito.
- El acoplamiento del sistema bioelectroquímico y el biorreactor de membrana con la tela de grafito favoreció la formación de la membrana dinámica electroconductora.

Referencias

- Kurniawan, T. A., Othman, M. H. D., Liang, X., Ayub, M., Goh, H. H., Kusworo, T. D.,. & Chew, K. W. (2022). Microbial Fuel Cells (MFC): A Potential Game-Changer in Renewable Energy Development. Sustainability, 14(24), 16847. https://doi.org/10.3390/su142416847
- Rahimi, S., Modin, O., & Mijakovic, I. (2020). Technologies for biological removal and recovery of nitrogen from wastewater. *Biotechnology Advances*, *43*, 107570. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107570
- Ramanaiah, S. V., Chandrasekhar, K., Cordas, C. M., & Potoroko, I. (2023). Bioelectrochemical systems (BESs) for agro-food waste and wastewater treatment, and sustainable bioenergy-A review. *Environmental Pollution*, *325*, 121432. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121432

ISBN: En trámite

Sistema de purificación de agua con nanotecnología

Ing. Claudia Jaqueline Floriano Limón Ing. Braulio Yahir Delgado Flores Ing. Carlos Fernando Sánchez García

Nano Bridge SA de CV

Resumen

El agua purificada es una necesidad primordial, sin embargo, la contaminación ha reducido significativamente la calidad de esta, siendo un recurso de difícil acceso para múltiples comunidades marginadas. Ante esta problemática, se plantea el desarrollo de un sistema de purificación de agua, ayudado con nanotecnología para maximizar los resultados esperados. En este caso, se logro una amplia reducción de los contaminantes presentes en el agua, removiendo compuestos oleosos, metales pesados, grupos fosfatos, e incluso la carga microbiana; potabilizado el agua de acuerdo con los resultados.

Introducción

El agua es un recurso vital para el desarrollo de las sociedades siendo empleado en varios sectores que van desde el doméstico hasta el industrial[1]. En la actualidad la calidad del agua se ha visto disminuida considerablemente, y se plantea que en un futuro para satisfacer la necesidad de este recurso se optara por potabilizar agua de diferentes fuentes, lo que da origen a la búsqueda de nuevos sistemas de purificación de agua y desarrollo de materiales que permitan obtener agua de calidad para los diferentes sectores[2]. Dentro de los antecedentes, se encuentran proyectos en los que se implementa la nanotecnología para remover contaminantes específicos como colorantes (por medio de degradación) y metales (mediante intercambio iónico)[3-5]. En el presente proyecto se propone la implementación por etapas de múltiples materiales micro y nanoestructurados para la remoción de diferentes contaminantes presentes en aguas residuales, con el objetivo de obtener agua apta para ser usada en el sector agrícola de forma segura e incluso potabilizarla.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar una propuesta para la remoción de compuestos oleosos y otros contaminantes de aguas residuales para que estas puedan ser aprovechadas en otras actividades.

Objetivos específicos

- Disminuir la concentración de metales pesados en el agua residual.
- Remover componentes oleosos del agua.
- Reducir la turbidez del agua a un rango menor de 3 UNT de acorde a la NOM-127-SSA1-2021.

Metodologia

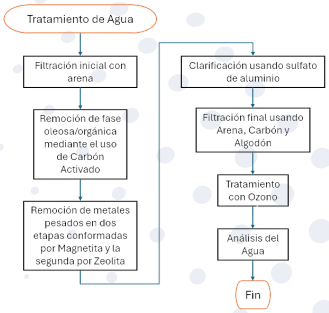


Figura 1. Diagrama de flujo que indica el proceso de purificación de agua.

Conclusiones

Se lograron los 3 objetivos específicos puestos como meta, además de así lograr la creación de un sistema preliminar que emplea el uso de nanopartículas como apoyo en el tratamiento del agua y con la posibilidad de escalar la cantidad de agua tratada siendo así un apoyo o solución a las problemáticas que respectan a la contaminación de cuerpos de agua y la falta de este importante recurso para la vida. Con los pasos y materiales propuestos logramos obtener un resultado de un 97% aproximadamente de reducción de la carga de varios metales pesados y otros como Flúor y Arsénico. Estos resultados fueron analizados en Microlab en base a la NOM-201-SSA1-2015, en los cuales solo el Boro y Manganeso se encuentran fuera de los límites permitidos para agua potable. Otros resultados como la Demanda Química de Oxígeno quedó fuera del límite, complementando se realizaron análisis para determinar la presencia de E. coli y huevos de helminto los cuales fueron nulos en ambos. Con estos resultados se obtienen puntos de mejora para así poder lograr una completa potabilización del agua o utilizar esta como agua de riego en dado caso.

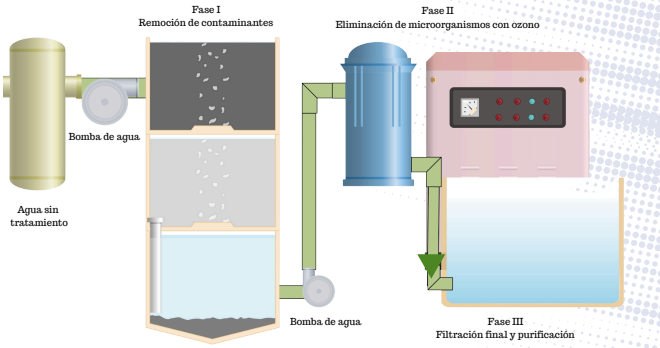


Figura 2. Imagen conceptual de sistema de purificación de agua. Nano Bridge

Resultados

Indicadores	Análisis previo	Análisis posterior	Unidades
Turbiedad	>4	206	UNT
DQO-TS	14,5	902	mg /L
Antimonio	---	<0.002	mg /L
Arsénico	455	<0.005	mg /L
Bario	---	<0.5	mg /L
Boro	---	429	mg /L
Cadmio	<0.050	13	mg /L
Cromo	770	<0.005	mg /L
Cobre	717	<0.2	mg /L
Fluoruros	---	310	mg /L
Manganeso	---	152	mg /L
Mercurio	<0.003	<0.0005	mg /L
Níquel	250	16	mg /L
Plomo	123	<0.005	mg /L
Selenio	---	<0.005	mg /L
Echerichia coli	<3	No detectable	NMP /100 mL
Huevos de helmint	<1	<1	Huevos /L

Tabla 1. Resultados obtenidos de acuerdo a los análisis de Microlab.

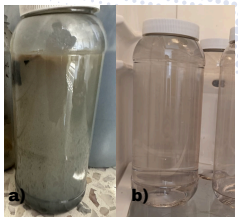


Figura 3. a) Agua residual antes de tratamiento
b) Agua residual despúes de tratamiento



Figura 4. Paso dos del proceso de purificación

Referencias

[1] United Nations World Water Assessment Programme (WWAP). (2023). The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water. UNESCO.

[2] Yunlin Zhang, Jianming Deng, Boqiang Qin, Guangwei Zhu, Yinjun Zhang, Erik Jeppesen, Yindong Tong, Importance and vulnerability of lakes and reservoirs supporting drinking water in China, Fundamental Research, Volume 3, Issue 2, 2023, Pages 265-273, ISSN 2667-3258, https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.01.035.

[3] Luque-Morales, P. A., Lopez-Peraza, A., Nava-Olivas, O. J., Amaya-Parra, G., Baez-Lopez, Y. A., Orozco-Carmona, V. M., Garrafa-Galvez, H. E., & Chinchillas-Chinchillas, M. d. J. (2021). ZnO Semiconductor Nanoparticles and Their Application in Photocatalytic Degradation of Various Organic Dyes. *Materials*, *14*(24), 7537. https://doi.org/10.3390/ma14247537

[4]Mahmoud, A.E.D., Al-Qahtani, K.M., Alflaij, S.O. et al. Green copper oxide nanoparticles for lead, nickel, and cadmium removal from contaminated water. Sci Rep 11, 12547 (2021). https://doi.org/10.1038/s41598-021-91093-7

[5] Parul Chaudhary, Lukman Ahamad, Anuj Chaudhary, Govind Kumar, Wen-Juan Chen, Shaohua Chen, Nanoparticle-mediated bioremediation as a powerful weapon in the removal of environmental pollutants, Journal of Environmental Chemical Engineering,

Visión artificial aplicada a la gestión de imágenes históricas

Jazmín Aguilar Ríos, Luis Solís Sánchez, Celina Castañeda Miranda, Rosario Martínez Blanco, Mireya Moreno Lucio
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

Introducción

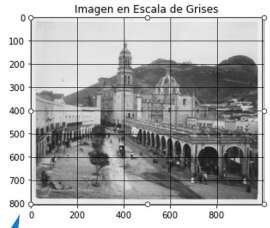
La **visión artificial** es un campo de la **inteligencia artificial** que utiliza el **machine learning** y las **redes neuronales** para enseñar a computadoras y sistemas a extraer información significativa de imágenes digitales, vídeos y otras entradas visuales. En la actualidad se utilizan en diversas áreas por su capacidad de **reconocer patrones** en grandes conjuntos de imágenes, lo que resulta de gran ayuda cuando se requieren tareas de clasificación o detección de alguna característica, estas capacidades resultan útiles cuando se trata de mantener y clasificar imágenes históricas

Contenido principal

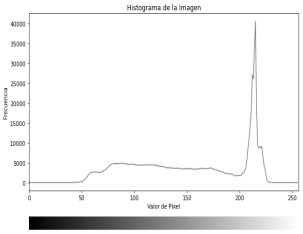
Las imágenes históricas pueden representar un reto para el procesamiento ya que debido al paso del tiempo y las tecnologías empleadas para su captura pueden presentar deterioro en la imagen, ruido o incluso presentar complejidad en su digitalización en técnicas como la plata gelatina o el daguerrotipo.
Las computadoras analizan las imágenes como matrices de valores de píxeles, cada píxel en una imagen en escala de grises representa un valor entre 0 (negro) y 255 (blanco). En una imagen a color, cada píxel se representa por tres valores (rojo, verde y azul). Al trabajar con imágenes realmente lo que se hace es trabajar con estas matrices de datos. Los filtros que se utilizan para extraer características como los usados en las aplicaciones fotográficas (nitidez, suavizado, bordes, etc.) son operaciones matriciales suma, resta, multiplicación y convolución, gracias a estos filtros podemos componer y visualizar datos dentro de las imágenes, lo que mejora la capacidad de las RN de reconocer patrones dentro del conjunto de los datos.

Imágenes y gráficas





Matriz de la imagen:
[[210 210 211 ... 220 221 221]
[212 213 213 ... 221 221 222]
[215 215 216 ... 222 222 222]
...
[220 220 221 ... 218 219 220]
[219 219 220 ... 217 218 219]
[216 217 218 ... 216 217 218]]



Un histograma es una representación gráfica de la distribución de los valores de los píxeles en una imagen. Muestra cuántos píxeles tienen un valor particular.

Matriz de imagen

0	0	0	0	0	0
0	105	102	100	97	96
0	103	99	103	101	102
0	101	98	104	102	100
0	99	101	106	104	99
0	104	104	104	100	98

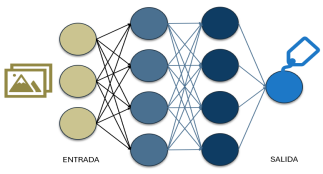
0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

Kernel

100 * 0 + 97* -1 + 96 * 0
+103 * -1+101*5+102 *-1
+104 * 0 +102*-1+100 *0

Matriz resultante

320	206	198	188
210	89	111	101



La capa de salida representa la etiqueta, de esta manera se pueden clasificar las imágenes: edificios, objetos, rostros, ello contribuye:
-Datación
-Catalogación
-Búsqueda



Interpretación del Histograma
•**Picos y Valles**: Los picos altos en el histograma indican que muchos píxeles tienen ese valor de intensidad. Los valles indican menos píxeles con esos valores.
•**Rango de Intensidad**: Si el histograma está distribuido por todo el rango (0 a 255), la imagen tiene buen contraste. Si está concentrado en una región estrecha, la imagen puede parecer descolorida o con poco contraste.

Los filtros trabajan sobre la matriz de la imagen, Operan directamente sobre los valores de los píxeles en el dominio espacial de la imagen. Ejemplos incluyen filtros de suavizado (blur), detección de bordes, y filtros de nitidez.

Imagen Original



Imagen Mejorada (Sharpened)



Cuando se considera que el conjunto de imágenes cuenta con suficiente información para realizar un análisis, se crea la arquitectura de la red, lo que va a permitir reconocer patrones.

sabías que…?

La visión artificial es la misma tecnología que permite la restauración de películas antiguas, permitiendo mejorar la calidad de imágenes deterioradas con el tiempo. Estos algoritmos han permitido colorear films que fueron rodados en blanco y negro, o que presentan problemas debido a las limitantes de la época.

Aplicaciones en imágenes históricas

Las fotografías pertenecientes a los **acervos fotográficos** son de vital importancia para la investigación ya que son una fuente documental que permite observar rasgos culturales, estilísticos, técnicos y materiales de épocas pasadas, es por ese testimonio colectivo que las colecciones fotográficas se pueden considerar un patrimonio cuya **conservación y salvaguarda requiere de gestión, organización, administración, estudio y difusión.** Esta labor resulta muy ardua ya que los acervos fotográficos pueden contar con cientos o miles de imágenes, por lo que desarrollar tecnologías para su gestión es de gran relevancia. Entre las tecnologías que han despertado interés para esta labor se encuentra la **visión artificial,** que ha permitido restaurar imágenes, identificarlas, clasificarlas y estudiarlas. En el mundo diversos archivos y universidades, están buscando nuevas formas de aplicar visión artificial para estudiar imágenes históricas como, libros, periódicos, fotografía vernácula, material audiovisual (películas, programas, series), documentos mediante reconocimiento de caracteres para realizar paleografía, clasificadores que utilizan Redes Neuronales Convolucionales o Incluso algoritmos Vecinos Cercanos, lo que permite reconocer objetos y patrones no sólo en las imágenes sino en la distribución y contenido de la colección.

Conclusión o mensaje final

La visión artificial trabaja con matrices de pixeles que permiten realizar acciones para restaurar, clasificar, identificar o detectar rostros y objetos en las imágenes, los que abre una gran posibilidad a la investigación con archivos fotográficos históricos.
Gracias a la visión artificial se pueden clasificar cientos o miles de imágenes históricas lo que permite catalogarlas y mostrarlas al público sin poner en riesgo el documento original.

Referencias "Para saber más"

Ali, D., Milleville, K., Verstockt, S., Chambers, S., & Birkholz, J. M. (n.d.). *Computer Vision and Machine Learning Approaches for Metadata Enrichment to Improve Searchability of Historical Newspaper Collections*
De la Cruz-Rocca, M. A., Muñoz-Robles, W., & Trinidad-Malpartida, M. A. (2024). Análisis de la aplicación de redes neuronales convolucionales en el área de la visión artificial. *Investigación Valdizana*, *18*(1), e2105.
Nikolaidou, K., Seuret, M., Mokayed, H., & Liwicki, M. (2022). A survey of historical document image datasets. *International Journal on Document Analysis and Recognition*
IBM, *¿Qué es la visión artificial?,* https://www.ibm.com/mx-es/topics/computer-vision

Semáforo Inteligente para la evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas

A. Barrera-Azoños *, M. Castro-Bello *, W. Campos-Francisco *, C. Morales-Morales**, D. Ángeles-Herrera*, S. R. Zagal-Barrera*
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chilpancingo*.
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Juan del Río**.

Resumen

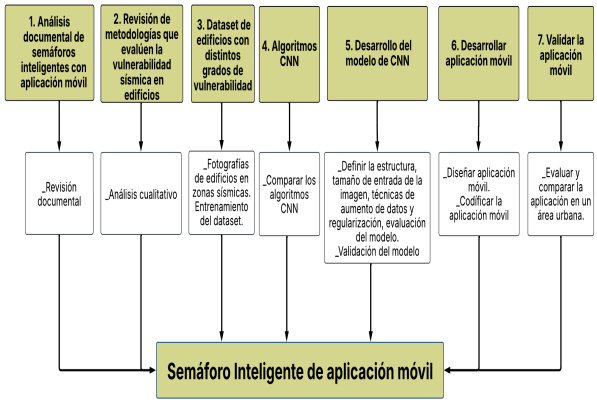
La evaluación rápida de la exposición sísmica de edificios en áreas urbanas es crucial para enfrentar estos fenómenos, debido a que puede prevenir el riesgo de colapsos y pérdidas humanas en áreas con suelos inestables o cercanas a fallas geológicas. Este proyecto desarrollará un semáforo inteligente de aplicación móvil que evalúe la vulnerabilidad sísmica en edificios de zonas urbanas. Con una metodología de seis fases: 1. Revisión documental de semáforos inteligentes con aplicación móvil; 2. Análisis cualitativo de metodologías que evalúen la vulnerabilidad; 3. Conformación del Dataset de edificios; 4. Comparación de algoritmos CNN; 5. Desarrollo del modelo CNN; y 6. Elaboración y validación de la aplicación móvil en entornos urbanos reales. Los resultados serán un modelo CNN y un semáforo inteligente que evalúe las edificaciones expuestas en zonas sísmicas.

Introducción

Las edificaciones construidas en zonas sísmicas son vulnerables, debido a que la mayoría de ellas no cumplen con reglamentos de construcción específicos teniendo como consecuencia el incremento de pérdidas humanas, contaminación ambiental, entre otros (Altindal et al., 2021; Habibi & Alesheikh, 2024). En la actualidad la tecnología reporta avances significativos que permiten mitigar el impacto a través de sistemas automatizados para la clasificación de tipologías de edificios utilizando redes neuronales convolucionales (CNN) y múltiples imágenes a nivel de calle, facilitando el cálculo rápido de la vulnerabilidad sísmica a escala urbana (Firmansyah et al., 2024).

Dada la importancia de implementar tecnologías que permitan una estimación rápida en zonas de alto riesgo, esta investigación propone el desarrollo de una aplicación móvil que evalúe la vulnerabilidad sísmica en edificios de zonas urbanas. Mediante una revisión documental de semáforos inteligentes con aplicación móvil, un análisis cualitativo de metodologías que examinen la fragilidad, conformación del Dataset de edificios con distintos grados de exposición, comparación de algoritmos CNN, desarrollo del modelo, elaboración y validación de la aplicación móvil en entornos urbanos reales. Los resultados serán un modelo CNN aplicado a un semáforo inteligente que evalúe las edificaciones expuestas en regiones sísmicas.

Metodología



Objetivo General

- Desarrollar un semáforo inteligente de aplicación móvil que evalúe la vulnerabilidad sísmica en edificios de zonas urbanas.

Resultados

- Informe de tecnologías de semáforos inteligentes y apps móviles.
- Comparación de metodologías de evaluación sísmica en edificios.
- Dataset etiquetado de edificios con vulnerabilidad sísmica.
- Análisis comparativo de algoritmos CNN para clasificación sísmica.
- Modelo CNN entrenado para evaluar vulnerabilidad estructural.
- App móvil funcional para diagnóstico sísmico mediante imágenes.
- Validación en campo con resultados de eficacia y usabilidad.

Conclusiones

En conclusión, este estudio propone un enfoque innovador para la evaluación rápida de la vulnerabilidad sísmica de edificios urbanos, integrando redes CNN en una aplicación móvil con un sistema de semáforo inteligente. Considerando un dataset estandarizado de imágenes optimizado para entrenar modelos de CNN eficiente como MobileNet, que permita reducir el costo computacional mientras mantiene una precisión esperada de al menos 85%. A diferencia de estudios previos, esta propuesta permitirá automatizar el proceso de estimación, haciéndolo accesible en dispositivos móviles. Su validación en entornos urbanos reales demostrará su practicidad para la prevención de desastres, promoviendo ciudades más resilientes.

Referencias

Altindal, A., Karimzadeh, S., Erberik, M. A., Askan, A., Anil, O., Kockar, M. K., & Sahmaran, M. (2021). A case study for probabilistic seismic risk assessment of earthquake-prone old urban centers. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *61*. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102376

Firmansyah, H. R., Sarli, P. W., Twinanda, A. P., Santoso, D., & Imran, I. (2024). Building typology classification using convolutional neural networks utilizing multiple ground-level image process for city-scale rapid seismic vulnerability assessment. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 131. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107824

Habibi, R., & Alesheikh, A. A. (2024). Uncovering implicit Seismogenic associated regions towards promoting urban resilience. Resilient Cities and Structures, 3(4), 83–94. https://doi.org/10.1016/j.rcns.2024.11.002

Propuesta metodológica para un Sistema de Clasificación de Microalgas basado en Visión Computacional e Iluminación Multiespectral

Tobón-Villalva, Alfredo Nabor *; González-Lorence, Armida *; Espinosa-Calderón, Alejandro**; Sancén-Plaza, Agustín**; Flores-Gómez, Carlos Alberto***
Tecnológico Nacional de México/*Instituto Tecnológico de San Juan del Río/**Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo (CRODE)/***Instituto Tecnológico de Roque

Resumen

Las microalgas representan un recurso biotecnológico con aplicaciones prometedoras en sectores alimenticio, medicinal y cosmético. Este trabajo propone una metodología novedosa para la identificación y clasificación de especies de microalgas, utilizando técnicas de visión computacional. La implementación contribuirá a la caracterización eficiente y aprovechamiento de estos microorganismos.

Introducción

Las microalgas son organismos unicelulares fotosintéticos que habitan en ambientes acuáticos. Destacan por su rica composición nutricional que incluye proteínas, lípidos, carbohidratos, carotenoides y ácidos fenólicos (**Wong et al., 2022**). Especies como Chlorella y Spirulina son utilizadas en la industria alimentaria, mejorando propiedades sensoriales y nutricionales de diversos productos. Su biocompatibilidad y sostenibilidad las hace valiosas en aplicaciones biomédicas (**Zhang et al., 2023**), con estudios que documentan efectos anticancerígenos, antioxidantes y antiinflamatorios (**Da Silva et al., 2024**). Aunque su cultivo es relativamente sencillo, su identificación y clasificación precisa representa un desafío técnico y económico significativo.

Metodología



Figura 1. Microscopio Olympus IX71

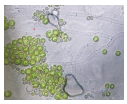


Figura 2. Algas tipo clorella

Grupo de imágenes
De las muestras de los cultivos de algas se capturan las imágenes utilizando un microscopio Olympus IX71(Figura 1). Se planea generar un grupo de al menos mil imágenes en diversas etapas del crecimiento de las algas clorella (Figura 2). Dichas imágenes serán etiquetadas con número y tipo de microalgas.

Modelo de red neuronal
El conjunto de imágenes etiquetadas se usará para el entrenamiento y validación del modelo de red neuronal.

De ser requerido para mejorar el modelo, el grupo de imágenes se incrementara procesándolas con transformaciones geométricas de rotación, escalado, desplazamiento y espejeado.

El modelo definitivo podrá igualar e incluso mejorar el desempeño de un clasificador humano.

Resultados

Los trabajos revisados (Tabla 1) se basan en el uso de redes neuronales convolucionales y el uso de modelos de aprendizaje automático pre-entrenados, se observa que el tipo de sensor no representa un factor crítico en los resultados reportados.

Tabla 1. Técnicas utilizadas para el reconocimiento de microalgas.

Trabajo	Modelo	Sensor	Precisión %	R^2
Tummawai et al., 2024	XGBoost	Cámara ESP32	-	0.9997
Nguyen et al., 2024	CNN	Genérico	99.45	-
Magalhães et al., 2025	XGBoost	Genérico	97.00	-
Otálora et al., 2023	ANN	FlowCam	97.00	0.9680
Proença et al., 2022	YOLO v5	Cámara de teléfono celular	97.40	-

Optimización del modelo de identificación de microalgas
El desarrollo del sistema requiere:

- Conjunto robusto de imágenes: Mínimo 1,000 imágenes para entrenamiento y prueba, factor crítico para la efectividad del modelo
- Preprocesamiento esencial: Normalización de brillo, contraste y resolución; eliminación de ruido mediante filtros y segmentación
- Ampliación de datos: Aplicación de técnicas de inversión y rotación para incrementar el conjunto de entrenamiento

Arquitectura propuesta
El sistema se estructura en cuatro algoritmos clave (Figura 3):

1. Inicialización del Modelo Híbrido
2. Preprocesamiento de Imágenes
3. Entrenamiento del Modelo
4. Predicción de Clases

Esta metodología permitirá clasificar microalgas con alta precisión, superando las limitaciones de variabilidad morfológica y diferencias temporales en la recolección.

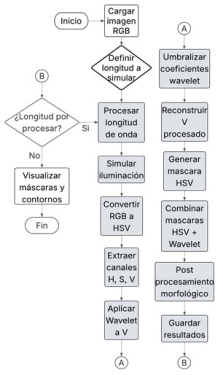


Figura 3. Algoritmos clave

Conclusiones

Sistema innovador para identificación de microalgas
Este trabajo establece las bases para un sistema de visión computacional que identifica automáticamente microalgas mediante un método híbrido que integra:

- Transformadas wavelets
- Redes neuronales avanzadas

Esta propuesta supera limitaciones identificadas en la literatura científica actual y busca alcanzar precisión comparable o superior a la evaluación humana experta.
El procesamiento mediante wavelets mejora significativamente la diferenciación entre especies morfológicamente similares, contribuyendo a democratizar el acceso a tecnologías de cultivo de microalgas en contextos tanto investigativos como comerciales.
Se deberá considerar incluir imágenes contaminadas con hongos ya que sus hifas transparentes representan un reto para identificar elementos contaminantes.
Se prevé utilizar esta solución en un sistema de acuaponía como primera fase de automatización.

Referencias

Da Silva, A. F., Moreira, A. F., Miguel, S. P., & Coutinho, P. (2024). Recent advances in microalgae encapsulation techniques for biomedical applications. In *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 333). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103297

Nguyen, L., Nguyen, D. K., Nguyen, T., & Nghiem, T. X. (2024). Convolutional neural network regression for low-cost microalgal density estimation. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, *9*. https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100653

Otálora, P., Guzmán, J. L., Acién, F. G., Berenguel, M., & Reul, A. (2023). An artificial intelligence approach for identification of microalgae cultures. *New Biotechnology*, *77*, 58–67. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2023.07.003

Wong, J. F., Hong, H. J., Foo, S. C., Yap, M. K. K., & Tan, J. W. (2022). A review on current and future advancements for commercialized microalgae species. In *Food Science and Human Wellness* (Vol. 11, Issue 5, pp. 1156–1170). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.04.007

Zhang, Z., Chen, Y., Klausen, L. H., Skaanvik, S. A., Wang, D., Chen, J., & Dong, M. (2023). The Rational Design and Development of Microalgae-Based Biohybrid Materials for Biomedical Applications. In *Engineering* (Vol. 24, pp. 102–113). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.09.016

SAFEBRIDGE

INTRODUCCIÓN

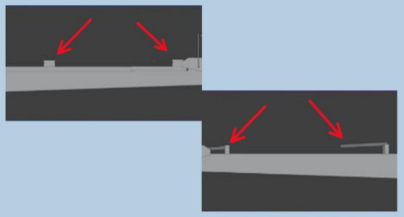
Cada año, las lluvias provocan inundaciones y deslaves, afectando infraestructuras y personas. Los sistemas de alerta actuales son lentos o imprecisos. SafeBridge integra sensores económicos, aprendizaje automático y plataformas digitales para ofrecer avisos oportunos y efectivos.

Componentes clave:

- Sensores accesibles: HC-SR04 para medir niveles de agua.
- Inteligencia artificial: TensorFlow analiza datos históricos y en tiempo real.
- Alertas efectivas: Notificaciones en Google Maps y Waze.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de SafeBridge, se utilizaron sensores ultrasónicos que miden los niveles de agua en carreteras y laderas. La información es procesada por microcontroladores ESP32 y enviada a una base de datos a través de la tecnología LoRa, que permite comunicación a largas distancias sin necesidad de internet. Luego, un modelo de inteligencia artificial desarrollado con TensorFlow analiza los datos y genera alertas tempranas. Estas alertas se integran con plataformas de navegación como Google Maps y Waze, notificando a conductores y autoridades sobre posibles riesgos en tiempo real.



ARQUITECTURA

El sistema SAFEBRIDGE emplea una arquitectura descentralizada basada en comunicación LoRa punto a punto, diseñada para el monitoreo autónomo de niveles de agua y la emisión de alertas tempranas. La estructura se compone de dos módulos principales:

Módulo de Sensado y Transmisión (Punto A)

Sensor HC-SR04: Ultrasonido de 3.3V para medición precisa del nivel del agua (rango: 2-500 cm).

Microcontrolador ESP32: Procesa lecturas crudas y aplica filtros de promedio móvil para reducir ruido.

Transceptor LoRa (SX1278): Transmite paquetes de datos cada 5 segundos (915 MHz, 20 dBm de potencia).

Módulo de Recepción y Procesamiento (Punto B)

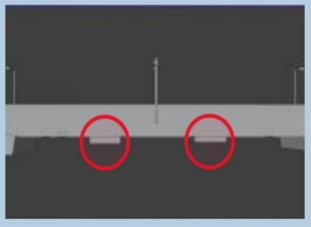
Gateway LoRa: Receptor con antena de 8dBi para maximizar alcance.

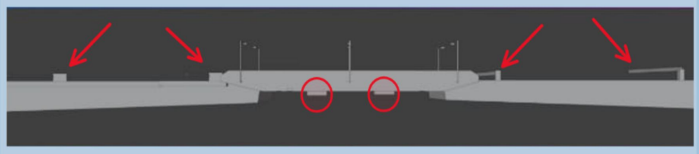
Unidad de Procesamiento (Esp32): Ejecuta modelos de TensorFlow Lite para:

Predicción temporal (LSTM): Anticipa tendencias de crecida.

Clasificación (Random Forest): Determina el nivel de riesgo (verde/amarillo/rojo).

Actuadores: Semáforo LED controlado por GPIO y protocolos MQTT para integración con sistemas externos.





CONCLUSIONES Y REFERENCIAS

El sistema SafeBridge representa una solución innovadora y accesible para la detección de inundaciones y deslizamientos. Su combinación de sensores económicos, redes de comunicación eficientes e inteligencia artificial ofrece una alternativa confiable a los sistemas de alerta tradicionales. Se recomienda realizar pruebas en entornos reales y optimizar la conectividad en áreas remotas para mejorar su efectividad. Además, la integración con bases de datos en la nube permitirá un análisis más robusto y una mejor gestión de la información en tiempo real.

- Google Brain Team. (2023). TensorFlow: An end-to-end open source platform for machine learning.
- Semtech. (2022). LoRa® Technology: Enabling long-range, low-power applications.
- Zhang, L., et al. (2021). Machine learning for flood prediction: A comparative study. IEEE Access.
- Oficina de la UNDRR. (2020). Manual para SAT en América Latina.

Análisis de la inmovilización de anticuerpos sobre película delgada de óxido de Zinc.

***Gazal Sánchez Emmanuel*[1]**, *Orduña Diaz Abdú*[1], *Domínguez Jiménez Miguel Ángel*[2].

[1]Instituto Politécnico Nacional, Centro de investigación en Biotecnología aplicada. Laboratorio de nanobiotecnología. Ex hacienda San Juan Molino Carretera Estatal, km 1.5, 90700 Santa Inés Tecuexcomac, Tlaxcala, México.

[2]Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ecocampus Valsequillo. Laboratorio de electrónica flexible. Independencia O 2 sur 50. 72960 San Pedro Zacachimalpa, Puebla, México.

Correo electrónico: egazals2300@alumno.ipn.mx

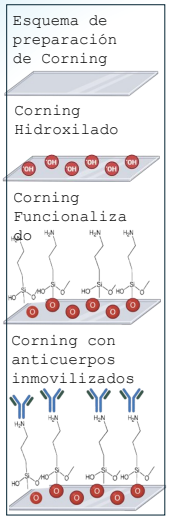
Introducción: Las enfermedades transmitidas por alimentos (ETA), representan una preocupación significativa a nivel mundial debido a su impacto en la salud pública. (CDC, 2022). Dentro de estos patógenos, *salmonella* destaca por su alta incidencia y asociación con alimentos como carne, huevos y leche, que a menudo conservan sus propiedades organolépticas intactas, pese a la contaminación. Los métodos tradicionales de detección son efectivos, pero requieren un tiempo prolongado. (M.T.B. Martínez et al, 2023). El objetivo de este trabajo fue implementar una metodología de inmovilización de anticuerpos, como paso clave para un futuro desarrollo de un biosensor óptico para una detección rápida y eficiente de microorganismos patógenos o de interés para su vigilancia alimentaria.

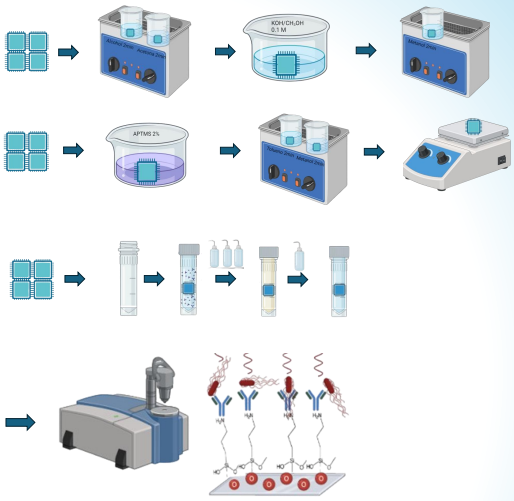
Metodología:

Hidroxilación por inmersión en KOH/CH_3OH

Funcionalización para generación de grupos silano.

Inmovilización de anticuerpos.





Resultados:

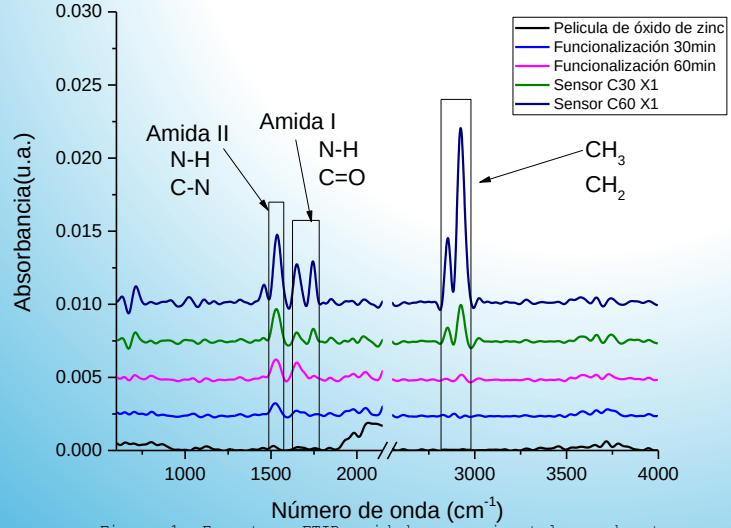


Figura 1. Espectros FTIR unidades experimentales cada etapa en comparación

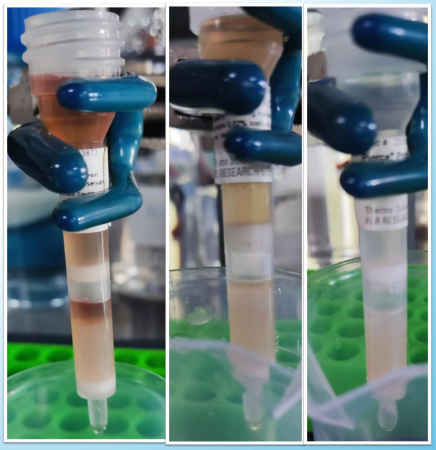


Figura 2. Columna de cromatografía para purificación de anticuerpos

Conclusión: La metodología demostró a través de análisis FTIR, la confirmación de la inmovilización de los anticuerpos IgG anti-*salmonella*, lo que permite a futuro el ensamble de un biosensor para futuras detecciones.

Agradecimientos:
Agradecemos a la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. Por el financiamiento otorgado para la realización de este trabajo.

Bibliografía:

•CDC. (2022). La Salmonella y los alimentos. Seguridad de Los Alimentos, 9–12. Martínez, M. T. B., Juárez, D. R., Rojas, M. G., & Orozco, J. L. O. (2023). Comportamiento epidemiológico de Salmonella sp. en alimentos de origen vegetal por región intercontinental. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 14(1), 109–121. https://doi.org/10.29312/remexca.v14i1.2966
•SENASICA. (2021). Panorama Nacional de Salmonelosis. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Social.
•Martínez, M. T. B., Juárez, D. R., Rojas, M. G., & Orozco, J. L. O. (2023). Comportamiento epidemiológico de Salmonella sp. en alimentos de origen vegetal por región intercontinental.

ISBN: En trámite

Análisis de la eficacia de la repetición intrónica del gen C9orf72 como biomarcador diagnóstico de la ELA en pacientes mexicanos

Ing. Manuel Alejandro Villalobos Loredo *, Ing. Janay Araí Bátiz Lara*, Dra. Raquel Cuevas Díaz Durán*
* Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar la utilidad diagnóstica de la repetición intrónica GGGGCC (G4C2) en el gen **C9orf72** en pacientes mexicanos con Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA). Se extrajo ADN genómico de muestras sanguíneas y se amplificó la región objetivo mediante la técnica RP-PCR con el kit AmplideX PCR/CE C9orf72. El **análisis de fragmentos** permitió determinar la **cigocidad** y cuantificar el número de repeticiones. Se analizó la cohorte de **47 pacientes con ELA** y un grupo de **7 controles** emparejado por edad y sexo. Se observó una distribución bimodal en los pacientes, con un subgrupo portador de **expansiones patológicas** de hasta **145 repeticiones**. El análisis estadístico mostró una desviación significativa respecto a la distribución esperada (**p < 0.05**), respaldando su asociación con la enfermedad. Los hallazgos coinciden con estudios previos y consolidan el valor de C9orf72 como **biomarcador diagnóstico** en esta población.

Introducción

La esclerosis lateral amiotrófica (ELA) es la **enfermedad más frecuente de las neuronas motoras**, con una incidencia de 2/100,000 personas al año.



- Neurodegenerativa, **progresiva**, mortal.
- Supervivencia: **3 a 5 años** en el **90%** de los casos
- **Debilidad muscular** progresiva

El diagnóstico sigue siendo basado en **juicio clínico** y es un **proceso complicado**, puede tardar de 12-18 meses (De Campos et al., 2023).

Necesidad crítica de biomarcadores para la confirmación de diagnóstico, pronósticos y de monitoreo.

C9orf72

El gen **C9orf72** contiene 11 exones

¿Cuál es la mutacion?

Expansión de repeticiones hexanucleotídicas (HRE) **GGGGCC (G4C2)**

La **HRE** se encuentra en el **intron 1**

La **HRE** provoca:
- Toxicidad
- Perdida de función

¿Qué lo hace patogénico?

- Un umbral superior a **30 repeticiones** del gen C9orf72 suele ser patogénico
- La relación entre el número de repeticiones y la edad de inicio de los síntomas aún **no está claramente establecida**
- Pacientes sintomáticos tienen hasta **varios cientos o miles de repeticiones**

Metodología

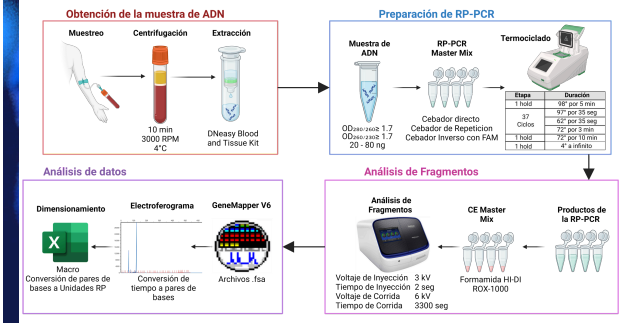


Fig 1. Protocolo de RP-PCR y electroforesis capilar para realizar un análisis de fragmentos de la HRE .

Resultados

Se analizó la distribución de repeticiones del motivo **G4C2** en la región intrónica del gen C9orf72 en una cohorte de pacientes mexicanos con de ELA. Se cuenta con una cohorte total de **47 pacientes diagnosticados** y un grupo de 7 controles sanos, emparejados por sexo y edad.

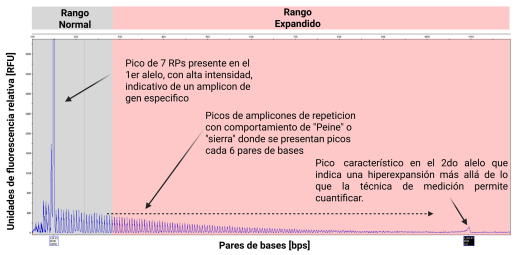


Fig 2. Electroferograma de una muestra heterocigota hiper-expandida

El análisis del ADN mediante electroforesis capilar permitió identificar dos alelos en cada individuo, lo que permite determinar la cigocidad de la mutación. En este caso se observa un **patrón heterocigoto**: un primer alelo con un pico de alta intensidad correspondiente a una repetición corta dentro del rango normal. Se muestra un patrón de picos repetitivos en forma de **"peine"**, característico de una expansión anormal. Además, se presenta un pico al final del gráfico que sugiere que la expansion del 2do alelo es una expansión muy extensa, más allá de lo que la tecnica puede cuantificar **(Fig. 2)**

La mayoría de los alelos mostró menos de 10 repeticiones, con un máximo de frecuencia en **2 RP**. Se observaron **diferencias significativas** entre controles y casos sALS, destacando una expansión extrema de **145 RP** en un paciente con sALS. El análisis estadístico evidenció una distribución alterada en sALS **(p < 0.05)**, lo que sugiere una asociación robusta entre la expansión de **C9orf72** y el desarrollo de la **enfermedad** (**Fig. 3**).

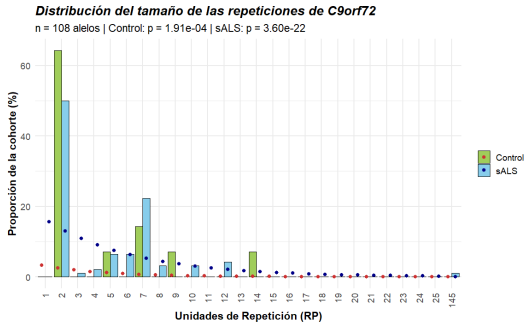


Fig. 3 Distribucion de frecuencias observadas de Unidades de Repeticion (RP) en pacientes con ELA y en controles sanos

Conclusiones

- **Se detectaron expansiones patológicas del gen C9orf72 en pacientes mexicanos con ELA confirmada, lo que respalda su utilidad como biomarcador diagnóstico.**
  - El ensayo AmplideX PCR/CE permitió identificar con claridad las expansiones y determinar la cigocidad de los individuos. Los hallazgos son consistentes con estudios previos realizados en poblaciones europeas y americanas.

A futuro:

- Con la cohorte completa (47 pacientes y 7 controles), se confirma la presencia de expansiones anómalas en sALS, fortaleciendo la evidencia de su implicación patogénica.
  - Se ampliará la muestra de controles y establecerán correlaciones entre el número de repeticiones y parámetros clínicos, como la escala ALSFRS-R, y sobrevida.

Referencias

- Bram, E., Javanmardi, K., Nicholson, K., Culp, K., Thibert, J. R., Kemppainen, J., Le, V., Schlageter, A., Hadd, A., & Latham, G. J. (2018). Comprehensive genotyping of the C9orf72 hexanucleotide repeat region in 2095 ALS samples from the NINDS collection using a two-mode, long-read PCR assay. Amyotrophic Lateral Sclerosis and Frontotemporal Degeneration, 20(1–2), 107–114. https://doi.org/10.1080/21678421.2018.1522353
- De Campos, C. F., Gromicho, M., Uysal, H., Grosskreutz, J., Kuźma-Kozakiewicz, M., Santos, M. O., Pinto, S., Petri, S., Swash, M., & De Carvalho, M. (2023). Trends in the diagnostic delay and pathway for amyotrophic lateral sclerosis patients across different countries. Frontiers in Neurology, 13. https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1064619
- Nagy, Z. F., Pál, M., Engelhardt, J. I., Molnár, M. J., Klivényi, P., & Széll, M. (2024). Beyond C9orf72: repeat expansions and copy number variations as risk factors of amyotrophic lateral sclerosis across various populations. BMC Medical Genomics, 17(1). https://doi.org/10.1186/s12920-024-01807-9
- Pang, W., & Hu, F. (2020). Cellular and physiological functions of C9ORF72 and implications for ALS/FTD. Journal of Neurochemistry, 157(3), 334–350. https://doi.org/10.1111/jnc.15255

VERSIÓN PRELIMINAR DEL DISEÑO DE PRUEBAS ESTANDARIZADAS DIGITALIZADAS DE DETECCIÓN DE DEMENCIA

Lluvia Arely López Primo *, Daniela Hernández Castañeda*, José Francisco Gómez Aguilar **, Adela Hernández Galván***
* Tecnológico Nacional de México Campus CENIDET.
** Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
*** Centro de Investigación Transdisciplinar en Psicología. Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Resumen

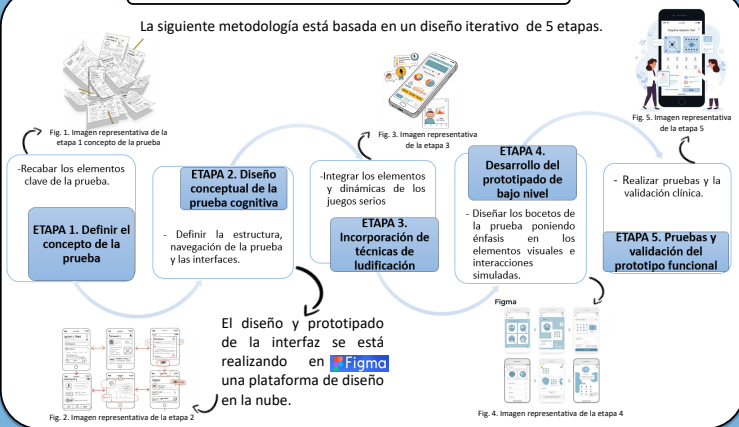
En la práctica clínica habitual las pruebas estandarizadas han desempeñado un papel importante para la detección y el seguimiento de la demencia, buscando minimizar la subjetividad al evaluar el rendimiento de las habilidades cognitivas. Sin embargo, los expertos en salud continúan empleando estas pruebas en papel y lápiz. Utilizando una herramienta de prototipado de interfaces, en este trabajo se presenta una versión preliminar del diseño digitalizado de una prueba estandarizada y un instrumento de evaluación, que ya han sido validados para la población hispano hablante.

Introducción

La enfermedad del Alzheimer es el tipo más común de demencia, se caracteriza por el deterioro cognitivo, la pérdida de la capacidad para realizar actividades diarias y cambios de comportamiento en las personas que la padecen. Para iniciar un tratamiento que consiga retrasar la progresión de la enfermedad se debe determinar un diagnóstico temprano por un profesional de la salud; quien mediante una evaluación neuropsicológica establece la condición cognitiva de la persona a través de la aplicación de pruebas estandarizadas, estas pruebas evalúan las habilidades cognitivas a fin de determinar qué tanto han sido afectadas por la enfermedad. A pesar de que la demencia es la causa más frecuente de discapacidad y dependencia, las alternativas de tratamiento son limitadas, los profesionales de la salud se siguen apoyando en pruebas cognitivas administradas en papel y lápiz las cuales requieren un análisis manual que puede generar variabilidad en la interpretación de los resultados. La digitalización conseguiría mejorar la precisión, estandarizar las evaluaciones y garantizar resultados consistentes, buscando optimizar la aplicación y facilitar su integración con técnicas de inteligencia artificial y gamificación para un diagnóstico preciso y eficiente. Este trabajo muestra la versión preliminar del diseño de dos pruebas cognitivas digitalizadas que servirían de apoyo al especialista para brindar intervenciones más efectivas.

Metodología

La siguiente metodología está basada en un diseño iterativo de 5 etapas.



Resultados

Se está trabajando en el diseño de las interfaces, la estructura y la navegación de dos de las pruebas proporcionadas por una especialista en Neuropsicología. Usando la herramienta de prototipado Figma, se están diseñando las interfaces y los wireframes de las pruebas cognitivas estandarizadas: Mini Examen del Estado Mental y escala ROSA.



Fig. 6. Wireframe del Mini Examen del Estado Mental



Fig. 7. Wireframe de la escala Rosa



Los resultados preliminares han demostrado avances significativos en la digitalización de las pruebas. Basados en las observaciones dadas por expertos, se resaltan los siguientes puntos:

1. En la prueba Mini Examen del Estado Mental, la estandarización mexicana otorga 8 puntos por escolaridad a personas que no saben leer o escribir y tienen menos de 3 años de estudios.
2. Existe una brecha digital en los adultos mayores, debido a que no cuentan con habilidad para escribir y seleccionar al usar tecnología.
3. Se requiere ajustar a pregunta por pantalla para no saturar de información la evaluación diagnostica.



Conclusiones

Las alternativas de diagnóstico y seguimiento actuales que se utilizan en la práctica clínica para la evaluación cognitiva pueden mejorarse a través de la digitalización, los avances en este trabajo hacia una digitalización de pruebas cognitivas han sido considerables, se logró una primera versión del diseño de las pruebas, lo que ha permitido ajustarlas a las necesidades de los adultos mayores, la reducción de errores de evaluación, la optimización de los datos capturados durante la aplicación de la prueba y el seguimiento a través del tiempo. Con esto, los especialistas podrán contar con una herramienta de apoyo clínico.

Quedan desafíos por abordar, al ser una primera versión requiere ajustes que refinen las interfaces de las pruebas digitalizadas y la validación de los expertos. Se continúa con el desarrollo de la aplicación y próximamente se integrarán los elementos de gamificación e inteligencia artificial al prototipo, se validarán con expertos y se llevarán a cabo pruebas de piloteo con profesionales de la salud para evaluar el desempeño de las pruebas digitalizadas.

¿Te interesa conocer más?

[1] S. Weintraub, "Neuropsychological assessment in dementia diagnosis," *Continuum (Minneap. Minn.)*, vol. 28, no. 3, pp. 781–799, Jun. 2022. doi: 10.1212/CON.0000000000001135

[2] C. Sirilertmekasakul, W. Rattanawong, A. Gongvatana, and A. Srikiatkhachorn, "The current state of artificial intelligence-augmented digitized neurocognitive screening test," *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 17, p. 1133632, Mar. 2023. doi.org/10.3389/fnhum.2023.1133632

[3] S. R. De Beaman et al., "Validation of a modified version of the Mini-Mental State Examination (MMSE) in Spanish," *Aging Neuropsychology and Cognition*, vol. 11, no. 1, pp. 1–11, Mar. 2004. doi: 10.1076/anec.11.1.1.29366.

[4] E. M. Longoria-Ibarrola, G. I. Acosta-Castillo, M. Rosales-Méndez, P. Andrade-Calderón, O. S. Pedro-Caligua, and A. L. Sosa-Ortiz, "Concurrent validation of the relevant outcome scale for Alzheimer's disease (ROSA) in mexican patients," *Arch Neurocien*, vol. 19, no. 1, pp. 3–8, Mar. 2014. doi: 10.31157/an.v19i1.24.

Evaluación de la actividad antimicrobiana de extractos etanólicos de *Oenothera rosea* contra *Escherichia coli* y *Shigella flexneri*

Yadira Citlali Rodríguez Jiménez*, MNC. Ana María Alvarado Vásquez*
*Instituto Tecnológico de Estudios Superiores Zamora-ITESZ

Resumen

Los compuestos de las hierbas medicinales pueden poseer actividad antimicrobiana gracias a los compuestos fenólicos que contienen. Oenothera rosea es una planta medicinal conocida comúnmente como hierba del golpe, pertenece a la familia de las Onagraceae, se puede encontrar de manera silvestre, los usos medicinales y/o tradicionales que se implementan en México son para aliviar heridas, inflamaciones, hematomas, y como cicatrizantes, etc. El presente trabajo, se realizó con la finalidad de evaluar la actividad antibacteriana de extractos etanólicos de la planta medicinal Oenothera rosea sobre bacterias las enteropatógenas Escherichia coli y Shigella flexneri,; el ensayo se llevó a cabo mediante la técnica de difusión por pocillo, y los resultados mostraron el potencial inhibidor de cada uno de los extractos: tallo, flor y hoja, contra las bacterias evaluadas, teniendo como referencia un control positivo antibiótico (Ciproflox® 100 mg/mL) y uno negativo (agua desionizada estéril), la inhibición obtenida se generó de acuerdo a la concentración de extracto utilizado por caja.

Introducción

En Michoacán, el uso de plantas medicinales es una práctica ancestral para tratar diversas enfermedades. Algunas poseen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas, lo que resulta relevante ante la creciente resistencia bacteriana causada por el uso excesivo de antibióticos. La resistencia bacteriana dificulta el tratamiento de infecciones, por lo que es necesario investigar alternativas naturales. Entre ellas, los productos vegetales han demostrado efectos terapéuticos. La hierba del golpe (*Oenothera rosea*) se ha utilizado tradicionalmente para tratar golpes, heridas y problemas digestivos. Contiene compuestos bioactivos como flavonoides, taninos y ácidos fenólicos, con posibles propiedades antibacterianas. Este estudio tuvo como objetivo detectar compuestos con potencial antibacteriano en extractos etanólicos de *Oenothera rosea*, recolectada en Cherán, Michoacán.



Figura 1. Planta medicinal *Oenothera rosea* (Autoría propia, 2024).

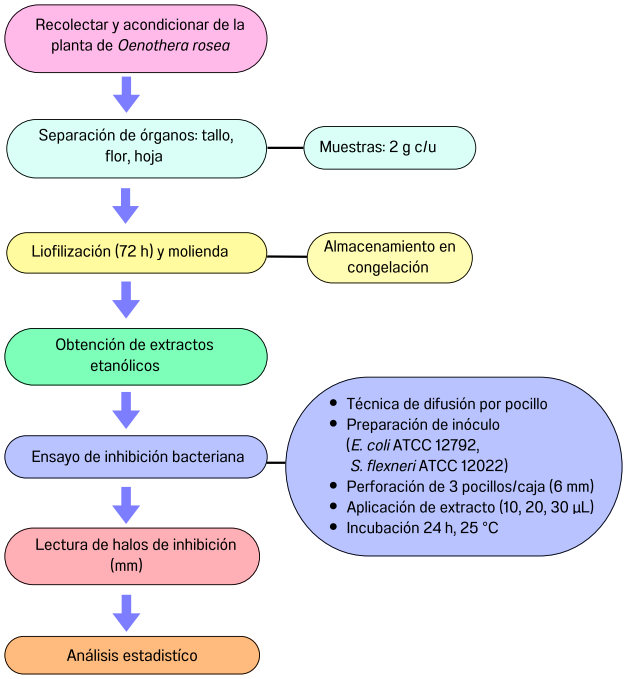
Objetivo General

Evaluar el potencial antibacteriano presentes en extractos etanólicos de la planta medicinal *Oenothera rosea* denominada hierba del golpe en cepas de *Escherichia coli* y *Shigella flexneri*.

Objetivos Específicos

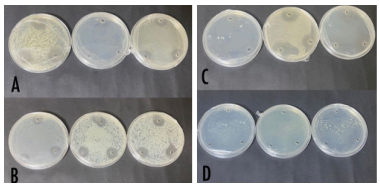
- Obtener extractos etanólicos de los diferentes órganos de *Oenothera rosea* (tallo, flor y hoja) mediante una extracción con etanol acidificado.
- Determinar la actividad antibacteriana de los extractos etanólicos de Oenothera rosea mediante la técnica de difusión en agar por pocillo, utilizando cepas estándar de E. coli y S. flexneri, cuantificando los halos de inhibición para evaluar su potencial antimicrobiano.
- Aplicar un análisis estadístico de los datos obtenidos mediante análisis de varianza y la prueba de comparación múltiple de Tukey, con el propósito de identificar diferencias significativas entre los efectos inhibitorios de los diferentes extractos evaluados.

Metodología



Resultados

Ensayos in vitro



Los extractos de tallo, flor y hoja de *Oenothera rosea* mostraron potencial inhibitorio ya que presentaron halos de inhibición sobre cepas enteropatógenas *E. coli* (ATCC 12792) y *S. flexneri* (ATCC 12022).

Inhibición de los extractos de *Oenothera rosea* sobre *E. coli*.

	Escherichia coli	
Extracto de *Oenothera rosea* TRATAMIENTO	HALO DE INHIBICIÓN (mm) ± DS	TUKEY
HOJA	10.94 ± 3.25	B
TALLO	10.41 ± 3.80	B
FLOR	8.85 ± 3.80	B
CONTROL*	27.01 ± 4.33	A

Inhibición de los extractos de *Oenothera rosea* sobre *S. flexneri*.

	Shigella flexneri	
Extracto de *Oenothera rosea* TRATAMIENTO	HALO DE INHIBICIÓN (mm) ± DS	TUKEY
HOJA	11.79 ± 2.07	B
TALLO	11.23 ± 1.56	B
FLOR	10.17 ± 4.26	B
CONTROL*	36.07 ± 4.97	A

Conclusiones

Los extractos de *Oenothera rosea* presentaron actividad inhibitoria contra cepas de bacterias enteropatógenas de *S. flexneri* y *E. coli*. Los extractos etanólicos de hoja, tallo y flor, mostraron potencial inhibitorio contra dichas bacterias. Los extractos evaluados contienen potencial inhibitorio, y podrían emplearse para el desarrollo de agentes antibacterianos, aunque para esto, es necesario estudiar más a fondo los compuestos que posee *O. rosea* para lograr determinar que otra sustancia en particular realiza la función de inhibición.

Referencias

- Bello-González, M. Á., Hernández-Muñoz, S., Lara-Chávez, M. B. N., & Salgado-Garciglia, R. (2015). Plantas útiles de la comunidad indígena Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. Polibotánica, 39, 175–215.
- Bernal-Gallardo, J. O., Molina-Torres, J., Angoa-Pérez, M. V., Cárdenas-Valdovinos, J. G., García-Ruíz, I., Ceja-Díaz, J. A., & Mena-Violante, H. G. (2022). Phenolic compound content and the antioxidant and antimicrobial activity of wild blueberries (Vaccinium stenophyllum steud.) fruits extracts during ripening. Horticulturae, 8(1), 1–17. https://doi.org/10.3390/horticulturae8010015
- Cabrera Cao, Y., Fadragas Fernández, A., & Guerrero Guerrero, L. G. (2005). Antibióticos naturales. Mito o realidad. Cubana Med Gen Integr, 21, 3–4. https://docplayer.es/22368202-Antibioticos-naturales-mito-o-realidad.html
- Corzo Barragán, D. C. (2012). Evaluación de la actividad antimicrobiana del extracto etanólico. Medicina de Ciencias Farmacéuticas, 43(3), 81–86.
- Esquivel-García, R., Pérez-Calix, E., Ochoa-Zarzosa, A., & García-Pérez, M. E. (2018). Ethnomedicinal plants used for the treatment of dermatological affections on the Purépecha Plateau, Michoacán, Mexico. Acta Botanica Mexicana, 125, 95–132. https://doi.org/10.21829/abm125.2018.1339

Implementación de una aplicación web integrando E-publicidad para divulgación y concientización de las donaciones de sangre.

Nava Fombona Gabriel*, Vázquez Pantaleón Fco. Javier*, Cuellar Rodríguez Megan Brillith*
* Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas.

Resumen

La donación de sangre se considera que debe de ser un acto altruista y totalmente voluntario, sin embargo, es muy poco frecuente en la sociedad actual. Por tal motivo, se puso en marcha la ejecución de una investigación cuantitativa experimental para determinar el grado de influencia que conserva la incertidumbre como una de las razones principales por las que la población prefiere no donar. Tras la aplicación de instrumentos de recolección de datos y análisis de estos, con técnicas de estadística descriptiva, se obtuvo como resultado que la falta de información relacionada con las donaciones sanguíneas emerge como un factor determinante en la toma de decisión de la población respecto a la disposición para donar. Como recurso tecnológico para abordar la problemática de la escasez de información, se desarrolló una aplicación web dinámica integrando estrategias de E-Publicidad, obteniendo como resultado un decremento considerable en la tasa de incertidumbre.

Introducción

La donación de sangre es vital para la medicina transfusional, salvando millones de vidas al año. No obstante, la insuficiencia de información clara y accesible sobre este procedimiento genera incertidumbre entre la población, reduciendo el número de donantes voluntarios. Este estudio se enfoca en abordar la carencia de datos precisos sobre las donaciones sanguíneas y cómo esta falta de conocimiento afecta la disposición de las personas a participar.

La cuestión principal a investigar es la limitada información disponible para el público acerca de la donación de sangre. Tomando como variables; "**Información**", analizada en su dimensión '**conocimiento**', e "**Incertidumbre**" en su dimensión '**ignorancia**', permiten plantear la siguiente hipótesis central:

"*A partir de la implementación de una aplicación web dinámica que incluye un módulo de métricas de analítica digital de información, respaldada por estrategias de E-publicidad, se anticipa una reducción en la ignorancia resultante de la incertidumbre en torno a las donaciones sanguíneas*".

La importancia de este tema radica en su impacto directo en la salud pública. Mejorar la accesibilidad y calidad de la información sobre la donación de sangre puede mitigar la incertidumbre y aumentar la confianza de los posibles donantes.

Metodología

La presente investigación se llevó a cabo de acuerdo a las etapas de desarrollo de la **metodología cuantitativa**, con una población de estudio de 50 personas en un rango de edad de 18-65 años, de acuerdo al método de muestreo por conveniencia. Se aplicaron conceptos estadísticos para confirmar la viabilidad de las herramientas de recopilación de datos, conformadas por encuestas, las cuales contuvieron 10 ítems basados en escala de Likert para cada variable

En cuanto al desarrollo del software mencionado, se utilizó la **metodología de cascada**, obteniendo una arquitectura de sistema compuesta por 3 módulos, representados en la figura 1.

Variables	Dimensiones	Indicios	Items	Escala	Instrumento	Fuente
Información (VX) (Chiavenato et al., 2019, p.281).	Conocimiento "Sistematización de la información y su correcta aplicación para el beneficio humano" (Hernández L, 2021).	Social	1,2,3,4 ,5,6,7, 8,9,10	Likert Muy en desacuerdo (MD)=1 punto En desacuerdo (ED)=2 puntos Indeciso (ID)= 3 puntos De acuerdo (DA)= 4 puntos Muy de acuerdo (MA)= 5 puntos	Encuesta	La escala de Likert en la valoración de los conocimientos y las actitudes de los profesionales de enfermería en el cuidado de la salud.
Incertidumbre (VY) (Alfaro García, 2019).	Ignorancia "Ausencia de conocimiento" (Jones et al., 2023).	Desconocimiento	1,2,3,4 ,5,6,7, 8,9,10	Likert Muy en desacuerdo (MD)=1 punto En desacuerdo (ED)=2 puntos Indeciso (ID)= 3 puntos De acuerdo (DA)= 4 puntos Muy de acuerdo (MA)= 6 puntos	Encuesta	Actitudes: definición y medición componentes de actitud. Modelo de la acción razonada y acción planificada.

Tabla 1 Muestra las variables son sus ítems, dimensiones, indicadores, instrumentos y fuente-



Fig.2 Interfaz general y componentes principales de la aplicación web.

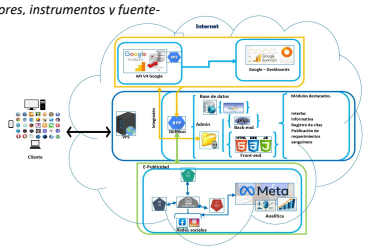


Fig.1 Arquitectura del sistema web: analítica digital, integración y e- publicidad.

La figura 2, muestra las funcionalidades principales del sistema web, la cual cuenta con dos roles de usuario que determinan los accesos a los distintos módulos de este.

Resultados

En el análisis de datos, se desarrollaron dos modelos estadísticos (**ME**), el primero, permite obtener datos cuantitativos del estado inicial del caso de estudio, mientras que el segundo corrobora el nivel de impacto de la herramienta tecnológica implementada.

La figura 7, representa los datos obtenidos a través de Google Analytics y las herramientas de e-publicidad, compuestas por anuncios, implementados mediante redes sociales, tales como Facebook e Instagram, evidenciando un incremento significativo en el nivel de interacción e información.

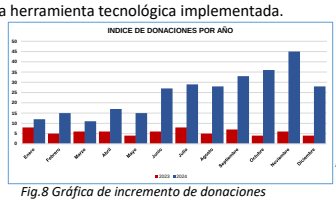


Fig.8 Gráfica de incremento de donaciones sanguíneas mensualmente durante 2024.

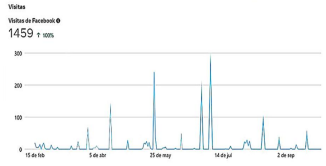


Fig.7 Gráfica de estadísticas del impacto de la E-publicidad.

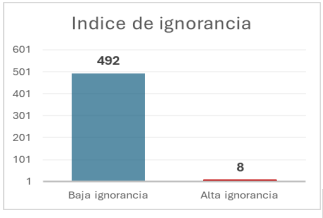


Fig. 5 Gráfica de nivel de ignorancia en la muestra, ME 2.

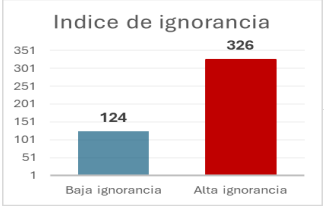


Fig. 6 Gráfica de nivel de ignorancia en la muestra, ME 1.

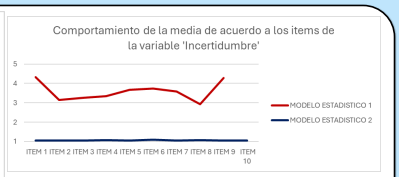


Fig.3 Gráfica de medias de la variable Y "incertidumbre".

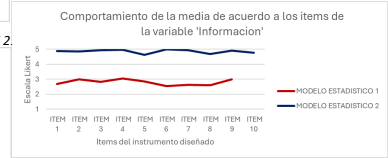


Fig.4 Gráfica de medias de la variable X "información".

La figura 8, refleja el resultado consecuente de la implementación del sistema como un incremento en la donación de sangre aproximada al 69% anualmente.

Referencias

- Ahmed Saad, A. (2019, abril 18). *Improving and Supporting Blood Donation Practices in Khartoum, Sudan Blood Banks through Android Mobile App and Web Application System*. 7(2),9. ARONI VASQUEZ, M. P., CALDAS QUEZADA, K. B., INGA CHAVEZ, L. A., & TORIBIO GOMEZ, F. E. (2022). *NIVEL DE CONOCIMIENTO DE LOS ESTUDIANTES DE PRIMER Y SEGUNDO AÑO DE TECNOLOGÍA MÉDICA SOBRE LOS REQUISITOS DE LA DONACIÓN DE SANGRE EN 2021 EN LIMA, PERÚ* [Licenciatura, Cayetano Heredia].
- Suárez Lindao, B. G., & Maggi Garcés, B. L. (2020). *Escala de Likert en el nivel de conocimiento de Diabetes Tipo 2 en la provincia de Santa Elena*. Repositorio Universidad Estatal Península de Santa Elena, *8*(1), 78–83.
- Gonzalez Perez, P. P., & Soto Galindo, I. (2023). *Modelado, arquitectura y comunicación en el desarrollo de sistemas de software: Un enfoque práctico* (UAM, Unidad Cuajimalpa, División de Ciencias Naturales e Ingeniería).
- Monje Álvarez, C. A. (2011). *Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa: Guía didáctica*. Universidad Surcolombiana.

Conclusiones

El análisis de los datos obtenidos permite sustentar que **la hipótesis planteada se cumple satisfactoriamente**, consiguiendo la reducción de la ignorancia en la población en porcentajes significativos basados en la interpretación cuantitativa de los resultados, con efectos positivos en la persuasión de la población, además de un incremento de aproximadamente **69%** en el índice donaciones por año.

Así mismo, conforme a la minoría de los antecedentes históricos presentados, y los resultados obtenidos, permiten respaldar que el enfoque tecnológico previamente analizado se posiciona como una alternativa competente en términos de innovación frente al tema de donación de sangre.

Nanoencapsulados a base de extractos antioxidantes de *Byrsonima crassifolia* como potencial efecto terapéutico contra el adenocarcinoma gástrico.

Brenda Montserrat González Vázquez[1]*, Marlon Rojas López*, María Eugenia Jaramillo Flores**, Minerva Rosas Morales*
* Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del Instituto Politécnico Nacional Unidad Tlaxcala.
** Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional

Resumen

El adenocarcinoma gástrico es una de las principales causas de muerte por cáncer en el mundo. *Byrsonima crassifolia* (nanche) contiene compuestos bioactivos con potencial antioxidante y antitumoral. Se evaluaron cuatro métodos de extracción a partir de hojas deshidratadas: etanol al 50 % y 80 %, maceración en agua (72 h) e infusión acuosa (4 h a 80 °C). Los extractos fueron liofilizados y analizados mediante pruebas colorimétricas (fenoles totales, flavonoides y DPPH). El mejor resultado se obtuvo con el extracto en etanol al 80 %, que presentó 21.98 % de fenoles totales y 12.89 % de flavonoides. La mayor capacidad antioxidante se registró con el extracto en etanol al 50 %, con un 63.45 % de inhibición DPPH. La nanoencapsulación se realizó mediante gelación iónica con quitosano y TPP, y la espectroscopía FTIR confirmó la nanoencapsulación con un pico característico a 1218 cm^{-1}. Estos resultados respaldan el potencial de *B. crassifolia* como agente complementario en terapias contra el cáncer gástrico, especialmente mediante sistemas nanoformulados que mejoran la estabilidad y liberación controlada de compuestos bioactivos.

Introducción

El adenocarcinoma gástrico suele diagnosticarse en etapas avanzadas, la eficacia de los tratamientos convencionales es limitada, lo que impulsa la búsqueda de estrategias terapéuticas complementarias. *Byrsonima crassifolia* es una planta nativa de América Latina, que ha sido utilizada tradicionalmente con fines medicinales. Estudios recientes han demostrado que sus hojas contienen compuestos fenólicos y flavonoides con propiedades antioxidantes y potencial actividad antitumoral. Sin embargo, la estabilidad de estos compuestos se ve comprometida bajo condiciones gastrointestinales, lo que limita su aplicación directa. La nanoencapsulación mediante gelación iónica permite proteger y liberar de forma controlada los compuestos bioactivos, representando una estrategia prometedora. Aunque existen antecedentes sobre la actividad biológica de *B. crassifolia*, su uso en sistemas nanoformulados para el tratamiento del cáncer gástrico ha sido poco explorado. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el potencial antioxidante de extractos de hojas de nanche y desarrollar formulaciones nanoencapsuladas con aplicaciones terapéuticas contra el adenocarcinoma gástrico.

Metodología

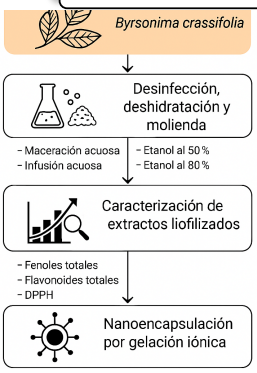


Figura 1. Metodología empleada. Se llevo a cabo un enfoque experimental de la siguiente manera: preparación vegetal y obtención de extractos mediante distintos métodos, análisis fitoquímico por pruebas colorimétricas, y nanoencapsulación del extracto que presento mejores resultados mediante gelación iónica con quitosano y TPP. Este proceso permitió evaluar la eficiencia de extracción, caracterizar los compuestos antioxidantes y formular sistemas nanoestructurados con posible aplicación terapéutica.

Resultados

Porcentaje compuestos antioxidantes extractos de *B. crassifolia*

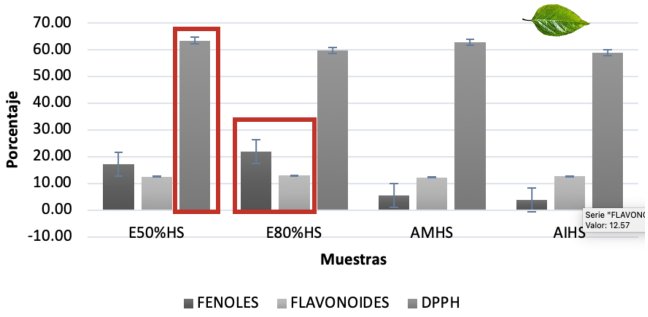


Figura 2. Contenido de compuestos fenólicos totales, flavonoides y capacidad antioxidante (DPPH) en extractos de hojas deshidratadas de *Byrsonima crassifolia* obtenidos por diferentes métodos de extracción. Se observa el mayor contenido de fenoles (21.98 %) y flavonoides (12.89 %) en el extracto con etanol al 80 %, mientras que la mayor inhibición de DPPH (63.45 %) se registró en el extracto con etanol al 50 %.

Espectro FTIR

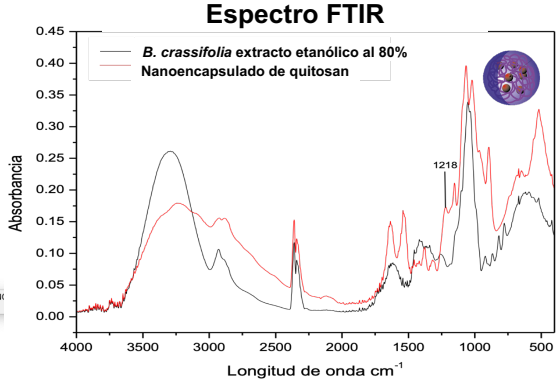


Figura 3. Espectros FTIR del extracto etanólico al 80 % de *Byrsonima crassifolia* y de su formulación nanoencapsulada con quitosano/TPP. En el extracto se identifican bandas características de compuestos fenólicos y flavonoides, como O–H (~3280 cm^{-1}), C=O (~1740 cm^{-1}) y C–O (~1046 cm^{-1}). En el nanoencapsulado, destaca una banda a 1218 cm^{-1} correspondiente a enlaces fosfato-amonio (P=O), indicando la interacción entre el extracto y la matriz polimérica, y confirmando la formación exitosa de nanopartículas por gelación iónica.

Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que los extractos de *Byrsonima crassifolia*, particularmente el obtenido con etanol al 80 %, poseen un alto contenido de compuestos fenólicos (21.98 %) y flavonoides (12.89 %), los cuales están relacionados con efectos antioxidantes y potenciales propiedades antitumorales. Por otro lado, el extracto con etanol al 50 % presentó la mayor capacidad de inhibición de radicales libres (63.45 % DPPH), lo cual evidencia que la eficiencia de extracción varía según el solvente y condiciones aplicadas. La nanoencapsulación mediante gelación iónica utilizando quitosano y TPP resultó exitosa, como lo indica el pico característico a 1218 cm^{-1} en el análisis por FTIR, lo que sugiere una adecuada incorporación de los compuestos bioactivos en la matriz polimérica. Estos hallazgos respaldan el uso potencial de *B. crassifolia* como una fuente natural de compuestos funcionales con aplicación terapéutica, especialmente cuando son formulados en sistemas nanoestructurados dirigidos al tratamiento complementario del adenocarcinoma gástrico.

Referencias

1. Espinoza Rodriguez, A. R., & Ricanqui Jimenez, E. S. (2022). Nanoencapsulación por gelificación iónica de polifenoles a partir de hojas de beterraga (Beta vulgaris L.) asistidas por ultrasonido.

2. López, E., Navarro, A., Manchón, N., & Herrera, J. (2014). Componentes funcionales en Nanche (Byrsonima crassifolia (L) Kunth). Ciencias Agropecuarias, Handbook. Valle de Santiago, ECORFAN, 6-22.

3. Milanezi, F. G., Meireles, L. M., de Christo Scherer, M. M., de Oliveira, J. P., da Silva, A. R., de Araujo, M. L., ... & Scherer, R. (2019). Antioxidant, antimicrobial and cytotoxic activities of gold nanoparticles capped with quercetin. Saudi pharmaceutical journal, 27(7), 968-974.

4. Miki, K. S. L., Dresch, A. P., Cavali, M., da Silva, A. P., Marafon, F., Fogolari, O., ... & Bender, J. P. (2024). Influence of drying methods in the ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from Byrsonima crassifolia to evaluate their potential antitumor activity. Food and Humanity, 2, 100242.

5. Santucci, C., Malvezzi, M., Levi, F., Camargo, M. C., Boffetta, P., La Vecchia, C., & Negri, E. (2023). Cancer mortality predictions for 2023 in Latin America with focus on stomach cancer. European Journal of Cancer Prevention, 32(4), 310-321.

Nanoencapsulación de extractos de café (*Coffea arabica L.*) para la inhibición del crecimiento bacteriano de *Pseudomonas aeruginosa*.

M.C. Jessica Andrea Hernández Celis*, Dr. Marlon Rojas López*, Dra. Rocío Pérez y Terrón**, Dra. Leslie Susana Arcila Lozano*.
* Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada Unidad Tlaxcala, CIBA-IPN.
** Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

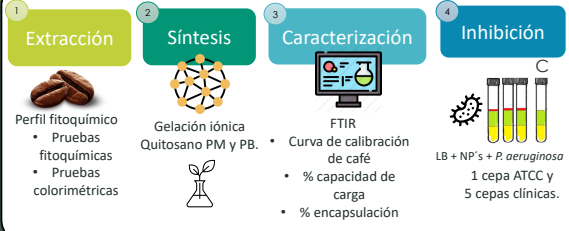
Resumen

La resistencia a antimicrobianos es un problema mundial de salud pública, la OMS creó una lista de urgencia donde se encuentra *P. aeruginosa*. En el presente trabajo se utilizaron las propiedades del extracto de café, que tiene una gran cantidad de compuestos como: ácido clorogénico, cafeína y ácido cafeico. Se buscó formar una sinergia entre la nanoencapsulación y el extracto, probando dos pesos de quitosano (medio y bajo), posteriormente se caracterizaron los nanoencapsulados con espectroscopía FTIR, se elaboró una curva de calibración del extracto, para calcular el porcentaje de encapsulación y de carga, se determinó el nanoencapsulado óptimo con una concentración de 9mg/mL de extracto de café. Finalmente se realizaron las pruebas y validaciones necesarias para evaluar la capacidad de los nanoencapsulados para inhibir el crecimiento de *P. aeruginosa* mediante turbidimetría, donde se observó una inhibición del crecimiento de hasta el 99% utilizando nanoencapsulados de peso molecular bajo y de 95% utilizando nanoencapsulados de peso molecular medio.

Introducción

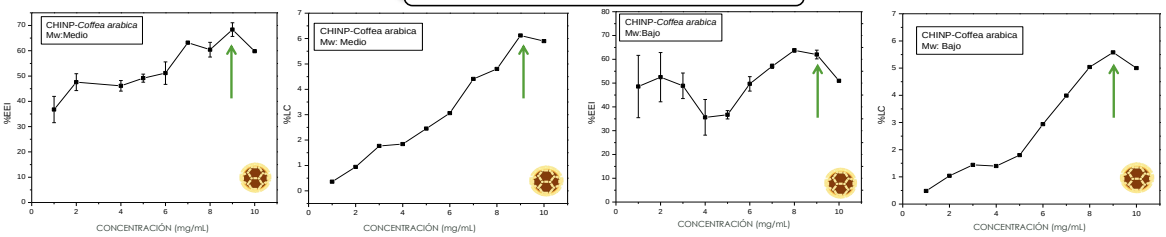
P. aeruginosa es una bacteria con cepas MDR y PDR, actualmente representa un problema hospitalario de salud pública a nivel mundial, debido a la gran cantidad de mecanismos de resistencia que tiene contra antibióticos [1], afectando el tratamiento hospitalario y ambulatorio con el aumento de las tasas de mortalidad y morbilidad[2]. El extracto de café posee una gran cantidad de compuestos fitoquímicos (ácido clorogénico, ácido cafeico, cafeína, entre otros), de los cuales se ha reportado su actividad antioxidante y antimicrobiana [3]. El quitosano es un biopolímero utilizado en diferentes áreas, es un material biocompatible, bioadhesivo y tiene actividad antimicrobiana, dichas propiedades propician su uso como agente encapsulante y a su vez como vehículo de sustancias [4].

Metodología



Resultados

CHINPC-PM y CHINPC-PB



Perfil fitoquímico

Contenido fenólico total: ALTO	Contenido flavonoides total: ALTO
FRAP: capacidad antioxidante ALTA	DPPH: % de inhibición del radical: 57.23

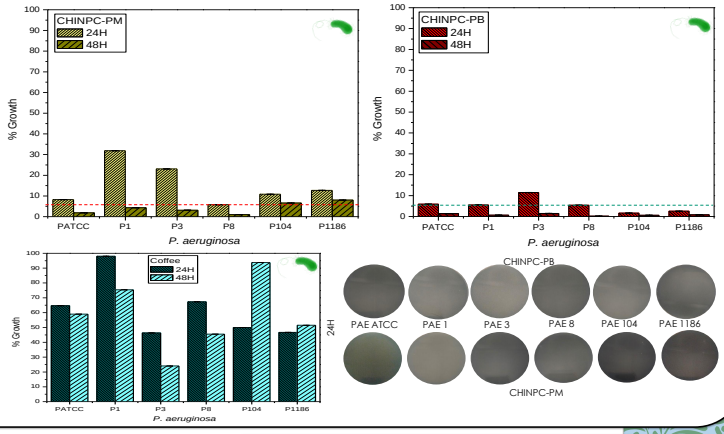
Presencia de : Esteroides, quinonas, flavonas, alcaloides, fenoles, insaturaciones, cumarinas y antocianinas

Perfil de resistencia a antibióticos

Antibiótico	HALO DE INHIBICION (mm)											
	PAE ATCC		PAE 1		PAE 3		PAE 8		PAE 104		PAE 1186	
Amikacina (AK)	20	22	24	24	22	22	12	14	10	12	16	20
Ampicilina (AM)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbenicilina (CB)	12	12	24	24	20	24	10	10	0	0	0	0
Cefalotina (CF)	0	0	26	26	22	24	0	0	0	0	0	0
cefotaxima (CFX)	16	14	30	32	28	30	14	18	0	0	0	0
Ciprofloxacino (CPF)	36	34	32	34	30	28	13	15	0	13	12	14
Cloranfenicol (CL)	0	0	20	20	21	20	0	0	18	16	0	0
Gentaminicina (GE)	19	24	22	24	22	24	0	0	10	13	20	23
Netilmicina (NET)	10	10	28	28	24	28	14	16	10	12	12	13
Nitrofurantoina (NF)	0	0	24	24	17	20	0	0	0	0	0	0
Norfloxacino (NOF)	28	28	24	24	20	22	30	32	0	0	0	0
Sulfametoxazol/ Trimetoprim (STX)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

*rojo: resistente, amarillo: intermedia, verde: sensible

Pruebas de Inhibición



Conclusiones

- Los resultados nos permiten observar el amplio potencial que contienen las nanocapsulas de quitosano en conjunto con el extracto de café, abriendo paso al desarrollo de nuevas terapias y metodologías para el tratamiento de enfermedades infecciosas ocasionadas por superbacterias.
- También se observó que en las pruebas de inhibición que se realizaron, hay una mayor inhibición del crecimiento de las cepas en presencia de nuestros tratamientos con nanoencapsulados que en presencia solo del extracto de café, concluyendo que los nanoencapsulados forman una sinergia con el extracto lo cual permite incrementar sus propiedades antimicrobianas.
- Como perspectivas futuras de este trabajo se propone comprobar la citotoxicidad en líneas celulares, además de probar con diferentes tipos de bacterias.

Referencias

1. Langendonk, R. F., Neill, D. R., & Fothergill, J. L. (2021). The building blocks of antimicrobial resistance in pseudomonas aeruginosa: implications for current resistance-breaking therapies. Front. Cell. Infect. Microbiol. 11. https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.665759
2. World Health Organization. (2017). WHO Publishes List of Bacteria for which New Antibiotics are Urgently Needed. World Health Organization https://www.who.int/news/item/ 27-02-2017-who-publishes-list-of-bacteria-for-which-new-antibiotics-are-urgently needed
3. Bikiaris, N.D., Michailidou, G., Lazaridou, M., Christodoulou, E., Gounari, E., Ofrydopoulou, A., Lambropoulou, D.A., Vergkizi-Nikolakaki, S., Lykidou, S. and Nikolaidis, N. (2020). Innovative skin product emulsions with Enhanced antioxidant, antimicrobial and UV protection properties containing with encapsulated fresh pomegranate juice. Polymers. 12:1542.
4. Khochapong, W., Ketnawa, S., Ogawa, Y. and Punbusayakul, N. (2021). Effect of in vitro digestion on bioactive compounds, antioxidant and antimicrobial activities of coffee (Coffea arabica L.) Pulp aqueous extract. Food Chemistry. 348:129094. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129094

Desarrollo de fármaco hipoglucemiante que regule a la enzima tirosina fosfatasa 1B (PTP1B), y su posible impacto en la regulación de la señalización del receptor de insulina.

Ana Brenda Ortega Morales * y Jose Luis Vique Sanchez.*
* Facultad de Medicina Mexicali, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, C.P. 21000, México.

Resumen

El aumento de la prevalencia de la diabetes mellitus demuestra la necesidad de buscar nuevos fármacos para su tratamiento. Para lo anterior, se ha estudiado a la proteína tirosina fosfatasa 1B (PTP1B), para proponerla como un potencial blanco terapéutico para atender la diabetes; ya que sus funciones y sustratos están implicados en diferentes procesos celulares; como en la homeostasis de la glucosa regulada por la señalización del receptor de insulina, disminución de la ingesta de alimentos, aumento del gasto energético, proliferación celular, entre otros.
En este estudio se propone el desarrollo de un fármaco hipoglucemiante contra la PTP1B como blanco terapéutico, mediante ensayos in silico e in vitro que muestren resultados prometedores para este nuevo fármaco.

Introducción

El aumento de la prevalencia de la diabetes mellitus demuestra la necesidad de buscar nuevos fármacos para su tratamiento. Para lo anterior, se ha estudiado a la proteína tirosina fosfatasa 1B (PTP1B), para proponerla como un potencial blanco terapéutico para atender la diabetes (Téllez-Valencia et al., 2023); ya que sus funciones y sustratos están implicados en diferentes procesos celulares; como en la homeostasis de la glucosa regulada por la señalización del receptor de insulina (Fig. 1), disminución de la ingesta de alimentos, aumento del gasto energético, proliferación celular, entre otros (Bourebaba et al., 2020).

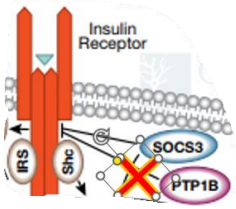


Figura 1. Señalización del receptor de insulina y la regulación de la PTP1B.

Metodología

Mediante acoplamiento molecular (docking molecular) se determinaron las interacciones entre ligando-receptor propuestos (Vique-Sánchez, 2021). Se utilizó la estructura del compuesto PT2 (Téllez-Valencia et al., 2023), la estructura cristalográfica de la PTP1B (PDB:5T19), y el sitio potencial reportado (Tyr46, Asp181 y Gln262 en la PTP1B) (Fig. 2), para determinar las principales interacciones y relacionar el posible efecto inhibitorio de este compuesto.
Así como se determinó el efecto del compuesto PT2 en el consumo de glucosa en cultivos in vitro. Se utilizaron células C9, el compuesto PT2 a 50 y 100 µM y el Sigma Cat#: MAK083; se utilizaron placas de 96 pozos, en donde se realizaron incubaciones del compuesto PT2 y las células C9 (15,000 células por pozo) durante 48 h, después se utilizo el kit de ensayo colorimétrico de captación de glucosa de Sigma Cat#: MAK083. La captación de glucosa intracelular se determinó siguiendo el protocolo del kit de captación de glucosa (Sigma Cat#: MAK083), los ensayos se realizaron por triplicado.

Resultados

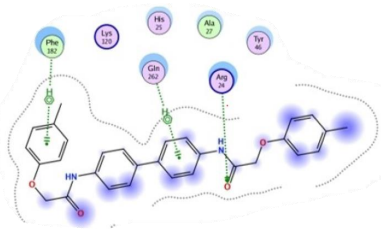


Figura 2. Aminoácidos en el sitio activo en la PTP1B y el compuesto PT2.

Los resultados demostraron que el compuesto PT2 tiene un alto potencial de ser selectivo a la PTP1B, siguiendo la metodología reportada (Rivera-Suárez et al., 2025), hemos obtenido resultados similares al sitio de interacción alrededor de Gln262 (Fig. 2), determinado una probable interacción con la PTP1B mejora el consumo de glucosa que determinamos, entre 8 a 15 %, dependiendo la concentración del compuesto utilizado (Fig. 3). Este resultado se relaciona a los resultados de inhibición enzimática con la proteína recombinante de la PTP1B, con una IC50 de 9 µM (Téllez-Valencia et al., 2023), y que esto podría generar un incremento en la señalización del receptor de insulina en cultivos celulares.

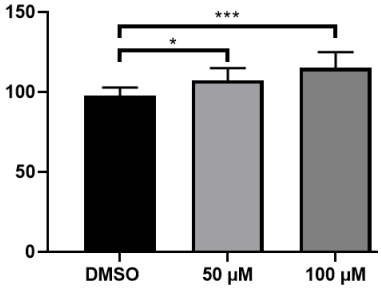


Figura 3. Resultados en el consumo de glucosa después de 48 h de incubación con el compuesto PT2 (50 y 100 µM)

Conclusiones

Mediante el docking (acoplamiento molecular) y los ensayos in vitro, se ha propuesto que el compuesto PT2 realiza interacciones especificas cerca del sitio activo (Gln262) de la PTP1B, estas interacciones podrían ser responsables de su capacidad de inhibición y generar un mayor consumo de glucosa al mejorar la señalización del receptor de insulina (Fig. 3). Por lo tanto, el compuesto PT2 puede ser un nuevo y prometedor fármaco coadyuvante contra la diabetes o enfermedades relacionadas a la PTP1B.

Referencias

Bourebaba, L., Łyczko, J., Alicka, M., Bourebaba, N., Szumny, A., Fal, A. & Marycz, K. (2020). Inhibition of Protein-Tyrosine Phosphatase PTP1B and LMPTP Promotes Palmitate/Oleate-Challenged HepG2 Cell Survival by Reducing Lipoapoptosis, Improving Mitochondrial Dynamics and Mitigating Oxidative and Endoplasmic Reticulum Stress. Journal of Clinical Medicine, 9(5), 1294. https://doi.org/10.3390/jcm9051294
Rivera-Suárez, B. A., García González, V. G., Chimal-Vega, B., Navarro Padrón, A. C., Galindo-Hernández, O. & Vique-Sánchez, J. L. (2025). Potential Ligands to Resistin Against Prostate Cancer, Evaluated by Molecular Docking and In Vitro Assays to Develop an Anticancer Drug. Chemistry & Biodiversity. https://doi.org/10.1002/cbdv.202500189
Téllez-Valencia, A., Hernández-Ortiz, I., Guadalupe López Lujano, P. & Luis Vique-Sánchez, J. (2023). Development of Tyrosine Phosphatase 1B Inhibitors Based on Molecular Docking, Kinetics, and Toxicity Studies. ChemistrySelect, 8(23). https://doi.org/10.1002/slct.202300549
Vique-Sánchez, J. L. (2021). Potential inhibitors interacting in Neuropilin-1 to develop an adjuvant drug against COVID-19, by molecular docking. Bioorganic & Medicinal Chemistry, 33, 116040. https://doi.org/10.1016/j.bmc.2021.116040

Propuesta de Diseño de una Plantilla Instrumentada para la Detección Temprana de Pie Diabético

J. A. Rodríguez Cabello *, C. Morales Morales*, A. González Lorence*, M. Castro Bello*

* Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, C. P. 76800, San Juan del Río, Querétaro, México.

Introducción

El pie diabético es una de las complicaciones más frecuentes y graves en personas con diabetes mellitus, resultado de una combinación de neuropatía periférica, mala circulación y deformidades en los pies. Estas condiciones favorecen la aparición de zonas de presión anormal durante la marcha o la bipedestación prolongada, lo que puede derivar en la formación de úlceras plantares. Dado que muchos pacientes pierden la sensibilidad en los pies, estas lesiones suelen pasar desapercibidas hasta alcanzar etapas avanzadas, incrementando el riesgo de infecciones y amputaciones.



Figura 1. Clasificación de Wagner para los grados de afectación del pie diabético. (Federación Mexicana de Diabetes, 2024)

Planteamiento del Problema

Una de las complicaciones más presentadas al padecer diabetes es la Neuropatía Diabética (ND), esta causa dolor y perdida de sensibilidad en las extremidades (Organización Mundial de la Salud, 2019). Según Jiang, et al. (2022) esta afección se presenta en el 50% de los pacientes. Debido a esto el pie diabético representa la tercera causa de hospitalización por complicaciones, con alto riesgo de amputación o muerte (ISSSTE, 2023). Aunque ya se han creado sistemas para prevenir úlceras en pacientes con diabetes con base en la presión plantar y la marcha, los estudios reflejan una brecha significativa en su efectividad, precisión y costo, lo que resalta la necesidad de mejorar estos dispositivos.

Propuesta de solución

Se propone una plantilla inteligente para el **monitoreo dinámico de presión plantar**, enfocada en la prevención del pie diabético. Las **zonas críticas** con mayor riesgo de úlceras según la literatura son: el Hallux, metatarsianos y talón (Figura 2a).

La plantilla estará compuesta por **cuero sintético, EVA y licra** para brindar **comodidad y ajuste ergonómico**, como lo sugiere Tang et al., 2023 (Figura 2b).

Se utilizarán transductores **piezoeléctricos y resistivos** (Figura 3) por su **durabilidad, tamaño reducido, bajo costo y capacidad para medir fuerzas dinámicas** (Khandakar et al., 2022).

El prototipo incluirá 8 sensores distribuidos estratégicamente, buscando **bajo costo, alta durabilidad y sentar una base funcional** para sistemas de detección temprana del riesgo de pie diabético.

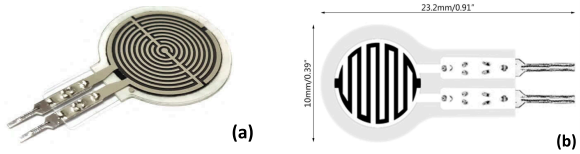


Figura 3. (a) Transductor resistivo FSR402. (b) Transductor piezoelectrico de PVDF

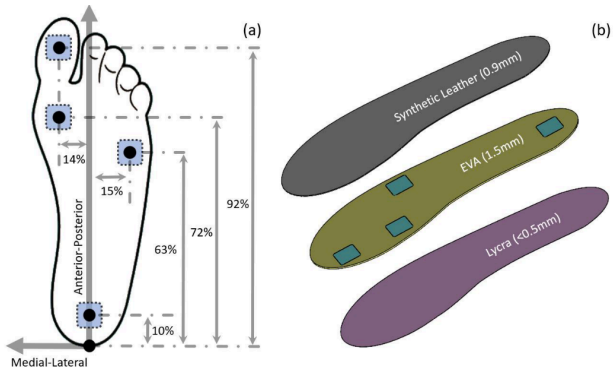


Figura 2. (a) distribución de los sensores. (b) Construcción de la plantilla. (Tang et al., 2023)

Alcances

La plantilla integrará sensores comerciales colocados en zonas de interés biomecánico previamente identificadas en la literatura, se fabricará con un ortopedista especializado para garantizar una correcta adaptación anatómica y funcional. Se contempla la caracterización física y electrónica de la plantilla, evaluando su respuesta ante distintas condiciones de carga plantar para asegurar la calidad de los datos recolectados.

Este desarrollo busca sentar las bases para una solución portátil, inteligente y accesible que facilite el monitoreo preventivo del pie diabético, contribuyendo a mejorar la calidad de vida de pacientes y reducir la incidencia de complicaciones graves.

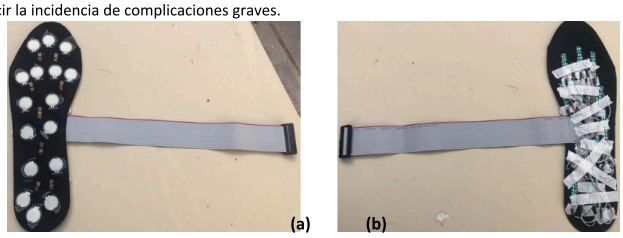


Figura 4. Plantilla instrumentada (a) vista superior. (b) vista inferior. (Khandakar et al., 2022)

Referencias

- Federación Mexicana de Diabetes. (2024). Grados de lesion del pie diabético. https://fmdiabetes.org/grados-de-lesion-del-pie-diabetico/
- ISSSTE. (2023). Pie diabético, una de las complicaciones más temidas de esta enfermedad. https://www.gob.mx/issste/prensa/pie-diabetico-una-de-las-complicaciones-mas-temidas-de-esta-enfermedad-issste
- Jiang, X., Deng, F., Rui, S., Ma, Y., Wang, M., Deng, B., Wang, H., Du, C., Chen, B., Yang, X., Boey, J., Armstrong, D. G., Deng, W., & Duan, X. (2022). The Evaluation of Gait and Balance for Patients with Early Diabetic Peripheral Neuropathy: A Cross-Sectional Study. Risk Management and Healthcare Policy, 15(March), 543–552. https://doi.org/10.2147/RMHP.S361698
- Organización Mundial de la Salud. (2023). Diabetes. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/diabetes
- Khandakar, A., Mahmud, S., Chowdhury, M. E. H., Reaz, M. B. I., Kiranyaz, S., Mahbub, Z. Bin, Md Ali, S. H., Bakar, A. A. A., Ayari, M. A., Alhatou, M., Abdul-Moniem, M., & Faisal, M. A. A. (2022). Design and Implementation of a Smart Insole System to Measure Plantar Pressure and Temperature. Sensors, 22(19). https://doi.org/10.3390/S22197599
- Tang, J., Bader, D. L., Moser, D., Parker, D. J., Forghany, S., Nester, C. J., & Jiang, L. (2023). A Wearable Insole System to Measure Plantar Pressure and Shear for People with Diabetes. Sensors, 23(6), 3126. https://doi.org/10.3390/s23063126

ISBN: En trámite

Desarrollo de fármaco regulador de la hormona resistina, y su posible efecto en enfermedades crónicas.

Kendry Callejas Camargo *, Ana Brenda Ortega Morales * y Jose Luis Vique Sanchez.*
* Facultad de Medicina Mexicali, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, C.P. 21000, México.

Resumen

Los problemas sociales y la pandemia han hecho que los problemas relacionados a la nutrición de la población sean más notorios, en donde el sobrepeso y la obesidad contribuyen en el desarrollo de enfermedades crónicas, lo que hace necesario incrementar los esfuerzos para reducir estos factores de riesgo que generan condiciones de riesgo, como el aumento de tejido adiposo, y con esto una mayor liberación de adipocinas, así como un aumento de citocinas proinflamatorias; y esto contribuye a generar factores que promueven el aumento del peso corporal, contribuir en el desarrollo de enfermedades crónico-degenerativas e incluso en contribuir en el desarrollo de algunos tipos de cáncer. Por lo que necesario el desarrollo de fármacos que puedan regular a estas adipocinas; como lo es la resistina, la cual es utilizada en este proyecto como blanco terapéutico para desarrollar un nuevo fármaco, el cual presenta avances in silico e in vitro.

Introducción

Actualmente, los problemas sociales y la pandemia han hecho que los problemas relacionados a la nutrición de la población sean más notorios, por lo que se podría proponer que con controlar y mejorar el peso corporal se podrían evitar varias enfermedades. Pero es claro que los problemas de sobrepeso y obesidad continuarán durante esta década, lo que hace necesario incrementar los esfuerzos para reducir estos factores de riesgo que generan condiciones de riesgo, como el aumento de tejido adiposo, y con esto una mayor liberación de adipocinas, así como un aumento de citocinas proinflamatorias; lo anterior contribuye a generar factores que promueven el aumento de secreción de la hormona resistina, una adipocina relacionada a incrementar el peso corporal, contribuir en el desarrollo de enfermedades crónico-degenerativas, promover desarrollo el de varios tipos de cáncer, entre otras (Chi & Vargas, 2020).

Este proyecto tiene el objetivo de proponer el desarrollo de un fármaco regulador de la resistina; para evaluar el efecto en los mensajeros relacionas a las funciones de la resistina, y su posible uso terapéutico.

Metodología

Mediante acoplamiento molecular (docking molecular) se determinaron las interacciones entre ligando-receptor propuestos (Vique-Sánchez, 2021). Se utilizo una quimioteca de más 500,000 compuestos y la estructura cristalográfica de la Resistina (PDB:1RGX), posteriormente el docking se realizo en toda la superficie de la resistina (Fig. 1), para determinar los mejores compuestos por sus principales interacciones. Posteriormente se seleccionaron los mejores 10 compuestos (llamados R1-R10) y se probó la interacción con el kit Elisa de resistina recombinante de RayBiotech (EIA-RES-1).

A continuación, de los mejores compuestos se realizaron cultivos in vitro de células PC3 (cáncer de próstata), y se incubaron 24 h con una concentración de 50 µM de cada compuesto, después de las 24 h, se realizo la determinación por ensayos de western blot (WB) de las proteínas IL-8 y P53.

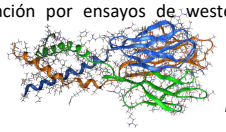


Figura 1. Estructura de la resistina utilizada para realizar el docking, se muestra el trímero reportado.

Resultados

Los resultados demostraron que el compuesto R6 tiene una mayor interacción con la resistina recombinante, disminuyendo la interacción con el anticuerpo de resistina (Fig. 2) (Rivera-Suárez et al., 2025). Posteriormente evaluamos la expresión de IL-8 y P53 mediante WB, estas dos proteínas relacionadas a la proliferación de cáncer de próstata (Fig. 3) (Chen et al., 2012). Estos resultados una regulación de estas dos proteínas, que muestra resultados prometedores para continuar este desarrollo, en donde se podría disminuir las funciones que tiene esta hormona, cabe destacar el efecto del compuesto R6 (Fig. 4).

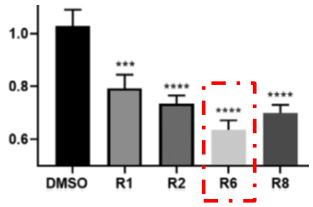


Figura 2. Resultados de la interacción entre la resistina recombinante y el anticuerpo. Se muestran los resultados para el control (dimetilsulfóxido [DMSO]) y los compuestos R1, R2, R6 y R8.

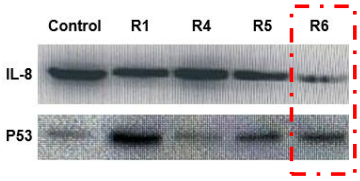


Figura 3. Resultados de ensayos de WB, se muestra la expresión de IL-8 y P53 después de 24 h de incubación con los compuestos R1, R2, R3 y R6 a 50 µM.

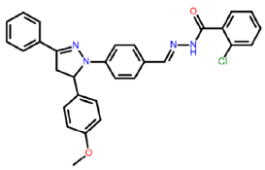


Figura 4. Estructura química del compuesto R6.

Conclusiones

Se seleccionaron compuestos que probablemente son selectivos con la hormona resistina, estos resultados mediante el docking (acoplamiento molecular) y validados mediante ensayos in vitro. Nuestros resultados son prometedores, ya que se determina una relación entre la probable afinidad determinada por el docking, y el efecto in vitro determinado.

Entre los compuestos seleccionados destaca el compuesto R6, que disminuye la expresión de la IL-8 y aumenta la expresión de la P53, estos cambios se podrían relacionar a una disminución en las principales funciones conocidas de la resistina, y proponer un mejor pronostico para las personas que tengan aumentados los niveles de resistina.

Por lo tanto, proponemos la continuación de este compuesto como un fármaco contra la resistina, para tener una opción terapéutica para atender las enfermedades donde la resistina tiene funciones.

Referencias

Chen, H., Sun, Y., Wu, C., Magyar, C. E., Li, X., Cheng, L., Yao, J. L., Shen, S., Osunkoya, A. O., Liang, C., & Huang, J. (2012). Pathogenesis of prostatic small cell carcinoma involves the inactivation of the P53 pathway. Endocrine-related cancer, 19(3), 321–331. https://doi.org/10.1530/ERC-11-0368

Chi, L. A. & Vargas, M. C. (2020). In silico design of peptides as potential ligands to resistin. Journal of Molecular Modeling, 26(5), 101. https://doi.org/10.1007/s00894-020-4338-3

Rivera-Suárez, B. A., García González, V. G., Chimal-Vega, B., Navarro Padrón, A. C., Galindo-Hernández, O. & Vique-Sánchez, J. L. (2025). Potential Ligands to Resistin Against Prostate Cancer, Evaluated by Molecular Docking and In Vitro Assays to Develop an Anticancer Drug. Chemistry & Biodiversity. https://doi.org/10.1002/cbdv.202500189

Vique-Sánchez, J. L. (2021). Potential inhibitors interacting in Neuropilin-1 to develop an adjuvant drug against COVID-19, by molecular docking. Bioorganic & Medicinal Chemistry, 33, 116040. https://doi.org/10.1016/j.bmc.2021.116040

CADENA DE SUMINISTRO EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE MIEL

Emily Bibiano Bartolo*, Cornelio Morales Morales**, Mirna Castro Bello*, Miguel Ángel Bueno Pólito*
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chilpancingo*
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Juan del Río**

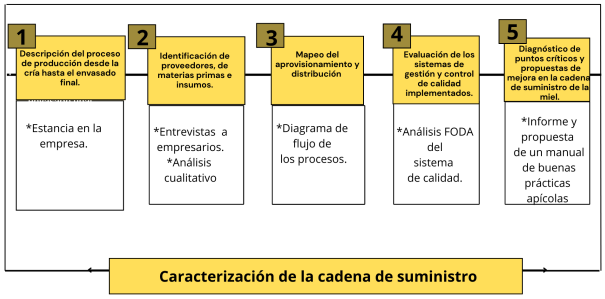
Resumen

La importancia de la apicultura es fundamental para la conservación ambiental y la economía local, siendo la miel de abeja el producto primario de esta actividad. Esta investigación tiene como objetivo caracterizar la cadena de suministro en el proceso de producción de la miel Tlally de la empresa Miel Tierra Grande. Con una metodología de cinco etapas: 1. Descripción del proceso de producción desde la cría hasta el envasado final; 2. Análisis de los proveedores de materias primas e insumos; 3. Mapeo del aprovisionamiento y distribución; 4. Evaluación de sistemas de gestión y control de calidad implementados; 5. Diagnóstico de puntos críticos y propuestas de mejoras en la cadena de suministro de la miel. Los resultados a obtener serán el proceso de producción, identificación de los proveedores y la caracterización de la cadena de suministro. Para posibles mejoras en cada uno de los eslabones y actores involucrados de la empresa.

Introducción

La apicultura es una actividad agropecuaria fundamental para la conservación ambiental y la economía rural. La miel de abeja, producto central de esta actividad, requiere de una cadena de suministro estructurada que garantice calidad, trazabilidad y sostenibilidad desde la producción hasta su comercialización. Esta cadena involucra diversos actores, como proveedores de insumos apícolas, apicultores, centros de acopio, procesadoras, distribuidores y consumidores (Gómez et al., 2024). Sin embargo, en contextos locales, la cadena de suministro presenta debilidades, tales como deficiente trazabilidad, falta de estandarización en los procesos y limitada adopción tecnológica de acuerdo con algunos autores como (Tantarico Inga, 2023). Este estudio propone caracterización de la cadena de suministro de la miel Tally en la empresa Miel Tierra Grande, identificando cada uno de los actores involucrados, los flujos de materiales e información. Llevándose a cabo por medio de visitas guiadas, análisis y revisión documental, recolección de la información, análisis de los proveedores de materias primas e insumos, mapeo del proceso, evaluación y el diagnóstico para mejoras. Los resultados esperados serán el proceso de producción, identificación de los proveedores y la caracterización de la cadena de suministro. Para posibles mejoras en cada uno de los eslabones y actores involucrados de la empresa.

Metodología



Objetivo General

- Caracterizar la cadena de suministro en el proceso de producción de la miel Tlally en la empresa Miel Tierra Grande, Guerrero, México.

Resultados

- Descripción del proceso de producción
- Caracterización del análisis de los proveedores de cada proceso de producción de materia prima e insumos.
- Mapeo del proceso de abastecimiento y distribución.
- Evaluación de los sistemas de gestión y control de calidad.
- Cadena de suministro en la empresa Miel Tierra Grande.

Conclusiones

La caracterización de la cadena de suministro de la empresa Miel Tierra Grande es importante para poder identificar puntos críticos en cada uno de sus eslabones, una mejor gestión dentro de sus procesos de producción y así poder aumentar su productividad. Beneficiando a la empresa, haciéndola más competitiva y eficiente.

Además, se analiza cada etapa de los procesos de producción, materiales y equipos de la cadena de suministro, a diferencia de otros estudios que solo desarrollan la influencia de las características socioculturales en la competitividad de la empresa rural Miel Tierra Grande.

En consecuencia, es importante realizar este tipo de investigaciones, debido a que la apicultura representa una actividad estratégica con impacto económico y ambiental significativo, generando empleos y productos de alto valor agregado, desempeñando un papel esencial en la conservación del medio ambiente, la polinización de cultivos y el incremento del valor agregado en la región.

Referencias

1. Gómez, T. P. S., Cáceres, R. G. G., & Castillo, P. M. M. (2024). Caracterización de la cadena de suministro de las plantas aromáticas. Revista Ingenierías USBMed, 15(2), 1.
2. Tantarico Inga, F. (2023). Diseño de un plan HACCP en el proceso productivo de miel de abeja (Apis mellifera) de la empresa Perú Miel EIRL.

Sistema de control de CO_2 utilizando PLC FX3U-56MR

Barojas-Vázquez, José Alonso*, Malagón-González, Fernando*,Núñez-Dorantes, Juan Carlos*,
Rodríguez-Jarquín, José Pastor**
*Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz
**Tecnológico Nacional de México, Campus Orizaba

Resumen

La automatización en la agricultura permite optimizar procesos como el control de CO_2 en invernaderos y biorreactores, mejorando la eficiencia y productividad. En este trabajo, se desarrolló e implementó un sistema automatizado para el control de dióxido de carbono en espacios controlados, utilizando un PLC Mitsubishi FX3U-56MR y una interfaz HMI Kinco GLO70E. El sistema integró sensores de CO_2 y válvulas solenoides, fue operado mediante el protocolo MODBUS RTU RS-485. Para validar su funcionamiento, se realizaron pruebas en mezcladores configurados a 500, 800 y 1200 ppm de CO_2 durante tres jornadas. Los resultados mostraron un control estable en concentraciones bajas, especialmente a 500 ppm, donde no se registraron picos anómalos. A 800 ppm, el sistema mejoró su estabilidad tras la primera jornada, y a 1200 ppm, aunque se presentaron más fluctuaciones, se observó una tendencia positiva hacia la precisión. Este enfoque permite un control inteligente y dinámico de las condiciones del invernadero, ajustándose rápidamente a las necesidades del cultivo en cada etapa de desarrollo. La integración de tecnologías avanzadas en la agricultura está transformando la manera en que producimos alimentos, haciéndolo más eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

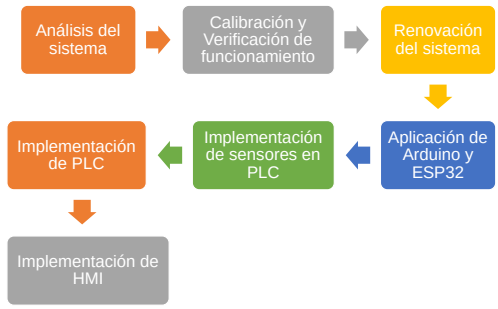
Palabras clave: Automatización, Inyección de CO_2, Biorreactores, Sensores

Introducción

La optimización de procesos agrícolas es un reto constante para mejorar la eficiencia y productividad. En este contexto, la automatización en la inyección de dióxido de carbono (CO_2) y oxígeno en biorreactores e invernaderos se presenta como una solución innovadora. Empresas como Hilsea Investments LTD han desarrollado sistemas que ajustan automáticamente la concentración de CO_2 mediante sensores y controladores electrónicos, logrando un crecimiento acelerado y de mayor calidad en cultivos como la lechuga y el tomate (Toledo, 2001; Hurtado, 2023). Existen dos sistemas diseñados para controlar la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) en un grupo de mezcladores, asegurando así una dosificación precisa para los biorreactores. El primer sistema se encarga de regular la mezcla en tres mezcladores de manera simultánea, mientras que el segundo sistema gestiona únicamente uno. Ambos sistemas automatizan el proceso de traslado de la mezcla hacia los biorreactores, garantizando condiciones óptimas para el crecimiento y la actividad biológica dentro de estos. La gestión eficiente de CO_2 es crucial en estos procesos, ya que influye directamente en la calidad y productividad de los cultivos en los biorreactores.

Asimismo, la utilización de protocolos industriales como RS-232 y MODBUS. Con lo descrito anteriormente se plantea realizar el control de dióxido de carbono para acelerar y mejorar el crecimiento de cultivos en espacios controlados.

Metodología



Resultados

Para establecer comunicación existen distintas formas de hacerlo primero se requiere obtener las mediciones de los sensores posteriormente esos datos se deben leer por medio del PLC para finalmente poderlos visualizar en el HMI, los sensores trabajan por medio de comunicación MODBUS RS-485 para ello se realiza la conexión con el PLC y con los 4 sensores en las entradas A y B del PLC.

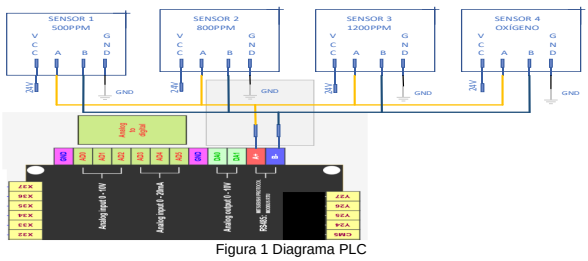


Figura 1 Diagrama PLC

El sistema de inyección de CO_2, a diferencia de otros, opera sin fallas en la comunicación entre PLC, sensores y HMI, lo que evita averías y facilita la identificación de problemas físicos mediante la visualización de las electroválvulas.

Los datos de los mezcladores fueron analizados a partir de 1441 muestras divididas en tres periodos de 8 horas.

Los resultados por jornada y mezclador fueron los siguientes:

Primera jornada:

•Mezclador 1 (500 ppm): Efectividad del 99.9%, con un solo pico descartado.

•Mezclador 2 (800 ppm): Efectividad del 89.1%, con variaciones y 156 muestras descartadas.

•Mezclador 3 (1200 ppm): Efectividad del 45.5%, siendo el más inestable con 785 muestras erróneas.

Segunda jornada:

•Mezclador 1: Mantuvo su estabilidad.

•Mezclador 2: Mejoró su efectividad al 99%.

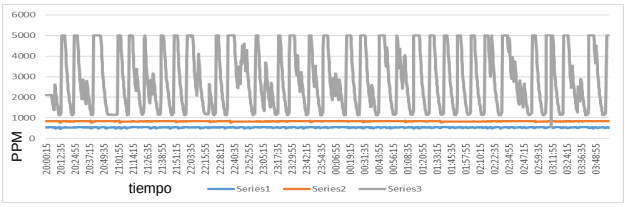
•Mezclador 3: Aumentó los errores, disminuyendo su efectividad al 36.6%.

Tercera jornada:

•Mezclador 1: Continuó estable.

•Mezclador 2: Disminuyó a 97.7% con 32 medidas falsas.

•Mezclador 3: Mejoró su estabilidad a 55.3%, aunque su efectividad cayó a 36.4%.



Conclusiones

El sistema de control basado en el PLC FX3U-56MR de Mitsubishi, la HMI Kinco GLO70E, sensores de CO_2 y válvulas solenoides ha demostrado eficacia en la gestión de niveles de CO_2 en mezcladores y biorreactores. Durante tres jornadas de monitoreo, el mezclador configurado para 500 ppm mantuvo una estabilidad consistente, descartando picos anómalos de forma correcta. El mezclador a 800 ppm mostró variaciones iniciales, pero mejoró significativamente en la segunda jornada, logrando una mayor estabilidad. El mezclador a 1200 ppm se estabilizó rápidamente, pero presentó más fluctuaciones que los otros, aunque con una tendencia positiva hacia la precisión. El sistema de inyección de CO_2 fue efectivo, sobre todo en concentraciones bajas, donde la estabilidad fue casi perfecta. Sin embargo, es necesario optimizar la estabilidad en concentraciones más altas. La programación en MELSOFT GX Works2 y la comunicación mediante MODBUS RTU RS-485 permitieron mantener las concentraciones deseadas, garantizando una operación estable y precisa en aplicaciones industriales.

Referencias

Forero, N. G. 2012. Normas de Comunicación en Serie: RS-232, RS-422 y RS-485. Bogotá, Colombia. 9 p.

García M. 2021. Control automático y gestión de recursos en distritos agroindustriales Almería. Almería, España. 9 p.

Herath, Shayamal P, H. D., y Hasanika S. 2020. Development of a Data Acquisition and Monitoring System Based on MODBUS RTU Communication Protocol. Sri Lanka Nugegoda. 9 p.

Hurtado S, C. A. 2023. Evaluación de los efectos de la aplicación de tres concentraciones de CO_2 bajo invernadero en el cultivo de lechuga crespa (lactuca sativa vas. crispa), en el sector salache, cantón latacunga, provincia cotopaxi. Latacunga, Ecuador. 58 p.

ISBN: En trámite

Síntesis química y biológica de nanopartículas de cobre y óxido de cobre con fines agrícolas

Frida Escamilla Barragán *, Marlon Rojas López *, Ada María Ríos Cortés *
* Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada CIBA-IPN

Resumen

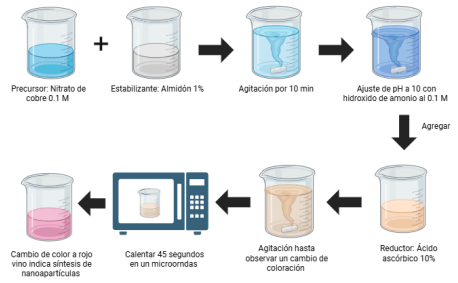
La nanotecnología aplicada a la agricultura es un área de investigación en crecimiento la cual en varios estudios ha reportado el efecto de las nanopartículas de distintos metales en plantas cultivadas siendo este favorable en muchos de los casos, en el presente trabajo se sintetizaron nanopartículas de cobre por un método químico y de óxido de cobre por un método biológico utilizando extracto de *Moringa oleifera* una planta reportada como "bio-estimulante", estas síntesis fueron elaboradas con materiales aptos para que puedan ser probadas en plantas cultivadas y de esta manera observar su efecto en las mismas ya que el cobre en forma de nanopartícula tiene reportes de efectos favorables debido a que este es un elemento esencial para la nutrición en plantas, agregar nutrientes en forma de nanopartícula podría proponer una alternativa para hacer agricultura mas sustentable e innovadora. El objetivo de este trabajo fue sintetizar 2 tipos de nanopartículas de cobre que pudieran ser aplicadas a plantas cultivadas.

Introducción

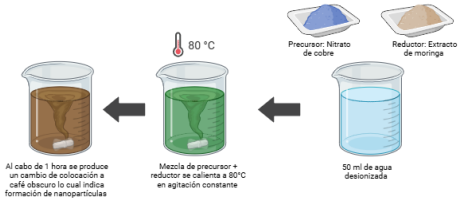
Dentro de los nanomateriales que se han investigado para uso agrícola han destacado las nanopartículas, específicamente aquellas que se componen de un elemento esencial para la nutrición de las plantas como Cu, Fe, Zn. Según diversos estudios realizados este tipo de nanopartículas tienen efectos en plantas cultivadas como aumento de rendimiento, aumento de resistencia al estrés biótico y abiótico, aumento en la producción de fitoquímicos, mejoramiento de la calidad de fruto y aumento en la tasa de germinación y crecimiento. (Usman et al., 2020) El cobre es un elemento esencial en la nutrición vegetal el cual se asocia a las funciones de síntesis de clorofila, proteínas y polifenoloxidasas, formación de lignina y de la pared celular, transporte de electrones, reacciones de oxido reducción, cofactor de enzimas como la super óxido dismutasa que neutraliza especies reactivas de oxígeno y producción de compuesto fenólicos que dan color y sabor a los frutos. (INTAGRI, 2020) El presente trabajo tiene el objetivo de producir el cobre en forma de nanopartícula para que al ser agregado de esta manera a una planta cultivada sea aprovechado de manera mas eficiente lo cual puede tener un efecto favorable en distintos aspectos para la planta.

Metodología

Síntesis química de nanopartículas de cobre
(Valdokar et al., 2012)

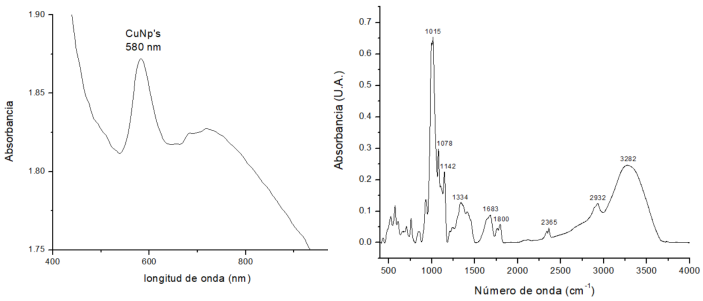


Síntesis biológica de nanopartículas de óxido de cobre
(Prajapati et al., 2023)

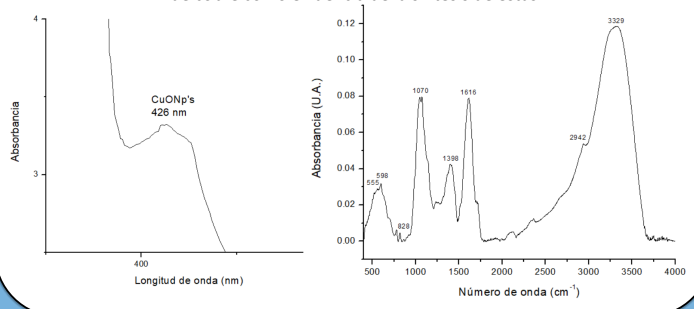


Resultados

Espectro Uv visible y FTIR de la suspensión de nanopartículas de cobre como evidencia de la síntesis de estas



Espectro Uv visible y FTIR de la suspensión de nanopartículas de oxido de cobre como evidencia de la síntesis de estas



Conclusiones

Se comprobó con ayuda de los espectros Uv visible y FTIR que las síntesis de ambos tipos de nanopartículas fueron exitosas, en el caso de las de cobre su pico de absorbancia en UV visible se observa en 580 nm lo cual indica la presencia de nanopartículas de cobre, en el caso del FTIR el pico en 1800 cm^{-1} se atribuye a la interacción de cobre con almidón. En el caso de las nanopartículas de óxido de cobre su pico de absorbancia en UV visible se observa en 426 nm lo cual indica la presencia de nanopartículas de óxido de cobre, en el caso del FTIR los picos entre 565 cm^{-1} y 874 cm^{-1} se atribuyen a los enlaces Cu-O y Cu-O-Cu.
Este tipo de nanomateriales son prometedores en el área agrícola y podrían proporcionar avances de importancia para el futuro de este sector.

Referencias

Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., Rehman, H. U., Ashraf, I., & Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *The Science Of The Total Environment*, *721*, 137778. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778

INTAGRI. (2020). El Cobre en la Nutrición Vegetal. Serie Nutrición Vegetal. Núm. 135. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. P. 4

Mayur Valodkar, Puran Singh Rathore, Ravirajsinh N. Jadeja, Menaka Thounaojam, Ranjitsinh V. Devkar, Sonal Thakore, (2012) Cytotoxicity evaluation and antimicrobial studies of starch capped water soluble copper nanoparticles,-Journal of 3894,https Hazardous Materials,Volumes ://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.077

Prajapati, J. P., Toppo, A., Majhi, P., Pradhan, U., Das, A., Das, D., Sriramulu, G., Mallick, S., Katlakunta, S., & Shukla, A. K. (2023). Biogenic Synthesis, Characterization, and Antifungal Activity Studies of Copper Oxide Nanoparticles Using Aqueous Extract of Moringa oleifera Leaves. *ChemistrySelect*, *8*(34). https://doi.org/10.1002/slct.202300531

ESTRUCTURA DE LA COMUNIDAD DE AVES EN HÁBITATS GANADEROS CON DIFERENTE COBERTURA ARBÓREA EN TIERRA CALIENTE, GUERRERO.

C. Sandino García-Vega[1,2]*, Lucero Sarabia-Salgado[3], R. Carlos Almazán-Núñez[3]***, Moisés Cipriano-Salazar[2], Luis A Saavedra Jiménez[2], Isidro Gutiérrez-Segura[3], Díaz-Pineda, Yahir[1], Torres Mercado, Cristal[1]**

*[1] TecNM/ Instituto Tecnológico de Cd. Altamirano. **[2] Facultad. de Medicina Veterinaria, Universidad Autónoma de Guerrero, [3]Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Guerrero.

Resumen

La ganadería representa uno de los sectores de mayor crecimiento en los sistemas agrícolas, proporcionando nutrientes esenciales de alta calidad para el consumo humano, sin embargo, debido a las malas prácticas en la ganadería es la principal causa de la pérdida y degradación de la biodiversidad, lo que vuelve urgente proponer alternativas que minimicen los daños que causa. Los sistemas agroforestales y la ganadería sostenible pueden ser buenas estrategias para reducir el impacto en la biodiversidad. El objetivo fue evaluar la relación entre la composición, la estructura de la avifauna en tres sistemas ganaderos de la Región Tierra Caliente. Se realizaron visitas bimensuales a los sitios delimitados, con una réplica por cada sistema identificado. Se presenta el progreso de seis visitas a la fecha. El sitio arbolado muestra la mayor riqueza y diversidad, mientras que el sitio de BTC mostró la menor riqueza.

Introducción

La expansión agrícola y ganadera es una de las causas principales de la pérdida de cobertura vegetal, es un factor clave en la degradación de la biodiversidad y la pérdida de servicios ecosistémicos (van Breugel et al., 2025).

La ganadería es la principal causa de pérdida de biodiversidad en todo el mundo, un costo directo de la conversión de tierras a la producción de alimentos ha sido la pérdida de casi un tercio de los bosques naturales del mundo (Machovina et al., 2015).

La ganadería es la actividad productiva que mayor extensión de tierras utiliza a escala global (Bilenca et al., 2018); en México, esta actividad ocupa el 56% (1.1 millones de km2), lo que excede en más de 10% su potencial ganadero.

Las aves representan uno de los grupos biológicos más utilizados para evaluar los cambios en el ambiente y para comparar la diversidad entre distintas configuraciones de paisajes (Kusch et al., 2016).

Metodología

Seleccionamos tres sitios con distinta cobertura vegetal, con dos réplicas y diez puntos fijos de conteo en por cada sitio y réplica: hábitat arbolado; hábitat abierto (con arbolado circundante) y de Bosque seco, en la región de Tierra Caliente. Realizamos observaciones directas en puntos de radio fijo (25 m) durante 10 minutos, del amanecer hasta las 11:00. Se realizaron visitas bimensuales a los sitios delimitados durante un año.



Para determinar la estructura de la avifauna, medimos el número de especies y de inviduos por sitio, calculamos el índice de diversidad efectiva de Hill. Incluimos criterios como el endemismo y riesgo con base en la (NOM-059-SEMARNAT, 2010). La estacionalidad de la avifauna se clasificó de acuerdo a las categorías propuestas por Howell & Webb (1995).

Resultados

Registramos un total de 6 884 individuos pertenecientes a 102 especies, 69 géneros, 28 familias y 13 órdenes. De estas especies, 62 son residentes, 35 migrantes de invierno y cinco migrantes de verano; siete especies son endémicas a México y tres se encuentran en alguna categoría de riesgo. Las familias mejor representadas son Tyrannidae con 14 especies, Parulidae con 13 y Columbidae con siete.

En el hábitat ganadero arbolado se registraron 2787 individuos de 88 especies, mientras que en el hábitat ganadero de temporal se registraron 2 624 individuos de 78 especies, mientras que en el hábitat con bosque tropical caducifolio se obtuvieron 1 473 individuos de 64 especies. Según los números efectivos de Hill (Cuadro 1), el sitio arbolado resulto el más diverso, rico en especies, podría tener una menor equidad en la abundancia de sus especies (es decir, algunas especies son mucho más abundantes que otras). La de selva resultó la menos diversa en cuanto a la avifauna (Figura 1).

Cuadro 1. Números de Hill y completitud del muestreo

Hábitat	q0	q1	q2	Completitud
Abierto	78	37.5	25.11	0.9958
Arbolado	88	44.75	31.70	0.9982
BS	64	36.01	25.25	0.9953

Donde: q0 es la riqueza de especies, q1 muestra las especies típicas y q2 expresa el número de especies dominantes de la muestra.

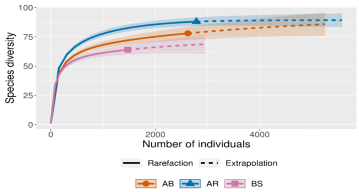


Figura 1. Curva de acumulación de especies presentes en los sitios ganaderos. El eje X representa el número de individuos y el eje Y representa la diversidad de especies. AB (hábitat abierto); AR (hábitat arbolado); BS (Bosque seco).

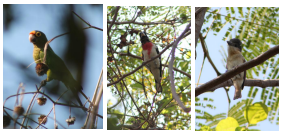


Figura 2: Eupsitula canicularis; Pheucticus melanocephalus y Pachyramphus aglaiae, *halladas durante los muestreos en las zonas ganaderas de Tierra Caliente.*

Conclusiones

- Se presenta un avance de proyecto, si bien faltan por incluir los resultados del análisis de la vegetación, se observa que las zonas arboladas presentan mayor riqueza y abundancia, aunque no se hallaron diferencias significativas en cuanto a la comparación de las medias del índice de diversidad q1.
- Ante la fragmentación continua del hábitat es preciso aumentar la cobertura arbórea de los sitios ganaderos, que además de apoyar en la conservación de la flora y fauna nativas, aporta beneficios a la producción ganadera y al bienestar animal.
- Confirmamos la importancia que tiene la cuenca del Balsas en cuanto a endemismos y como sitio de invernación de aves migratorias en el occidente de México

Referencias

Bilenca, D. et al. (2018) Conservación de la biodiversidad en sistemas silvopastoriles: buenas prácticas para una ganadería sustentable de pastizal. Available at: www.vidasilvestre.org.ar.

Breugel, M. et al. (2025) 'Persistent Effects of Landscape Context on Recruitment Dynamics During Secondary Succession of Tropical Forests', Global Change Biology, 31(1). Available at: https://doi.org/10.1111/gcb.70037.

Kusch, A., Vidal, O. and Henríquez, J.M. (2016) 'Remoción de matorrales semi-áridos en Magallanes: efectos sobre la composición, estructura y rasgos funcionales de los ensambles de aves', Anales del Instituto de la Patagonia, 44(2), pp. 35–48. Available at: https://doi.org/10.4067/s0718-686x2016000200003.

Machovina, B., Feeley, K.J. and Ripple, W.J. (2015) 'Biodiversity conservation: The key is reducing meat consumption', Science of the Total Environment, 536, pp. 419–431. Available at: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.022.

RECONOCIMIENTO DE NÚMEROS DE PARTE MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Irán Alexandra Díaz Sandoval*, Israel Ulises Ponce Monárrez*, Ángel Israel Soto Marrufo*, Guillermo Mejía Cisneros*, Adriana Salinas Ávila*

* Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema automatizado para la identificación de números de parte en etiquetas de materiales recibidos en almacenes, utilizando procesamiento de imágenes y reconocimiento óptico de caracteres (OCR) en MATLAB. Se propone una metodología basada en la captura y preprocesamiento de imágenes, extracción de caracteres y validación de patrones para mejorar la precisión del proceso de recepción de materiales. Los resultados muestran una precisión del 82.5% en la identificación de números de parte, reduciendo errores manuales y optimizando el flujo logístico. Se concluye que la implementación de este sistema puede mejorar significativamente la eficiencia en la gestión de inventarios, con posibilidades de optimización mediante redes neuronales y aprendizaje profundo.

Introducción

La logística es esencial en la cadena de suministro, asegurando la correcta distribución de materiales desde su origen hasta el consumidor final. Un problema recurrente en almacenes es la discrepancia entre los registros de inventario y la cantidad real de materiales recibidos, lo que puede generar costos adicionales y retrasos en la producción (Escudero & Serrano, 2019). Estos errores surgen principalmente por la dependencia de procesos manuales, donde la verificación de números de parte en etiquetas es realizada por operarios, aumentando el margen de error. Un sistema automatizado basado en procesamiento de imágenes y reconocimiento óptico de caracteres (OCR) podría optimizar este procedimiento, reduciendo inconsistencias y mejorando la eficiencia operativa. Investigaciones previas han demostrado que el uso de visión artificial en la logística contribuye significativamente a la reducción de errores en el registro de inventario y mejora el flujo de materiales (Rushton et al., 2022). Con la creciente digitalización y la aplicación de tecnologías de la Industria 4.0, implementar estos sistemas permite una gestión más precisa y eficaz de los almacenes.

Objetivos

Objetivo general:

Desarrollar e implementar un sistema automatizado de reconocimiento de números de parte mediante procesamiento de imágenes y OCR, con el fin de optimizar la gestión de inventarios en almacenes y reducir los errores derivados de la verificación manual.

Objetivos específicos:

1. Diseñar un sistema de captura y preprocesamiento de imágenes que permita mejorar la visibilidad y segmentación de caracteres en etiquetas bajo distintas condiciones de iluminación, ángulo y ruido visual.
2. Integrar y evaluar un algoritmo de reconocimiento óptico de caracteres (OCR) para la identificación precisa de números de parte en imágenes capturadas en entornos logísticos.
3. Analizar el desempeño del sistema en términos de precisión y eficiencia, e identificar oportunidades de mejora mediante la incorporación de técnicas de aprendizaje profundo y ajuste automático de parámetros.

Metodología

Para la implementación del sistema se empleó un enfoque basado en visión artificial y procesamiento digital de imágenes en MATLAB. Se desarrolló un procedimiento dividido en cuatro fases principales:

1. Captura de imágenes:
   - Se utilizaron cámaras de dispositivos móviles conectadas a MATLAB mediante EpocCam (Lent, 2022).
   - Se tomaron imágenes de etiquetas de números de parte en distintas condiciones de iluminación y ángulos.
2. Preprocesamiento de imágenes:
   - Conversión de las imágenes de formato RGB a escala de grises.
   - Aplicación de filtros de reducción de ruido y ajuste de iluminación con filtros morfológicos (Umbaugh, 2023).
   - Normalización de contraste para mejorar la detección de caracteres (Ortega et al., 2022).
3. Extracción y procesamiento de caracteres:
   - Uso de la técnica de regiones geométricas mediante MSER para segmentar caracteres.
   - Aplicación de umbrales de contraste y eliminación de elementos irrelevantes (Santa María et al., 2021).
4. Validación y comparación de patrones:
   - Identificación y comparación de caracteres extraídos con plantillas predefinidas de números de parte.
   - Agrupación de caracteres individuales para formar códigos completos.

Conclusiones

El desarrollo de este sistema de procesamiento de imágenes permitió mejorar la eficiencia en la identificación de números de parte en almacenes, reduciendo la dependencia de procesos manuales y disminuyendo errores en el inventario. La implementación de OCR y visión artificial en la logística demostró ser una estrategia viable para optimizar la gestión de materiales. Sin embargo, se identificaron limitaciones en cuanto a la variabilidad en iluminación, ángulo de captura y ruido en las imágenes, lo que afectó la precisión del reconocimiento en algunos casos. Para mejorar la fiabilidad del sistema, se recomienda la integración de modelos de redes neuronales y aprendizaje profundo, que permitan una mayor adaptabilidad a diferentes condiciones de captura y tipos de etiquetas. Adicionalmente, el uso de algoritmos de ajuste automático de parámetros podría contribuir a minimizar la necesidad de intervención manual en el preprocesamiento de imágenes. En futuras investigaciones, se sugiere evaluar la implementación del sistema en entornos industriales reales para medir su impacto en la reducción de costos y tiempos de operación.



Resultados

El sistema fue evaluado con 40 imágenes de etiquetas de números de parte, logrando una identificación exitosa en 33 casos, obteniendo una precisión del 82.5%. Se identificaron factores clave que afectan el desempeño del sistema:

- Iluminación: Variaciones en la luz afectaron la visibilidad de los caracteres (Ortega et al., 2022).
- Ángulo de captura: Una inclinación inadecuada modificaba la apariencia de los números, dificultando su reconocimiento (Santa María et al., 2021).
- Ruido en la imagen: Sombras o marcas en las etiquetas interferían en el proceso de segmentación y extracción de caracteres.

A pesar de estos desafíos, el sistema mostró un rendimiento prometedor, facilitando la automatización del registro de inventarios y reduciendo errores asociados a la verificación manual. Se sugiere optimizar el modelo con técnicas avanzadas de aprendizaje profundo para mejorar la robustez del reconocimiento.

Referencias

- Escudero, J., & Serrano, M. (2019). Logística de almacenamiento (2ª ed.). Ediciones Paraninfo.
- Lent, C. S. (2022). Learning to Program with MATLAB: Building GUI Tools. John Wiley & Sons.
- Ortega, M. P., Castro, A. M., & Mora, A. F. (2022). Sistema de procesamiento de imágenes digitales para el reconocimiento y asociación de patrones en la gestión de inventarios en calzado: Digital image processing system to manage inventories. INCEPTUM: Revista de Investigación en Ciencias de la Administración, 17(32), 73-95.
- Santa Maria Pinedo, J. C., Ríos López, C. A., Rodríguez Grández, C., & García Estrella, C. W. (2021). Reconocimiento de patrones de imágenes a través de un sistema de visión artificial en MATLAB. Revista Científica de Sistemas e Informática, 1(2), 15-26.
- Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2022). The handbook of logistics and distribution management: Understanding the supply chain. Kogan Page Publishers.
- Umbaugh, S. E. (2023). Digital image processing and analysis: computer vision and image analysis. CRC Press.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA ELECTRÓNICO DE MEDICION PARA EL MONITOREO DE LA PRESIÓN, TEMPERATURA Y ALTITUD CON MATERIALES ALTERNATIVOS AL PLÁSTICO.

López Sánchez César Adrián, Eduardo Mael Sánchez Coronado*, Ginés Monterrosas Daniel, Martínez Apale Gerardo, Rodríguez de Rosas Ángel Rubén, Cruz Montalvo Luis Alberto.
TecNM Instituto Tecnológico de Orizaba. Av. Ote. 9 No. 852, Col. Emiliano Zapata, Cp. 94320, Orizaba Veracruz.

Introducción

El diseño e implementación de sistemas de medición en línea de presión, temperatura y altitud involucrando un diseño CAD construido de madera otorga soluciones para satisfacer la necesidad de medición en procesos productivos. La importancia de la medición por medio de una interfaz de usuario otorga la capacidad de consulta de información operativa en línea para el usuario, con ello se asegura el acceso a información operativa relevante para tomar decisiones que aseguran un estado de operación nominal del proceso que se esté llevando a cabo.

Objetivo:

Diseñar e implementar un sistema modular y portátil de medición de presión, temperatura y altitud involucrando un diseño CAD para su construcción de madera en alternativa a materiales plásticos.

Contenido principal

El sistema utiliza un microcontrolador ESP32 y un sensor multivariable BMP280, una interfaz visual y se presenta en un módulo basado en diseño CAD y construido de madera. Con la programación, el sistema determina las variables en línea. El diseño del gabinete se realizó con el software *LIGHT BURN* para posteriormente ser grabado en madera de acuerdo con las especificaciones particulares del diseño. Bajo la secuencia de desarrollo de: diseño eléctrico/electrónico, programación del microcontrolador, desarrollo de la comunicación con la interfaz, integración eléctrica de los componentes, diseño y armado del módulo, integración física y acondicionamiento eléctrico y por último validación se dio origen al sistema el cual es flexible para diferentes procesos

Imágenes y Diseño

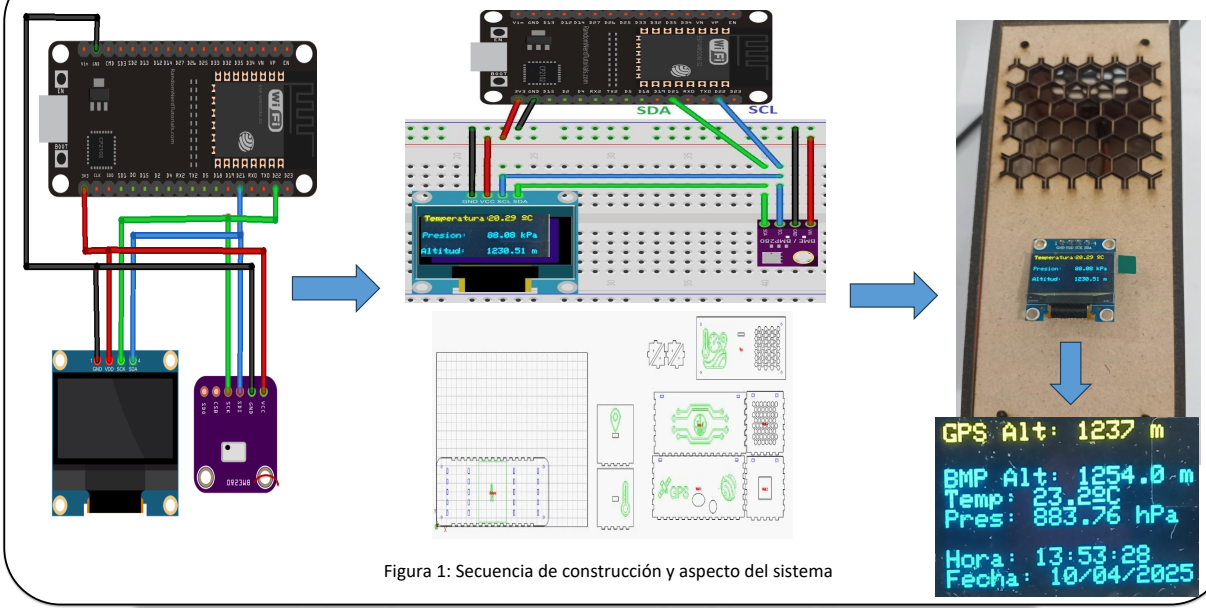


Figura 1: Secuencia de construcción y aspecto del sistema

Aplicaciones e impacto en la vida cotidiana

Este sistema de medición de presión, temperatura y altitud se puede utilizar para el monitoreo en línea de cambio climático para sistemas agrónomos, de la misma forma es aplicable para tener información por prescripción médica de las condiciones de presión de una persona, así mismo en la vida cotidiana para prevenir condiciones climáticas, además el sistema al contar con una facilidad para su transportación en cuanto a peso y dimensiones lo convierten en una opción cómoda para medir estas condiciones climáticas en donde el usuario se encuentra.

Resultados y Conclusión

El sistema fue puesto a prueba para el monitoreo de variables en la ciudad de Orizaba, Veracruz en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Orizaba el día 10/04/2025 a las 13:53 horas, registrando una altitud de 1254msnmm, una temperatura de 23.2°C y una presión de 883hPa, que en comparación con fuentes meteorológicas oficiales en línea se tuvo una variación del 1.8% de lo registrado por el sistema.

Conclusión El sistema demostró ser una propuesta de solución ante las necesidades de monitoreo, siendo suficiente la utilización de la tecnología basada en microcontroladores con el uso de materiales de bajo impacto ambiental.

Referencias

*Tamíris Pacheco da Costa, Daniele Mesquita Bordalo da Costa, Fionnuala Murphy (2024). A systematic review of real-time data monitoring and its potential application to support dynamic life cycle inventories. Environmental Impact Assessment Review.
*Liu, Shufeng. (2021). Application of Computer Aided 3D CAD Technology in Mechanical Manufacturing and Automation. Journal of Physics: Conference Series.
*Banaulikar, Akash. (2020). Real Time Monitoring and Control for Industrial Automation using PLC. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology
*Hussain, U., Tammewar, S. S., & Pathrabe, H. (2024). Advancements in Real-Time Monitoring and Control for Enhanced Process Efficiency. *Proceedings.*
*Horr, A. M., & Drexler, H. (2025). Real-Time Models for Manufacturing Processes: How to Build Predictive Reduced Models. *Processes.*
**Comisión Nacional del Agua – Servicio Meteorológico Nacional*

ISBN: En trámite

PRUEBA CUALITATIVA DE BAJO COSTO PARA BOQUILLAS DE IMPRESIÓN 3D, BASADO EN PATRONES DE DIFRACCIÓN.

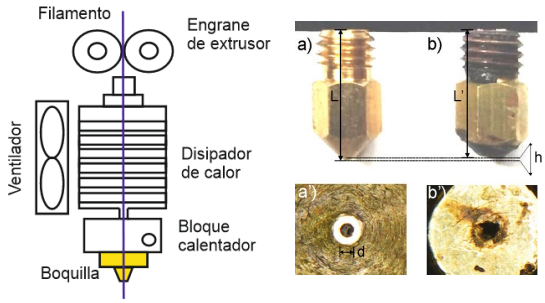
Uriel Rivera-Ortega*,
* Universidad Tecnológica de Puebla.

Resumen

La impresión 3D es ampliamente usada en áreas como la ingeniería, medicina y educación STEM. Uno de los problemas comunes es la baja calidad de impresión causada por el desgaste o la obstrucción de la boquilla del extrusor. Actualmente, la verificación del estado de la boquilla se realiza visualmente o con objetos de referencia, métodos que pueden ser imprecisos o complejos. Como alternativa, se propone una prueba cualitativa, económica y sencilla basada en el análisis del patrón de difracción que genera la boquilla al ser iluminada con un láser. Este patrón se compara con el de una boquilla en buen estado del mismo tamaño, lo que permite al usuario decidir si es necesario reemplazarla. Además, se sugiere una modificación simple a un puntero láser comercial para crear un dispositivo portátil que facilite esta verificación.

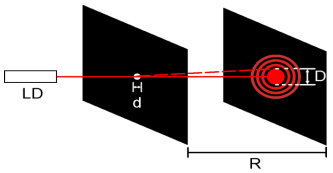
Introducción

La impresión 3D, especialmente mediante modelado por deposición fundida (FDM) [1], requiere de componentes precisos para obtener productos de calidad. Uno de estos es la boquilla del extrusor, que con el tiempo puede sufrir desgaste u obstrucción, afectando la precisión del proceso. Este trabajo presenta una herramienta cualitativa basada en patrones de difracción que permite comparar visualmente el estado de una boquilla frente a una de referencia, proporcionando una forma práctica y no invasiva para detectar posibles defectos. La técnica puede ser útil en entornos donde se requiere una inspección rápida y visual sin necesidad de instrumental especializado.

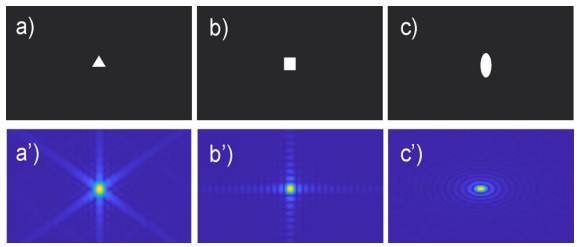


Metodología

Cuando un haz de luz uniforme atraviesa una abertura circular de diámetro d, se produce un fenómeno físico conocido como difracción. El patrón de difracción resultante puede observarse a una distancia R de la abertura y está formado por discos concéntricos de intensidad decreciente. En el centro del patrón se encuentra un disco brillante de diámetro D, conocido como disco de Airy [2], cuya intensidad representa aproximadamente el 80 % de la intensidad total.

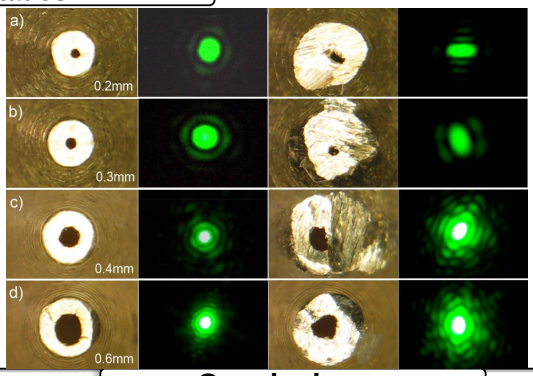


$$D = \frac{2.44\lambda R}{d}$$

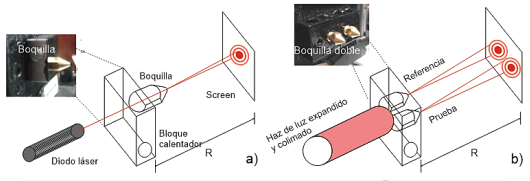


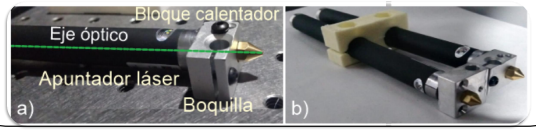
Resultados

Los patrones de difracción [3] de la segunda columna corresponde a boquillas nuevas con aberturas de salida comúnmente utilizadas: 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm y 0,6 mm. En estos patrones se puede identificar el disco central de Airy, así como algunos anillos concéntricos. La forma circular del disco depende de que la abertura de la boquilla sea perfectamente circular y esté libre de deformaciones. Los patrones de difracción mostrado en la cuarta columna presentan los patrones correspondientes cuando las boquillas presentan desgaste o deformaciones.



Esquema y prototipo





Conclusiones

Se presentó y validó una técnica cualitativa basada en difracción para identificar desgaste o deformaciones en boquillas de impresoras 3D. El prototipo diseñado permite comparar visualmente patrones generados por una boquilla en prueba y una de referencia, facilitando una inspección rápida y sin herramientas especializadas [4]. La metodología es aplicable a distintos diámetros y mejora la confiabilidad del mantenimiento preventivo..

Referencias

[1]Erokhin, K., Naumov S., and Ananikov, V. (2023). Analysis, classification and remediation of defects in material extrusion 3D printing. *Russian Chemical Reviews*, **92**, 1-29.
[2] Rivera-Ortega U., and Pico-Gonzalez, B. (2016). Wavelength estimation by using the Airy disk from a diffraction pattern with didactic purposes. *Physics Education*, **51**, 1-5.
[3] Smith, R. C., and Marsh, J. S. (1973). Diffraction patterns of simple apertures. *Journal of the Optical Society of America*, **64**, 798-803.
[4] Rivera-Ortega, U.(2025). Simple and low-cost qualitative test of wear in 3D-printer extruder nozzle by using diffraction patterns. *Optica Pura y Aplicada*, **58**, 1-9.

Propagación de ondas en un océano no homogéneo bajo una capa de hielo

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Alan Ismael Vázquez Yáñez, Vladimir Rabinovitch, Raúl Castillo Pérez

Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, Delegación Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México.

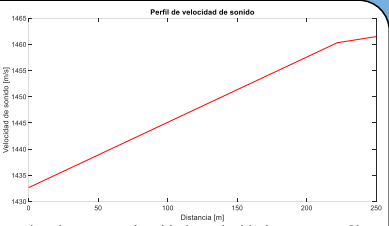
avazquezy1300@alumno.ipn.mx, vrabinovitch@ipn.mx, rcastillo@ipn.mx

Resumen

Este trabajo muestra una opción de solución al problema de la propagación de ondas en un medio estratificado con una capa no homogénea con el fin de predecir el comportamiento del campo acústico generado por ondas que viajan a través de él para modelar un sistema de comunicaciones submarino de larga distancia. El medio cuenta con tres capas, una de hielo, una de agua y la última como el fondo marino. Las velocidades del sonido en las capas de hielo y del fondo marino se consideran constantes mientras que la del agua no. La propagación de las ondas se ha modelado con la ecuación de onda y su solución se ha obtenido por medio del método de Series de Potencias de Parámetro Espectral.

Introducción

En contraste con las ondas electromagnéticas, las ondas acústicas se llegan a propagar decenas de kilómetros en el agua. Particularmente, esto se ha aprovechado en las telecomunicaciones para poder construir sistemas de comunicaciones en el agua.



Las capas de hielo y el fondo marino tienen una densidad y velocidad constante. Sin embargo, en este trabajo, se ha considerado que la velocidad del agua varía linealmente a trozos como se muestra en la figura de esta sección. Todos estos valores se han tomado de magnitudes reales que se muestra en la literatura. En esta presentación de este trabajo no se consideran efectos de disipación o dispersión, los cuales se proponen como trabajos futuros.

Planteamiento del problema

Sea la ecuación de onda aquella que modela la propagación de ondas en el océano que se puede reescribir de la siguiente manera, como una E.D. de Sturm-Liouville.

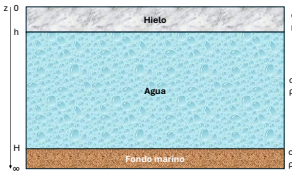
$$\frac{1}{c^2(z)}\frac{\partial^2 w(t,r)}{\partial t^2} - \Delta_r w(t,r) = 0$$

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} + k^2(\omega,z) - \alpha^2\right)\psi(\omega,\alpha,z) = 0$$

Sean la velocidad del sonido y la densidad, distintas en cada estrato

$$c(z) = \begin{cases} c_i, 0 \le z \le h \\ c_w(z), h < z \le H \\ c_b, z > H \end{cases} \qquad \rho(z) = \begin{cases} \rho_i, 0 \le z \le h \\ \rho_w(z), h < z \le H \\ \rho_b, z > H \end{cases}$$

Con las siguientes condiciones



$$\psi(\omega,\alpha,0) = 0,$$

$$\psi(\omega,\alpha,h-0) = \psi(\omega,\alpha,h+0),$$

$$\frac{1}{\rho_i}\left(\frac{d}{dz}\psi(\omega,\alpha,h-0)\right) = \frac{1}{\rho_w}\left(\frac{d}{dz}\psi(\omega,\alpha,h+0)\right),$$

$$\psi(\omega,\alpha,H-0) = \psi(\omega,\alpha,H+0),$$

$$\frac{1}{\rho_w}\left(\frac{d}{dz}\psi(\omega,\alpha,H-0)\right) = \frac{1}{\rho_b}\left(\frac{d}{dz}\psi(\omega,\alpha,H+0)\right),$$

$$\lim_{z\to\infty}\psi(\omega,\alpha,z) = 0.$$

Se construye la ecuación de dispersión

$$D(\omega,\alpha) = \left(\psi_w(\omega,\alpha,H)\right) - \frac{\rho_b}{\rho_w}\frac{1}{\sqrt{\alpha^2 - k_b^2(\omega)}}\psi_w'(\omega,\alpha,H) = 0.$$

Metodología

Sea una ecuación de Sturm-Liouville

$$(pu')' + qu = \lambda ru$$

que tendrá una solución particular

$$(pu_0')' + qu_0 = 0$$

Con el método S.P.P.S. se podrá encontrar una solución general como a continuación

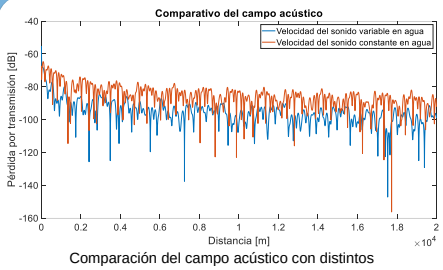
$$u = C_1u_1 + C_2u_2$$

$$u_1 = u_0\sum_{k=0}^{\infty}\lambda^k\tilde{X}^{(2k)} \text{ y } u_2 = u_0\sum_{k=0}^{\infty}\lambda^k X^{(2k+1)}$$

$$\tilde{X}^{(n)}(x) = \begin{cases} \int_{x_0}^{x}\tilde{X}^{(n-1)}(s)u_0^2(s)r(s)ds, n\ impar \\ \int_{x_0}^{x}\tilde{X}^{(n-1)}(s)\frac{1}{u_0^2(s)p(s)}ds, n\ par \end{cases} \qquad X^{(n)}(x) = \begin{cases} \int_{x_0}^{x}X^{(n-1)}(s)\frac{1}{u_0^2(s)p(s)}ds, n\ impar \\ \int_{x_0}^{x}X^{(n-1)}(s)u_0^2(s)r(s)ds, n\ par \end{cases}$$

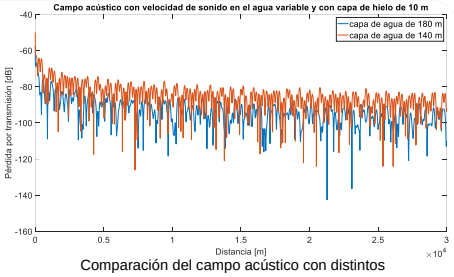
Resultados

Se calcula la pérdida por transmisión para graficar el campo acústico cuando la onda se propaga en el océano. Se propone la ubicación de la fuente y del receptor tanto en profundidad como en la separación horizontal que hay entre estos dos. Se han considerado las siguientes magnitudes físicas reales tomadas de la literatura consultada.



Comparación del campo acústico con distintos Valores de velocidad de sonido

c_i = 3000 m/s, c_b= 2500 m/s,
$\rho_w = 1.0282\ g/cm^3$,
$\rho_b = 2.65 g/cm^3$,
$\rho_i = 0.9168 g/cm^3$,
Profundidad de la fuente = 50m,
Frecuencia = 50 Hz,
Profundidad del receptor = 100m



Comparación del campo acústico con distintos grosores de la capa de agua

Conclusiones

En este trabajo se han obtenido gráficamente las predicciones del campo acústico generado por una fuente submarina que propaga un sonido de 50 Hz. Se aprecia cómo hay mayor atenuación del campo acústico debido a la influencia de las variaciones del perfil de velocidad del agua en contraste con el campo acústico debido a un medio homogéneo. A su vez, también se percibe cómo hay una relación directa entre la atenuación del campo acústico y el grosor de la capa de agua. Estos resultados pueden ayudar a facilitar el establecimiento de presupuestos de enlace, además se podrán aplicar en sistemas de comunicaciones más reales.

Referencias

- Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., & Schmidt, H. (2011). *Computational Ocean Acoustics*. Springer.
- Khmelnytskaya, K. V., Kravchenko, V. V., & Rosu, H. C. (2014). Eigenvalue problems, spectral parameter power series, and modern applications. *Mathematical Methods In The Applied Sciences*, *38*(10), 1945-1969. https://doi.org/10.1002/mma.3213.
- Camargo, O. (2023). *Fundamentals of underwater acoustics*. Springer.
- Hernández, J. (2016). *Spectral parameter power series method in underwater acoustic wave propagation*. [Tesis de doctorado, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio Digital IPN.
- Obrezanova, O. A., & Rabinovich, V. S. (1998). Acoustic field generated by moving sources in stratified waveguides. *Wave Motion*, *27*(2), 155-167. https://doi.org/10.1016/s0165-2125(97)00039-5.
- Rabinovich, V., & Hernandez-Juarez, J. (2016). Effective methods of numerical estimates of acoustic fields in the stratified ocean generated by moving airborne sources. *Applicable Analysis*, 346-349. https://doi.org/10.1109/dd.2016.7756871.
- Rabinovich, V. S., & Hernández-Juárez, J. (2014). Method of the spectral parameter power series in problems of underwater acoustics of the stratified ocean. *Mathematical Methods In The Applied Sciences*, *38*(10), 1990-1999. https://doi.org/10.1002/mma.3197.

Muros verdes alternativa sustentable y viable ante el cambio climático.

Sandra Hernández [1]. ,Gabriela Hernández[1,3], Roserberg Romero[1], Miguel Basurto[1], Liliana Marcelino[2]
Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, [3] Escuela de Técnicos Laboratoristas, UAEM
[2] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, INIFAP

Sandra.hernandezn@uaem.edu.mx

Resumen

Este proyecto plantea a los muros verdes como una alternativa sustentable y viable ante el cambio climático, integrando no solo beneficios ambientales y estéticos, sino también la **generación de energía eléctrica mediante la fotosíntesis de las plantas**. Se diseñó un sistema experimental basado en tecnologías biofotovoltaicas, aprovechando el flujo de electrones generado por la actividad fotosintética en plantas adaptadas a entornos urbanos. A través de un análisis de desempeño energético, se evaluaron las condiciones óptimas de iluminación, humedad y tipo de sustrato. Los resultados preliminares muestran un potencial significativo de producción eléctrica a pequeña escala, lo que posiciona a los muros verdes como una solución innovadora de doble propósito: **captura de carbono y generación energética limpia**. Esta propuesta impulsa la transición hacia ciudades más sostenibles y resilientes, integrando infraestructura verde con tecnología para enfrentar los retos del calentamiento global.

Introducción

El cambio climático representa uno de los desafíos más urgentes para las sociedades actuales, con impactos visibles en el aumento de la temperatura global, eventos climáticos extremos y la pérdida de biodiversidad (OMM, 2023). Las soluciones basadas en la naturaleza han cobrado relevancia por su capacidad para mitigar efectos ambientales y generar beneficios adicionales. Los **muros verdes**, tradicionalmente valorados por su capacidad de regular la temperatura urbana y mejorar la calidad del aire, han evolucionado hacia propuestas más innovadoras integrando tecnologías bioenergéticas (Pérez *et al*., 2011). Una de ellas es la **generación de electricidad a partir de la fotosíntesis de las plantas**, mediante sistemas biofotovoltaicos instalados en superficies verticales (Strik *et al*., 2010; Chen *et al*., 2022).. Aunque existen estudios previos sobre eficiencia energética en infraestructura verde (Rivas Sanchez, 2020), el aprovechamiento directo del proceso fotosintético con fines eléctricos aún es un campo en desarrollo. Esta investigación tiene como propósito evaluar la viabilidad técnica de un sistema de muro verde con capacidad de **producción energética limpia**, como alternativa sustentable y replicable para entornos urbanos.

Metodología

La presente investigación pretende desarrollarse en tres fases principales: diseño del sistema biofotovoltaico considerando la implementación del muro verde experimental y un análisis del desempeño energético. Para la construcción de la primera fase, presentada en este trabajo, se utilizó una serie de plantas de la especie ***Gazania rigens***, especie elegida por sus características fotovoltaicas además de resistencia a exteriores, exposición al sol y a la sombra. Dentro de una maceta de 6" se integraron electrodos a tres diferentes profundidades en 3 cm (Electrodo I), 8 cm (Electrodo II) y 15 cm (Electrodo III) conectadas a un multímetro digital para determinar los valores en voltajes adquiridos. La corriente generada se monitoreó en intervalos regulares bajo distintas condiciones de exposición de sol y sombra entre las 14:00 horas y las 16:00 horas



Figura N° 1 ***Gazania rigens***

Resultados

Los experimentos realizados con la planta ***gazania rigens*** revelaron que la generación de voltaje a partir de la fotosíntesis varía significativamente según la exposición solar y la profundidad de los electrodos. En condiciones de sol directo en el Electrodo I, se obtuvieron valores de 12 mV mientras en Electrodo II y Electrodo III las mediciones registradas arrojaron valores de 15 y 11 mV, respectivamente. En contraste, bajo sombra, con el Electrodo III se registrarán voltajes, hasta 299 mV.

La gráfica de generación de voltaje (Figura N° 2) como función del tiempo muestra un incremento constante durante los primeros 10 minutos de exposición, partiendo de 0.4 V hasta superar los 1.4 V, este comportamiento sugiere un proceso de estabilización fotosintética activo. Estos resultados concuerdan parcialmente con estudios previos en generación de energía vegetal verticales (Strik *et al*., 2010; Chen *et al*., 2022) , aunque se destaca como hallazgo original el mejor rendimiento energético en sombra. Aun así, los datos obtenidos respaldan la viabilidad de los muros verdes como generadores de energía limpia a pequeña escala.

Gazania rigens		
Condición experimental	Expuesto al sol	Expuesto a la sombra
	Voltaje (mV)	
Electrodo I	12	220
Electrodo II	15	299
Electrodo III	11	199

Tabla N° 1. Voltajes obtenidos en la planta ***Gazania rigens***

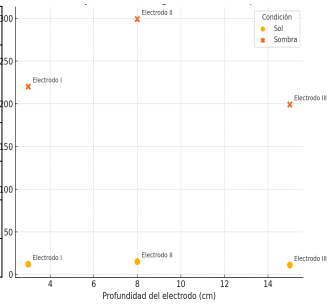


Figura N° 2. Voltaje a tres diferentes profundidades .

Conclusiones

Los resultados obtenidos en la investigación demuestran que la ***Gazania rigens*** tiene potencial de generar energía eléctrica. Los resultados indican una mayor acumulación de electrones en zonas húmedas y sombreadas del sustrato mediante su proceso natural de fotosíntesis, convirtiéndola en una opción viable para integrar en muros verdes. La variación de voltaje bajo diferentes condiciones ambientales a diferentes profundidades de electrodos resalta la importancia de optimizar el diseño y la distribución de las plantas en el muro para maximizar la generación de energía.

Referencias

García Ramos, D. S., & Ledesma Delgado, Y. A. (s.f.). *Desarrollo de un prototipo de sistema para la generación de energía eléctrica a partir del proceso de fotosíntesis de las plantas*. Recuperado de

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2023). *Los indicadores del cambio climático alcanzaron niveles sin precedentes en 2023*. Recuperado de https://wmo.int/es/news/media-centre/los-indicadores-del-cambio-climatico-alcanzaron-niveles-sin-precedentes-en-2023-omm

Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J. M., & Cabeza, L. F. (2011). *Behaviour of green facades in Mediterranean continental climate*. Energy ConversionandManagement,52(4),. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.11.008

Rivas-Sánchez, Y. A. (s.f.). *Eficiencia del uso de muros verdes para disminuir los efectos negativos de la pérdida de áreas verdes en las ciudades con el uso de materiales reciclados*. Recuperado de https://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/19295

ISBN: En trámite

PÓSTER

DIVULGACIÓN

Comportamiento de Materiales Frente a la Exposición Radiactiva

Hernan Gonzaga Barcena *, Dr. Carlos Alberto Badillo Ruiz**, Luis Ángel Méndez Rodríguez *
* Tecnológico Nacional de México Campus Iztapalapa
** Instituto Politécnico Nacional

Resumen

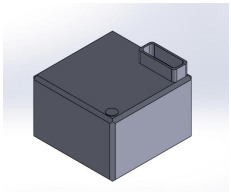
El estudio se diseñó con el objetivo de analizar el impacto de la radiación general y resaltar su importancia en diversos contextos. Para este propósito, se desarrolló una caja protectora utilizando SolidWorks, en la cual se emplearon materiales como plomo puro y acero inoxidable 304, conocidos por sus propiedades de absorción de radiación y durabilidad. La caja fue modelada y sometida a un análisis estructural mediante ANSYS, con el fin de simular el comportamiento de los materiales bajo condiciones específicas de radiación. Este enfoque permitió evaluar la eficacia de los materiales en la protección frente a radiaciones nocivas, demostrando la relevancia de seleccionar materiales adecuados para asegurar la seguridad en entornos donde la radiación es un factor crítico.

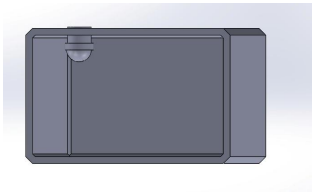
Introducción

La exposición a la radiación ionizante representa un riesgo significativo tanto para la salud humana como para la integridad de diversos materiales. En sectores como la industria nuclear, la medicina y la investigación científica, es crucial contar con barreras eficientes que minimicen la penetración de radiación y protejan tanto a los trabajadores como a los equipos sensibles. Diversos estudios han demostrado que ciertos materiales poseen una alta capacidad de absorción y atenuación de la radiación. Entre ellos, el plomo puro se destaca por su densidad y eficacia en la absorción de rayos X y gamma, mientras que el acero inoxidable 304 es ampliamente utilizado por su resistencia mecánica, durabilidad y compatibilidad con ambientes extremos. La combinación de estos dos materiales permite diseñar estructuras que no solo ofrecen una protección eficaz contra la radiación, sino que también garantizan estabilidad estructural y una larga vida útil en condiciones exigentes. Por este estudio, se diseñó una caja protectora utilizando SolidWorks, Posteriormente, se llevó a cabo un análisis estructural en ANSYS para evaluar su desempeño ante condiciones de exposición a radiación y cargas mecánicas. Este enfoque permite verificar la eficacia de los materiales y su aplicabilidad en entornos donde la radiación representa un riesgo.

Metodología

- Se llevó a cabo una investigación en diversos artículos científicos relacionados con la radiación y la resistencia de distintos materiales.
- Posteriormente, se diseñaron las dimensiones de una caja semiblindada utilizando el software SolidWorks.
- Se realizaron los cálculos necesarios para determinar los valores experimentales, considerando el uso de acero inoxidable tipo 340 como material principal.
- El análisis de transferencia térmica se efectuó en ANSYS con el objetivo de obtener una representación gráfica y dinámica de las variaciones de temperatura ocasionadas por la radiación en los dos materiales evaluados.





Acero inoxidable 304

Densidad (ρ) ** : 8000 kg/m^3
Calor específico (c): 500 $J/kg \cdot K$
Área (A): 0.49 m^2
Volumen (V): 0.00245 m^3
Cálculo de la masa:

$$m = V \times \rho$$
$$m = 0.00245 \times 8000 = 19.6\ kg$$

Cálculo de la variación de temperatura:

$$\Delta T = Q / (m \times c)$$
$$\Delta T = (1.875 \times 10^{-13}\ J) / (19.6\ kg \times 500\ J/kg \cdot K)$$
$$\Delta T = 1.91 \times 10^{-16}\ K$$

Temperatura final:

$$Final = 299.15\ K + 1.91 \times 10^{-16}\ K = 299.15\ K$$

Cálculo del área total
Dimensiones:

$$-A = 60\ cm = 0.60\ m$$
$$-E = 5\ mm = 0.005\ m$$
$$A\ total = 2 \times (0.40 \times 0.60 + 0.40 \times 0.005 + 0.60 \times 0.005)$$
$$A\ total = 0.49\ m^2$$

Cálculo del volumen:

$$V = A \times e = (0.49\ m^2)\ (0.005\ m)$$
$$V = 0.00245\ m^3$$

Cálculo de la energía total en una hora:

$$E\ total = 1.875 \times 10^{-13}\ W \times 3600\ s = 6.75 \times 10^{-10}\ J$$

Cálculo de la variación de temperatura en una hora:

$$\Delta T = (6.75 \times 10^{-10}\ J) / (19.6\ kg \times 500\ J/kg \cdot K)$$
$$\Delta T = 6.88 \times 10^{-14}\ K$$

Plomo

$$1\ eV = 1.602 \times 10^{-19}\ J$$
$$1.13\ MeV = 1.13 \times 10^{6}\ eV = 1.813 \times 10^{-13}\ J$$

Densidad (ρ) = 11340 kg/m^3
Volumen (V) = 0.00245 m^3
Cálculo de la masa:

$$m = \rho \times V$$
$$m = 11340 \times 0.00245 = 27.783\ kg$$

Cálculo de la variación de temperatura:

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

Despejando:

$$\Delta T = Q / (m \times c)$$
$$\Delta T = (1.813 \times 10^{-13}\ J) / (27.783\ kg \times 130\ J/kg \cdot K)$$
$$\Delta T = 5.16 \times 10^{-15}\ K$$

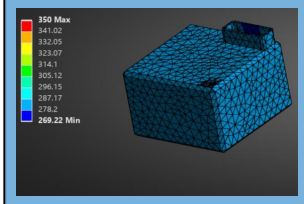
Temperatura final:

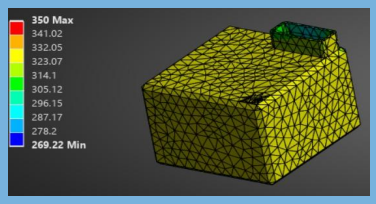
$$Inicial = 26°C = 299.15\ K$$
$$Final = T_inicial + \Delta T$$
$$T_final = 299.15\ K + 5.16 \times 10^{-15}\ K = 299.15\ K$$

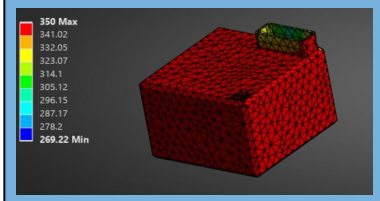
$$Q = \varepsilon\sigma A(T^4 - Tamb^4)$$

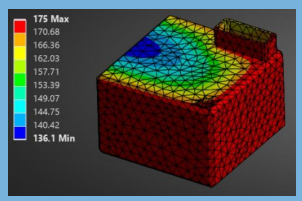
$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2 \cdot K^4$$

$$Q = mc\Delta T \rightarrow \Delta T = Q / mc$$



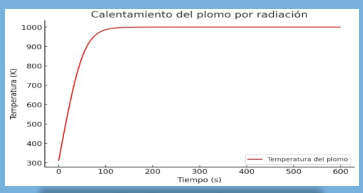






Resultados

Al realizar los cálculos correspondientes para introducir los valores en ANSYS, se procedió a visualizar la simulación con dichos parámetros. Se utilizó el valor de radiación como variable experimental. Al aplicar este valor, se observó un incremento moderado en la temperatura. Debido a su alta densidad, el plomo presenta una mayor capacidad de absorción de protones, lo que reduce la penetración de la radiación en el material.
Al aumentar la intensidad de la radiación, se registró un incremento en la temperatura del plomo, lo cual fue representado gráficamente en la simulación realizada en ANSYS.



Conclusiones

En conclusión, el plomo es mejor que el acero para proteger contra la radiación por su alta densidad y gran capacidad de absorber fotones, como los rayos gamma y X. El acero, aunque no absorbe tanto, sirve para dar estructura y resistir la corrosión. Por eso, la mejor opción es combinar los dos: el plomo para el blindaje y el acero para la parte estructural. En el estudio hecho con Ansys, con una energía de 1.17 MeV no se notaron cambios visibles en la caja de blindaje, pero al aumentar la cantidad de fotonés por segundo en los cálculos, se observó que la temperatura aumentaba. Esto solo se usó como representación de lo que ocurriría en un caso extremo, con una fuente mucho más intensa que la experimental.

Referencias

Cascón, A. (2009). Riesgos asociados con las radiaciones ionizantes. *Revista argentina de cardiología*, *77*(2), 123-128.
Mazzolli de Mathov, E. A. (1948). *Absorción de la radiación cósmica utilizando plomo y aluminio: obtención de un segundo máximo* (Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).
Pascual-Guillamón, M., Cárcel-Carrasco, F. J., & Pérez-Puig, M. A. (2014). Características microestructurales y en la resistencia a la corrosión en soldaduras de acero AISI 304 con INCONEL 625 expuestas a radiación ionizante (radiación X). *DYNA*, *89*(5), 542-551.

Bustamante, P. A., Santoro, N., Ciavaro, N., & Anessi, M. C. (2022). Análisis de la cinética de difusión en hidrogeles sintetizados mediante radiación gamma. Revista argentina de ingeniería, 20, 40-45.

Modelado y control de un reactor helicoidal para la producción de biodiésel

Sandro Vazquez Maceda, Abisai Acevedo Quiroz, Manuel Adam Medina, Jarniel García Morales
TecNM Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Introducción

En los últimos años, se han investigado diversas fuentes de energía renovable con el propósito de mitigar los efectos del cambio climático. Entre ellas, los biocombustibles destacan como una alternativa sostenible [1]. El biodiésel, en particular, desempeña un papel crucial como una de las soluciones renovables más prometedoras en el sector del transporte, ya que es un combustible líquido que puede sustituir parcial o totalmente al diésel convencional [2].

Para garantizar la producción continua de biodiésel y de alta calidad, es fundamental comprender la dinámica de su proceso y aplicar estrategias de control que optimicen su rendimiento.

Objetivo

Desarrollar un modelo matemático que represente el comportamiento de la producción de biodiésel en un reactor tubular continuo y, mediante el análisis dinámico, diseñar e implementar un sistema de control para regular la temperatura de dicho reactor con el propósito de mejorar la producción de biodiésel.

Antecedentes

$$\frac{d[TG]}{dt} = -k_1[AL][TG] + k_2[ME][DG] \quad (1)$$

$$\frac{d[DG]}{dt} = [AL](k_1[TG] - k_3[DG]) - [ME](k_2[DG] - k_4[MG]) \quad (2)$$

$$\frac{d[MG]}{dt} = [AL](k_3[DG] - k_5[MG]) - [ME](k_4[MG] - k_6[GL]) \quad (3)$$

$$\frac{d[ME]}{dt} = [AL](k_1[TG] + k_3[DG] + k_5[MG]) - [ME](k_2[DG] + k_4[MG] + k_6[GL]) \quad (4)$$

$$\frac{d[AL]}{dt} = -[AL](k_1[TG] + k_3[DG] + k_5[MG]) + [ME](k_2[DG] + k_4[MG] + k_6[GL]) \quad (5)$$

$$\frac{d[GL]}{dt} = k_5[AL][MG] - k_6[ME][GL] \quad (6)$$

Figura 3. Modelo matemático de la reacción de transesterificación propuesto por Lopez-Zapata et.al (2017)

Donde [TG][DG][MG][ME][AL][GL] son las concentraciones de los triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos, biodiésel, alcohol y glicerol respectivamente.

k_i , $i = 1 \ldots 6$ son las velocidades de reacción.

Presente en el modelo matemático se encuentran las velocidades de reacción, las cuales se pueden obtener mediante la ecuación de Arrhenius mostrada en la ecuación (7). Donde k es la constante de velocidad, A el factor de frecuencia, Ea la energía de activación, R la constante de gases ideales y T la temperatura de reacción.

$$k_i = A * e^{-\left(\frac{E_a}{R*T}\right)} \quad (7)$$

Contenido principal

Existen diversos métodos para la producción de biodiésel; sin embargo, la transesterificación es el más utilizado para este propósito y será el enfoque principal de este estudio [4]. Dentro de este método, se produce biodiésel a partir de una reacción química entre insumos como aceites vegetales o grasas animales, alcohol (metanol) y un catalizador (Hidróxido de sodio, NaOH).

Para analizar el comportamiento del proceso de producción de biodiésel, se emplean modelos matemáticos basados en los balances de materia y energía del sistema. A partir de estos modelos, se puede identificar que la temperatura es una variable clave en la obtención del combustible. Su regulación, mediante estrategias de control adecuadas, permite optimizar la producción y mejorar la calidad del biodiésel [3].



Figura 1. Reactor tubular continuo experimental.

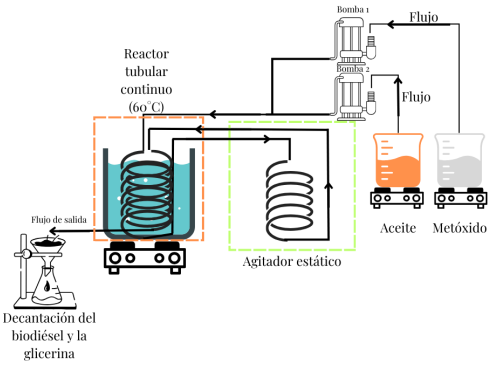


Figura 2. Diagrama esquemático del reactor tubular continuo.

Conclusión

El modelado matemático y el diseño de estrategias de control son herramientas clave para mejorar la eficiencia y estabilidad en la producción de biodiésel en reactores tubulares continuos. Estudios sobre las condiciones de operación en modelos matemáticos propuestos para la producción de biodiésel han demostrado que a una temperatura de 60°C se obtiene una mejor conversión de biodiésel como mencionan Tiwari, A et al (2018) y Carlucci, C (2022). Siendo la temperatura una de las variables para una conversión eficiente y la obtención de un biodiésel que cumpla con los estándares de calidad requeridos. Se espera que el diseño de un controlador para regular el sistema a la temperatura deseada mejorará el proceso de producción de biodiésel.

Referencias

[1] Carter, D., & Halle, J. (2005). How to Make Biodiesel. Low-Impact Living Initiative (Lili).
[2] Prasad, S., & Ingle, A. P. (2019). Impacts of sustainable biofuels production from biomass. En Elsevier eBooks (pp. 327-346). https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817654-2.00012-5
[3] Carlucci, C. (2022). An Overview on the Production of Biodiesel Enabled by Continuous Flow Methodologies. Catalysts, 12(7), 717. https://doi.org/10.3390/catal12070717
[4] Zapata, B. y. L., González, J. P. C., Medina, M. A., & Gutiérrez, P. E. Á. (2018). Automatización y Puesta en Operación de un Reactor Biodiesel. Pistas Educativas, 35(108). http://www.itc.mx/ojs/index.php/pistas/article/download/1373/1189
[5]Tiwari, A., Rajesh, V., & Yadav, S. (2018). Biodiesel production in micro-reactors: A review. Energy Sustainable Development/Energy For Sustainable Development, 43, 143-161. https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.01.002

Zacatepec, Morelos como zona potencial para el desarrollo de diésel sintético sustentable

Azazel Sinai García Morales*, Marisol Cervantes Bobadilla**, Jarniel García Morales**, Nicolás Raymundo Calvo*
*Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec.
**Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

Introducción

El cambio climático nos obliga a buscar nuevas formas de energía que sean más limpias. Una de ellas es el diésel sintético [1], que se puede fabricar con hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2), ayudando a reducir la contaminación.
Este proyecto analiza si Morelos, por su buen clima, recursos naturales y desarrollo industrial, es un buen lugar para producir este tipo de combustible como se ilustra en la Fig. 1, todo ello con la idea de aportar un futuro más limpio y sostenible.

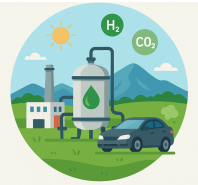


Fig. 1
Producción de diésel sintético a partir de CO_2 e hidrógeno verde

Contenido principal

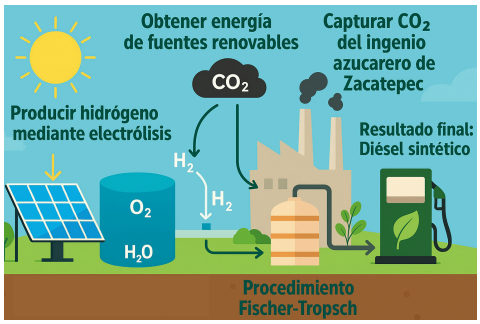
¿Qué es el diésel sintético?
Es un combustible [2] que se puede fabricar a partir del hidrógeno (H_2) y el dióxido de carbono (CO_2). Es más limpio y puede ayudar a reducir las emisiones.
¿Cómo se produce el diésel sintético mediante el proceso Fischer-Tropsch?
Este requiere condiciones específicas de temperatura (200-350 °C) y presión (20-40 bar), así como catalizadores de cobalto o hierro para transformar el CO_2 y H_2 en hidrocarburos líquidos.
¿Por qué Morelos es un buen lugar para esto?
Tiene mucho sol, y una industria azucarera activa. Las fábricas de azúcar generan CO_2 que se puede aprovechar como se muestra en la Fig. 2, y hay recursos naturales para producir hidrógeno verde [3].



Fig. 2
Transición hacia una industria más amigable con el ambiente

¿Por qué Zacatepec es ideal para producir diésel sintético? Zacatepec, Morelos: el lugar ideal para transformar CO_2 en energía limpia del ingenio azucarero.

¿Por qué Zacatepec?
El estado de Morelos cuenta con dos ingenios azucareros, en Cuautla y Zacatepec.
El ingenio ubicado en Zacatepec, cuenta con terrenos amplios (684 hectáreas) y una radiación solar de 5,5 kWh/m², lo que lo hace ideal para generar energía limpia.
El ingenio produce mucho bagazo, un residuo útil para generar energía que puede alimentar el proceso.
Las emisiones de CO_2 del ingenio pueden capturarse y aprovecharse como materia prima para el diésel sintético
Además, se puede producir hidrógeno verde mediante energía solar y electrólisis del agua como se muestra en la Fig. 3



Según estimaciones iniciales la planta piloto para Zacatepec tendría una capacidad de producción de 2,2 - 3 millones de litros anuales, utilizando aproximadamente 7250 toneladas de CO_2 capturado y 59.700 MWh/año de energía generada para la producción de hidrógeno verde

Fig. 3
Representación del proceso de producción del diésel sintético

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

¿Cómo impacta esto en tu vida y en tu comunidad?
✓ Menos contaminación en el aire al usar diésel sintético en lugar del tradicional, lo que mejora nuestra salud
✓ Se aprovecha el sol para producir energía más limpia
✓ Oportunidades para Morelos: la industria azucarera de la región puede ayudar en la producción del combustible y crear empleos
✓ Contribución al combate contra el cambio climático en entornos urbanos como se muestra en la Fig. 4, ya que se reutiliza el dióxido de carbono (CO_2) que normalmente se liberaría a la atmósfera, ayudando a reducir el calentamiento global



Fig.4
Aplicación de tecnologías sostenibles en entornos urbanos

Conclusión o mensaje final

El uso de energías más limpias es clave para lograr un futuro más saludable y sostenible. El diésel sintético, cuando se produce de manera responsable, es una alternativa que no solo reduce la contaminación, sino que también aprovecha recursos disponibles y ayuda a combatir el cambio climático. Zacatepec tiene todo el potencial para ser parte de esta transformación, con sus condiciones naturales y su industria, puede convertirse en un ejemplo de cómo generar energía sin dañar el medio ambiente. ¡Es hora de invertir en un futuro más limpio para todos!

Referencias "Para saber más"

[1] Combustibles sintéticos (EMAN)
https://emaningenieria.com/combustibles-sinteticos-una-alternativa-renovable/
[2] Fischer-Tropsch Synthesis (ScienceDirect)
https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/fischer-tropsch-synthesis
[3] Agencia Internacional de Energía (IEA)
https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen

MEMORIAS DEL CONGRESO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA Y CIENCIA APLICADA (4to CITCA 2025)
21-23 de Mayo 2025, Cuernavaca, Morelos

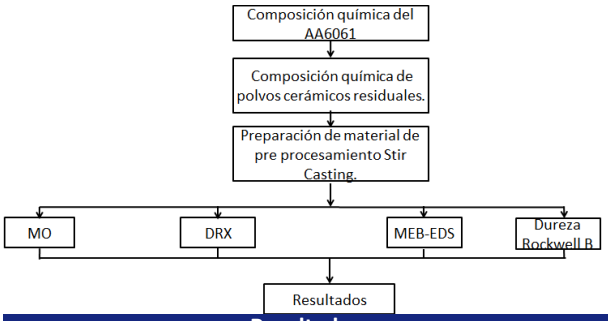
Fabricación de un material composito con matriz de aluminio 6061 reforzado con cerámica residual.

Vanessa Andrés Méndez , Dr. Orlando Soriano Vargas, Dr. Roberto López Ramírez, Dr. Jorge Edmundo Mastache Mastache, Dr. Tomas de la Mora, Dr. Nicolás Cayetano Castro
Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán
Instituto Politécnico Nacional
Universidad Tecnológica de Zinacantepec

Introducción

Las aleaciones de aluminio AA6061 son ampliamente utilizadas en la industria del transporte por su bajo peso y buena resistencia a la corrosión. Sin embargo, su baja dureza limita su uso en componentes sometidos a fricción, como partes internas de motores, para mejorar su resistencia al desgaste, se han desarrollado compuestos de matriz metálica (MMC) reforzados con partículas cerámicas como mullita y circón. Estudios recientes demuestran que estos refuerzos, aplicados mediante fundición por agitación (investment casting), mejorando significativamente la dureza, la resistencia al desgaste y la durabilidad del material, estas mejoras permiten extender el uso del AA6061 a aplicaciones más exigentes [1], ofreciendo soluciones más eficientes y sostenibles para la industria del transporte.

Contenido principal (Metodologia)



Resultados

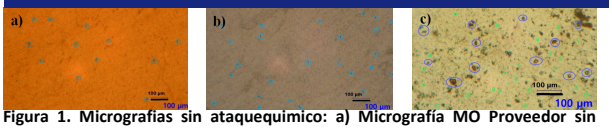


Figura 1. Micrografías sin ataquequimico: a) Micrografía MO Proveedor sin ataque químico (x40); b) Micrografía MO de la AA6061-T6-Refundida sin ataque químico a 40x; c) Micrografía MO del compóisito AA6061-T6-Mullita/Zircón-1% a x40, sin ataque químico.

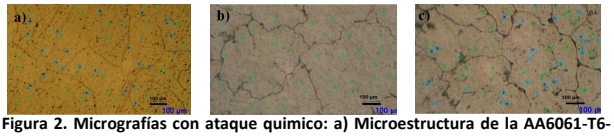


Figura 2. Micrografías con ataque quimico: a) Microestructura de la AA6061-T6-Proveedor 40x.; b) Micrografía MO de la AA6061-T6-Refundida, x40; c) Micrografía MO del compósito AA6061-T6-Mullita/Zircón-1% a x40, con ataque químico.

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Este material composite mejora la resistencia al desgaste y durabilidad de la AA6061, utilizándose en piezas internas de motores, su aplicación en la industria del transporte permite fabricar vehículos más ligeros, eficientes y duraderos.

Referencias

[1]G. Mathers, The welding of aluminium and alloys. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2002, pp. 1–5.

[2] Aluminio.org, "Aluminium Standards y Data," 2013.

[3] RADVER, "RADVER Investment Casting," Empresa Fundidora de Aluminio, 2007. [En línea]. Disponible en: https://www.radver.com/procesos/investment-casting-fundicion-a-la-cera-perdida.html.

[4] E. Herrera Pérez y O. A. Zárate Trejo, Fabricación y caracterización de materiales compuestos de matriz metálica 6061 reforzados con partículas cerámicas mediante metalurgia de polvos. Facultad de Química, UNAM, 2021. Disponible en: https://repositorio.unam.mx/contenidos/3582937.

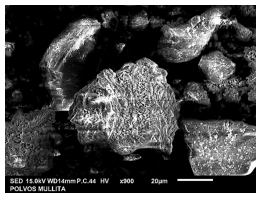


Figura 3. Análisis MEB-EDS de polvos Mullita/Zircón.

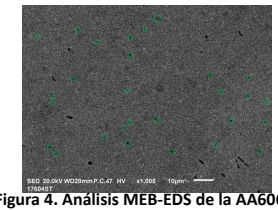


Figura 4. Análisis MEB-EDS de la AA6061-T6 del proveedor sin ataque químico.

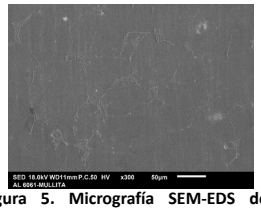


Figura 5. Micrografía SEM-EDS de la AA6061-T6-Refundida.

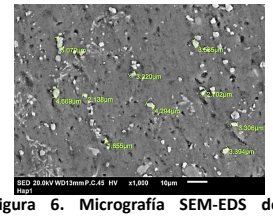


Figura 6. Micrografía SEM-EDS del composito.

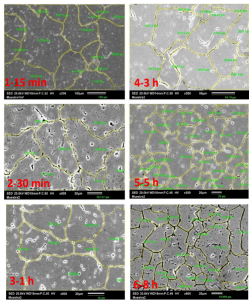


Figura 7. Micrografías con estimación de área para cada grano Aleación-Refundida y envejecida en diferentes tiempos a) 15 min, b) 3-4 hrs, c) 2-30 min d) 5-5 hrs, e) 1-3 hrs, f) 6-8 hrs.

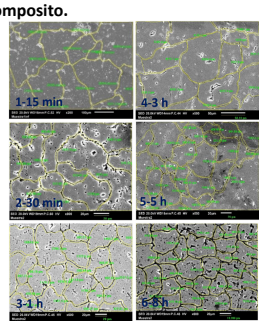


Figura 8. Micrografías con estimación de área para cada grano del composito a) 1-15 min, b) 3-4 hrs, c) 2-30 min, d) 5-5 hrs, e) 1-3 hrs, f) 6-8 hrs.

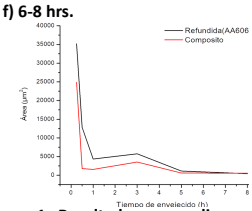


Diagrama 1. Resultados promedio para el área de grano del AA6061-Refundida y del Composito.

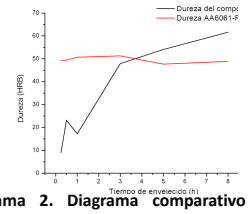


Diagrama 2. Diagrama comparativo de dureza de la AA6061-Refundida y Composito.

Conclusión

Este trabajo demostró que añadir solo un 1% en peso de micropartículas de Mullita/Zirconio (tamaño medio de 3,41 µm) a la aleación de aluminio AA6061 mediante stir casting incrementó significativamente su dureza en un 26% tras 8 horas de envejecimiento artificial, alcanzando 61,63 HRB. Los análisis confirmaron una buena dispersión de las partículas, creando un composite. Aunque el estudio se centró solo en la dureza con un único porcentaje de refuerzo y técnica de fabricación, los resultados sugieren el potencial de esta combinación de materiales reciclados y procesos accesibles. Se recomienda para futuras investigaciones explorar diferentes porcentajes de refuerzo, tratamientos térmicos y otras propiedades mecánicas para evaluar su viabilidad en aplicaciones industriales.

ISBN: En trámite

Modelado matemático de bioprocesos: una herramienta clave para la sustentabilidad y la bioeconomía

Ana Guadalupe Hernández Acevedo[a*], Martín Rogelio Cruz Díaz[b], María Aurora Martínez Trujillo[a]
[a] Tecnológico Nacional de México: Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. *anaghdz1984@gmail.com
[b] Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Los **bioprocesos** emplean microorganismos, células o enzimas para transformar materias primas en productos como alimentos, fármacos, bioplásticos o biocombustibles. Son una alternativa cada vez más importante frente a procesos industriales convencionales, que suelen ser costosos y poco sostenibles.

Sin embargo, diseñar y escalar bioprocesos implica enfrentar una alta complejidad biológica, química y operativa**. El modelado matemático** surge como una herramienta poderosa para entender, predecir y optimizar estos sistemas, permitiendo avanzar hacia una producción más eficiente, segura y amigable con el ambiente.



Los modelos en bioprocesos

¿Qué es el modelado matemático?

El modelado matemático es la representación de un bioproceso mediante ecuaciones para simular, predecir y optimizar su comportamiento.





Tipos de Modelos

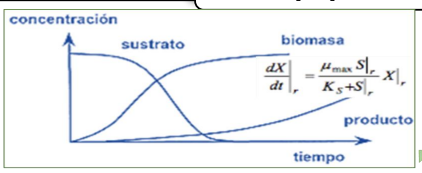
Mecanicistas
Basados en principios físico-químicos y biológicos.

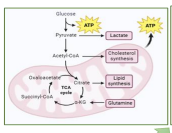


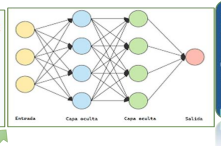
Basados en datos
Probabilísticos, estadística, inteligencia artificial, aprendizaje automático

Híbridos
Combinan ambos enfoques, para lograr modelos más precisos

El papel del modelo en un bioproceso







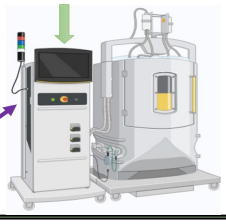


Bioprocesos → Experimentación → Modelo Matemático → Escalamiento → Producto Final



Parámetros críticos

Controladores



Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana

El modelamiento matemático en bioprocesos impacta de manera tangible el entorno y nuestra calidad de vida:

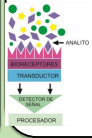
- **Optimiza** la producción de fármacos, enzimas y alimentos funcionales al ajustar condiciones clave con menor uso de recursos
- **Aprovecha residuos agrícolas** al simular condiciones ideales para convertirlos en bioproductos.
- **Disminuye costos y riesgos** al predecir resultados antes de experimentar en planta.
- **Diseña procesos limpios y eficientes** sin necesidad de ensayos contaminantes.
- **Impulsa la economía circular** al integrar sustentabilidad desde el diseño del proceso..

"¿sabías que…?"

El mercado global de bioproductos supera los **700 mil millones de dólares.**

Un modelo bien ajustado **reduce experimentos**, reactivos y energía.

Se utilizan modelos actualmente para diseñar bioplásticos, vacunas, probióticos, biosensores y enzimas.



El modelamiento ajusta condiciones en tiempo real para asegurar productos de alta calidad sin pruebas costosas. También permite crear **sensores virtuales** para monitorear variables críticas sin instrumentos físicos.

Conclusión o mensaje final

El **modelado matemático** es una herramienta clave para diseñar bioprocesos. A través de la simulación y optimización de variables, permite reducir el uso de recursos y minimizar la generación de residuos. En bioprocesos como la producción de biocombustibles a partir de residuos agrícolas, permite definir condiciones óptimas para maximizar el rendimiento con menor impacto ambiental. Así, fortalece la **bioeconomía** al hacer más eficientes y sostenibles los procesos desde su etapa de diseño.

¡Modelar bioprocesos es construir un futuro más sostenible!

Referencias "Para saber más"

- Oruganti, R. K., Biji, A. P., Lanuyanger, T., Show, P. L., Sriariyanun, M., Upadhyayula, V. K., ... & Bhattacharyya, D. (2023). Artificial intelligence and machine learning tools for high-performance microalgal wastewater treatment and algal biorefinery: A critical review. Science of The Total Environment, 876, 162797.
- Hernandez, A. A. G., Membrillo, V. I. de L., Arcos, C. J. A., Aguilar, A. G., Martínez, T. M. A., & Cruz, D. M. R. (2024). Experimental study and mathematical modeling of the pectinases production by *Aspergillus flavipes* FP-500 in an airlift bioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, *211*(August). https://doi.org/10.1016/j.bej.2024.109472.
- Narayanan, H., Luna, M. F., von Stosch, M., Cruz Bournazou, M. N., Polotti, G., Morbidelli, M., ... & Sokolov, M. (2020). Bioprocessing in the digital age: the role of process models. Biotechnology journal, 15(1), 1900172.

Análisis de fuerzas de estrés mecánico que actúan sobre una máquina Trituradora de Plástico.

Javier Samael Martínez Morales*, Carlos Alberto Badillo Ruiz**, Cristian Antonio Concha Reyes*Raúl Reyes Lima*.
*TecNM-Instituto Tecnológico de Iztapalapa.
**Instituto Politécnico Nacional-UPIICSA.

Resumen

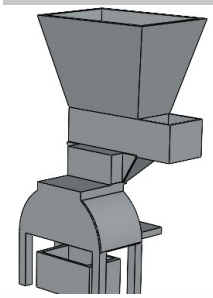
En este trabajo de investigación se propuso desarrollar una máquina trituradora de plástico (botellas PET), con el fin de disminuir la contaminación ambiental y generar nuevos materiales de construcción. Por lo que, se realizó un estudio de esfuerzos principales, es decir, tensión, compresión, cortante y flexión, además del análisis de deformaciones mecánicas elásticas y plásticas. El análisis permite evaluar el estrés por fatiga y fuerza de torsión y su impacto en la estructura.
Los estudios mecánicos muestran que la máquina no sufre deformaciones significativas, es decir, la eficiencia se incrementa al aumentar la velocidad de 1750 RPM a 3937.5 RPM, logrando una aceleración de 1.37 m/s² y un torque de 9.00 Nm, manteniendo estabilidad y rendimiento óptimos.

Introducción

Su función principal es reducir el tamaño de partícula de los residuos plásticos para facilitar su procesamiento y reincorporación en los materiales ocupados para la construcción. El análisis de las fuerzas de estrés mecánico en una trituradora de plástico es fundamental para asegurar su eficiencia y durabilidad. Las fuerzas como la compresión, torsión y vibración, afectan el rendimiento y la seguridad del equipo. Este estudio busca identificar y evaluar los esfuerzos mecánicos para optimizar el diseño de la máquina, mejorar su funcionamiento y prevenir fallos estructurales.

Metodología

La metodología se divide en dos fases: simulación y de experimental. En la fase experimental utilizaremos una trituradora de plástico equipada con sensores de peso e infrarrojo para medir las fuerzas mecánicas durante su funcionamiento. Los datos recolectados se procesan con softwares para modelar las fuerzas que actúan sobre la máquina bajo diferentes condiciones operativas como fase de triturado, llenado y reposo. Este enfoque permite evaluar el impacto de los esfuerzos mecánicos y optimizar el diseño de la trituradora para mejorar su eficiencia y resistencia, para el calculo de el peso aproximado de la maquina obtuvimos el peso de los 2 motores y el peso de los 18 m de PTR usados en la estructura al sumarlos nos dio el peso de 90.9 kg, al multiplicarlo por los 9.81 de la fuerza de gravedad, obtuvimos 891.729 N que corresponde a la fatiga que sufre la maquina.



Imágenes del diseño realizadas en un Software
Figura 1.

Figura 2. Fatiga mecánica

Cálculos Realizados

Cálculo para la Velocidad| lineal

$v = \omega \cdot r = (61.086\ \frac{rad}{s})(0.0127\ m)$ $v = 0.7757\ \frac{m}{s}$

Cálculo para la Velocidad Angular

$\omega B = 583.275\ (\frac{2\pi}{60s}) = 61.086$

cálculo para la velocidad de salida

$V_E = 1750 \bullet 3 = 5250\ rmp$

$V_S = 5250 \bullet 0.75 = 3937.5\ rmp$

Cálculos de las Aceleraciones

$A_T = \alpha.r = (1.0181\ \frac{rad}{s^2})\ (0.0127m) = 0.0129\ \frac{m}{s^2}$

$A_c = \omega^2.\ r = (61.086\ rad/s)^2\ (0.0127m) = 47.39\ \frac{m}{s^2}$

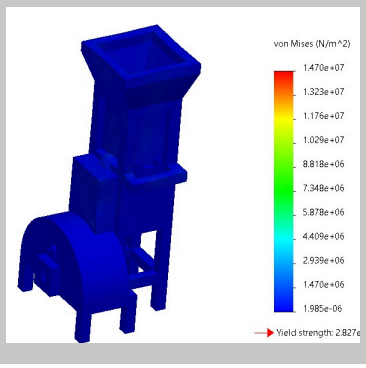
$A_\tau = \sqrt{(0.029\ \frac{m}{s^2})^2 + (47.39\ \frac{m}{s^2})^2} = 1.3743\ \frac{m}{s^2}$

Cálculo del estrés por Fatiga

Peso motor $\frac{1}{2}$hp = 7 kg
Peso motor 1 hp = 10 kg
Peso aprox de la estructura: 73.9 kg
Peso total = 90.9 kg

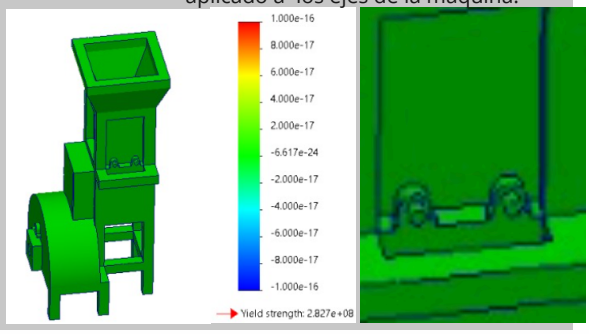
F= 90.9 kg • $9.81\ \frac{m}{s^2}$ = 891.729 N

Resultados



Observación de como la fuerza de torsión ejercida, afecta a toda la estructura.

Resultado de el estudio de torsion aplicado a los ejes de la maquina.



Conclusiones

El estudio mecánico muestra que la máquina de PET no presenta deformaciones. Al aumentar su velocidad de 1750 RPM a 3937.5 RPM, se demuestra una transmisión eficiente. Con una aceleración de 1.37 m/s² y un torque de 9.00 Nm, el sistema mantiene un buen equilibrio entre rendimiento y estabilidad, garantizando un funcionamiento óptimo.

Referencias

- libro de maquinas y mecanismos cuarta edición David H. Myszka.
- Mecanismos y Dinamica de maquinaria Limusa Wiley.
- Introducción a la Ciencia de los Materiales Y SUS PROPIEDADES Ane Miren Garcia Romero
  Nuria Monasterio Guisasola

ISBN: En trámite

EVALUACIÓN DE FACTORES EN PROCESO DE BIODEGRADACIÓN DE POLIESTIRENO

Eduardo García Ramírez, Alejandro Ruiz López, Ma. Elena Calixto Olalde , Varinia López Ramírez.
Instituto Tecnológico Superior de Irapuato
Departamento de ingeniería en materiales. Departamento de Ingeniería Bioquímica.

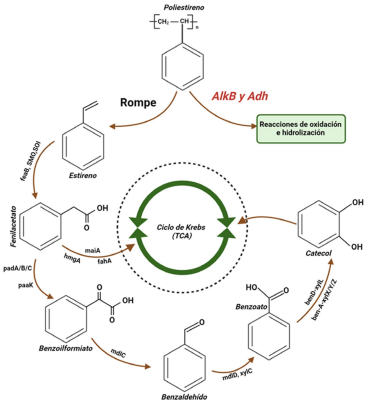
Introducción

Estudios recientes han mostrado el uso de bacterias, hongos y enzimas para la biodegradación del EPS. Por lo cual, el presente proyecto tiene por objetivo evaluar los factores que influyen en la biodegradación de poliestireno expandido utilizando cuatro cepas aisladas de Rio Lerma en Salamanca, Gto. Para este proceso, se seleccionaron cepas factibles para la biodegradación del poliestireno, mediante su reactivación y propagación en medio mineral (medio Tousson) con restricción de fuente de carbono. Las bacterias se adecuaron al medio con una inoculación secuencial, en donde se redujo el porcentaje de fuente de carbono, añadiendo poliestireno como fuente de carbono alterna. A la par re realiza análisis de densidad óptica durante el desarrollo de las etapas con el fin de demostrar que la presencia del extracto de levadura influye en la estabilidad del medio, ya que los matraces sin fuente de carbono presentan indicios de precipitación que pueden afectar la disponibilidad de nutrientes y la interacción de las bacterias.

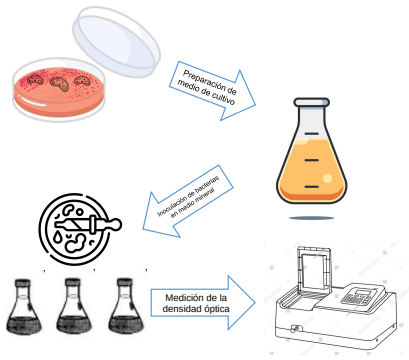
Contenido principal

La acumulación de poliestireno expandido (EPS) en el medio ambiente representa un problema significativo debido a su baja biodegradabilidad y su amplio uso en productos desechables. Si bien existen métodos tradicionales como reciclaje, incineración y gasificación, estos presentan impactos ambientales considerables, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles como la biodegradación microbiana. Estudios recientes han demostrado que microorganismos, como bacterias del género *Enterobacter* o la microbiota de *Tenebrio molitor*, tienen potencial para degradar EPS al reducir su peso molecular y transformar su composición bioquímica. Sin embargo, la eficacia de estos procesos depende de factores como el origen de los microorganismos y las condiciones experimentales (composición del medio de crecimiento). Este proyecto busca evaluar la biodegradación del EPS utilizando cuatro cepas aisladas del Río Lerma en Salamanca, Gto., como una posible solución ecológica al problema de los residuos plásticos.

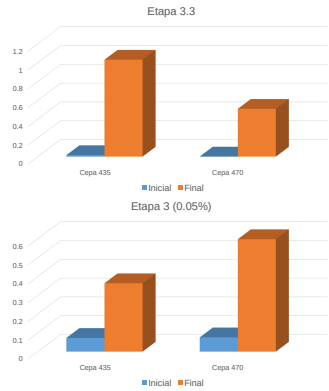
Imágenes y gráficas



Biodegradación



Metodología



Resultados

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

El poliestireno expandido o unicel es un polímero termoplástico de bajo peso usado en sectores como la construcción o el comercio de utensilios desechables. La acumulación descontrolada de plásticos en el medio ambiente ha generado un problema global, especialmente con materiales como el poliestireno expandido (EPS), debido a que posee una tasa de degradación extremadamente lenta. Actualmente existen diversos métodos para la disposición de residuos plásticos; vertedero, reciclado, incineración y gasificación. Cada uno de estos métodos presentan impacto ambiental, es por ello, que la degradación microbiana o biológica de plásticos de un solo uso, se presenta como una alternativa ecológica.

Conclusión

Los resultados obtenidos mediante densidad óptica sugieren que la presencia del extracto de levadura influye en la estabilidad del medio, con indicios de precipitación en ciertas concentraciones. Este fenómeno puede afectar la disponibilidad de nutrientes y la interacción de las bacterias con el poliestireno, impactando el proceso de biodegradación. Los análisis determinan que la presencia de precipitados influye en la actividad metabólica de las cepas y en la degradación del·EPS debido a la alta fluctuación en los resultados de densidad óptica, lo que impide llevar un control preciso del crecimiento por este metodo.

Referencias

Ramírez J.A, y Calixto M. E. "*BIODEGRACION DE POLIESTIRENO EXPANDIDO*". Departamento de ingeniería en materiales, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. 2023.
Marmanillo V. (2017). "*BIODEGRADACIÓN DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO CON MICROBIOTA INTESTINAL AISLADA DE TENEBRIO MOLITOR (TENEBRIONIDAE)*". International Technology Science and Society Review / Revista Internacional de Tecnología Ciencia y Sociedad. V11: https://doi.org/10.37467/revtechno.v11.4405.
Amézquita, F. D. (2013). "*ESPECTROMETRÍA DE MASAS*". Guanajuato: Universidad de Guanajuato.
Pérez, C. J. (2017). *Biodegradación de poliestireno por microorganismos aislados de un basurero municipal.* Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa: UAM.
Pulido, A. F. (2024). *Biodegradación Bacteriana de Poliestireno.* Bogotá: Universidad de los Andes.

ISBN: En trámite

Producción de papel ecológico a base de pasto común (*Pennisetum clandestinum*)

DIEGO SALAZAR ALVAREZ*
* FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS - UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO.

Introducción

La industria papelera ha generado preocupaciones ambientales debido a su dependencia de recursos forestales y al elevado consumo de agua, lo que impacta negativamente en los ecosistemas (García *et al.*, 2021). Como alternativa, el uso de residuos orgánicos como el pasto común (*Pennisetum clandestinum*) que se incluye como especie invasora y que amenaza la biodiversidad (CONABIO, 2019). Esta opción se presenta como una alternativa viable para la fabricación de papel ecológico.



Datos a considerar y de importancia

Para producir una tonelada de papel hacen falta unos 15 árboles y aproximadamente 200.000 litros de agua (Cabezas, 2023). Mientras que la solución planteada reduce el consumo de agua en escalas muy considerables como se muestra en la siguiente tabla:



	Biopast
Agua	100 000 l
Árboles	1.7 ton de pasto



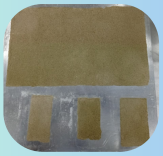
Proceso de elaboración y productos finales


Recolección de pasto


Secado del pasto después de la molienda


Medición del peso de la materia prima


Final del proceso térmico


Inicio del secado del papel


Producto final


Análisis bajo microscopio


Selección y clasificación

Relación con los ODS de la Agenda 2030

Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible
En la elaboración de este proyecto se busca gestionar, reducir y hacer mas eficiente el consumo del agua así mismo no generar residuos o contaminantes químicos en el agua empleada para que pueda ser y empleada en otros procesos agronómicos.

Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación
Se busca promover una industrialización del proceso y el producto fomentando técnicas de innovación que tengan como objetivo reducir la contaminación, reducir el consumo de agua y la tala de arboles.

Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles
Se fomentara a los consumidores al uso consciente del papel así mismo reducir el consumo excesivo.

Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos
Con la reducción de tala de arboles y reducción de contaminación se busca ayudar a reducir las consecuencias que hay por el cambio climático.

Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos
Al reducir el consumo de agua y no contaminarla con residuos químicos se busca que estas acciones reduzcan los daños a los océanos.

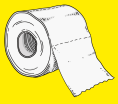
Objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad
Uno de los principales objetivos es la protección de bosques para reducir la tala de arboles.

Solución al problema

El producto elaborado empleando un proceso de momento artesanal donde incluye la recolección de pasto que generalmente es desechado en lugares donde puede generar más problemas que beneficios, el secado al aire libre de la materia prima, la selección y eliminación de residuos que no sean pasto, el proceso cocción, el prensado y el secado de las fibras del pasto, da como resultado un papel biodegradable y funcional. Este tipo de papel es ideal para el ámbito escolar, ya que puede utilizarse en cuadernos, hojas, sobres y actividades creativas. Entre sus principales beneficios se encuentra la reducción de la tala de árboles, el aprovechamiento de recursos locales, la facilidad de elaboración y su capacidad para descomponerse sin contaminar. Además, al ser de bajo costo y personalizable, representa una excelente alternativa para comunidades educativas, talleres de reciclaje y proyectos sustentables.

Impacto en la vida cotidiana





El papel ecológico elaborado a base de pasto común es una opción sustentable emergente e ideal para el ámbito escolar ya que reduce el consumo de papel tradicional en un sector de alta demanda. Teniendo múltiples aplicaciones como hojas, cuadernos, libretas y material didáctico, así mismo es un paso a fomentar la conciencia ambiental desde la educación. Su textura natural lo hace útil tanto para escribir como para actividades creativas, siendo una alternativa funcional y ecológica al papel convencional. Este producto sirve como base a la posible creación e innovación de productos en múltiples sectores como agrícolas, industriales, artístico, artesanal, etc.



Conclusión o mensaje final

Se puede elaborar papel ecológico para distintas aplicaciones o distintos tipos de papel a base de pasto común y otros residuos orgánicos, sin componentes químicos dañinos y no biodegradables, que pueden reducir el consumo de papel tradicional que demanda altas cantidades de agua y energía así mismo es una causa de la deforestación en el mundo, se debe ampliar la visión y el panorama en el sector del aprovechamiento de residuos orgánicos para elaborar productos amigables con el medio ambiente y que nos sirvan en el día a día.

Referencias

Cabezas, D. (2023). Día Mundial del Reciclaje: ¿sabes cuántos árboles se talan para hacer papel? LOS40. https://los40.com/los40/2023/05/17/actualidad/1684311867_650645.html

CONABIO. (2019). Especies exóticas invasoras en México: una amenaza a la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras

García, M., Hernández, P., & Silva, R. (2021). Impacto ambiental de la industria papelera y alternativas sostenibles. Revista de Ciencias Ambientales, 39(2), 45–59.

ISBN: En trámite

Aplicaciones informáticas como herramienta para la gestión de residuos en el sector manufactura

Gabriela Maqueda Rodríguez*
* Tecnológico Nacional de México. Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec

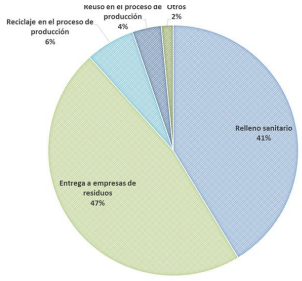
Introducción

En México diariamente se generan millones de toneladas de residuos provenientes del sector manufactura, desafortunadamente uno de los destinos principales de dichos desechos son los rellenos sanitarios (Gráfica 1). Respecto al reciclaje y al reúso en el proceso de producción, se reportan índices sumamente bajos a nivel nacional, donde el papel, el cartón y los plásticos representan los materiales más reciclados (Gráfica 2). A fin de contribuir en la gestión de residuos, en el presente se presentan algunas aplicaciones informáticas (apps) como herramientas auxiliares para transitar a un modelo de economía circular mediante negocios de reparación y prolongación de vida de uso de residuos.

Contenido principal

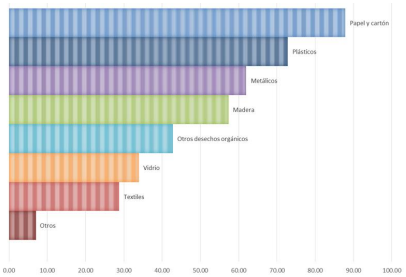
Uno de los principales elementos de la economía circular es el desarrollo de modelos de negocio innovadores, basados en conceptos disruptivos como el Reciclaje 2.0 y la segunda vida de materiales y productos. Dichos modelos emplean el uso de tecnologías que representan nuevas alternativas de tratamiento mediante el desarrollo de sistemas de gestión integral de residuos. Ejemplos son las aplicaciones informáticas (apps) relacionadas con el tratamiento de desechos (Figura 1), tales como: Recolapp (gestión de stock de la economía circular), Ecolana (mapa digital para iniciar en el reciclaje), Blau (herramienta tecnológica para digitalizar la gestión de residuos), y Biciclando (propuesta innovadora de reciclaje, reconocida a nivel internacional), entre otras.

Gráficas y Figuras



Gráfica 1. Destino principal de los materiales de desecho o residuos generados en el sector manufactura en México.

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, 2019



Gráfica 2. Tipo de residuo acorde con los índices de reciclaje.

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, 2019

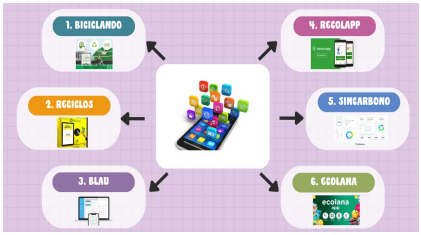


Figura 1. Aplicaciones informáticas relacionadas con el tratamiento de residuos.

Fuente: Elaboración propia

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana

Las apps representan una opción práctica y relativamente sencilla de adoptar, por lo que su incorporación en el sector manufactura es factible en términos de reparación, reutilización y extensión de residuos, así como en términos de la reinserción de éstos en las cadenas de valor. En general, contar con un modelo de negocio con estas características contribuirá a la reducción de los altos volúmenes de desechos dispuestos en sitios de confinamiento final (rellenos sanitarios, especialmente).

Respecto al impacto social, el uso de las apps en materia de gestión de residuos contribuye a la mejora en términos de salud pública, de la sostenibilidad urbana, e incluso incentiva la cultura ambiental ya que las aplicaciones informáticas permiten la automatización de procesos operativos y logísticos en términos de recolección, separación, transporte y reciclaje de residuos. Además, el impacto en la vida cotidiana se extrapola en términos de participación ciudadana, lo que incluso representa beneficios económicos a nivel local y en términos de reducción de residuos en espacios públicos y domicilios.

Mensaje final

Ante la generación masiva de residuos en el sector manufactura a nivel nacional, es necesario transitar hacia un modelo de economía circular basado en esquemas de negocio centrados en la reparación, reutilización y extensión que propicia el incremento del ciclo de vida de materiales considerados residuos. Por ello en el presente se propone considerar el uso de aplicaciones informáticas (Recolapp, Ecolana, Blau, Biciclando, etc.) para que la incorporación de tecnologías ambientales propicie la mitigación de la problemática asociada con la gestión de residuos de las millones de toneladas de desechos que se generan diariamente en México.

Referencias

INEGI (2019). Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/#Tabulados, el 12 de febrero de 2025.

ISBN: En trámite

PROTOTIPO DE MÁQUINA SECADOR DE HOJAS DE PAPEL RECICLADO

De la Cruz Ortigoza Mendez*, Karla América Gómez Carreón*, Andrea Sarahi Miranda Tlacomulco*, Elpidio Guerra León*
*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla.

Resumen Este proyecto presenta un prototipo innovador de una máquina secadora de hojas de papel reciclado. El objetivo es optimizar el proceso de secado, reduciendo el tiempo necesario y garantizando la calidad del papel, incluso en condiciones climáticas adversas.

Introducción



Muestra de papel reciclado obtenida del prototipo de máquina secadora

El reciclaje de papel es una práctica esencial para reducir el impacto ambiental y fomentar la sostenibilidad (Defalque et al., 2021). Sin embargo, el proceso de reciclaje puede verse afectado por factores climáticos, que prolongan el tiempo de secado y afectan la calidad del papel. El prototipo de máquina secadora de hojas recicladas optimiza este proceso, reduciendo el tiempo de secado de 14.25 horas a solo 30 minutos, lo que mejora tanto la eficiencia como la calidad del papel. Además, el papel reciclado puede ser reutilizado en productos de oficina, empaques sostenibles o compostaje, contribuyendo al uso eficiente de los recursos (Stenström, 2020).

Contenido principal

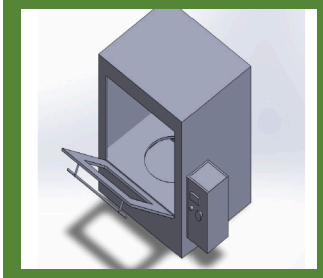
La máquina de secado de hojas de papel reciclado ha sido diseñada para:

- Acelerar el proceso de secado, reduciendo el tiempo requerido.
- Mantener la calidad y resistencia de las hojas recicladas.
- Darle una segunda vida al papel, promoviendo la sostenibilidad.
- Facilitar el proceso de secado del papel reciclado, incluso en condiciones climáticas desfavorables como mayor humedad relativa o presencia de lluvia, con el objetivo de mantener la logística de recolección y procesamiento sin interrupciones.

Mediante el uso de materiales resistentes al calor y un sistema de control de temperatura preciso, se logra un secado uniforme y eficiente, evitando la dependencia de las condiciones climáticas.

Método





Diseño 3D del prototipo de máquina secadora de hojas de papel reciclado en SolidWorks



Prototipo de máquina secadora de hojas de papel reciclado ensamblado



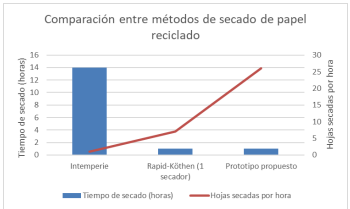
Prototipo de máquina secadora en funcionamiento.



Vista interior del prototipo de máquina secadora de hojas de papel reciclado

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana

La implementación de esta máquina representa una solución innovadora para centros de reciclaje, emprendedores y comunidades que buscan reducir el desperdicio de papel. Su diseño mejora el tiempo de secado de un aproximado de 14.25 hrs a la intemperie con un clima templado y cambiante en el tiempo, mientras que en la maquina RAPID-KÖTHEN (El laboratorio, s/f) con un solo secador seca 10 hojas en una hr, y el prototipo de maquina secadora propuesto seca un total de 26 hojas en una hr, lo que representa una optimización de tiempo significativo y costos al adquisición de esta tecnología.



Comparación del rendimiento entre 3 métodos de secado de papel reciclado
Nota (Imagen de elaboración propia)



FORMADOR DE HOJAS RAPID-KÖTHEN

Fuente: Laboratorio, E. P. F. H. de P. H. N. en. (s/f). FORMADOR DE HOJAS RAPID-KÖTHEN. Techlabsystems.com

Conclusión

La incorporación del prototipo de máquina secador de hojas disminuyó en un 97.75% el tiempo de secado de hojas de papel reciclado, basándonos en la formula para obtener el porcentaje de reducción (TI-TF/TI)*100, por lo que el secado de las hojas de papel reciclado representa una innovación clave en el proceso de reciclaje. Al reducir los tiempos de secado no solo se mejora la eficiencia y calidad del papel reciclado, sino que también contribuye considerablemente a la reducción de residuos y al aprovechamiento de recursos, sin importar las condiciones climáticas.

Referencias

- S. Stenström, "Drying of paper: A review 2000–2018," Drying Technology, vol. 38, no. 7, pp. 825–845, May 2020, doi: 10.1080/07373937.2019.1596949.
- Defalque, C. M., Marins, F. A. S., da Silva, A. F., & Rodriguez, E. Y. A. (2021). A review of waste paper recycling networks focusing on quantitative methods and sustainability. Journal of Material Cycles and Waste Management, 23(1), 55–76. https://doi.org/10.1007/s10163-020-01124-0
- El laboratorio, E. P. F. H. de P. H. N. en. (s/f). FORMADOR DE HOJAS RAPID-KÖTHEN. Techlabsystems.com. De https://techlabsystems.com/wp-content/uploads/2021/08/Formador_Hojas_RK-1-CAT-E-R3.pdf
- M. J. Guaquipana Rumiguano and P. A. López Gamboa, "Desarrollo de un sistema de control de temperatura para una secadora experimental cilíndrica de cacao," Universidad técnica de Cotopaxi, Latacunga- Ecuador, 2023.

IEMS CONTABLE: Aplicación Web Educativa para la Simulación Interactiva de la Declaración Anual

Nadia Susana Correa Martínez[*], Alexander Martínez González[*], Vanessa Martínez Hernández[*], Rosa Guadalupe Mejía Mora[*], Cornelio Morales Morales[**]

[*]Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No. 145, Av. Paseo Central km. 0.3, Centro, C.P. 76800, San Juan del Río, Querétaro, México.
[**]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, C.P. 76800, San Juan del Río, Querétaro, México.

INTRODUCCIÓN

El sistema educativo mexicano enfrenta un desafío crítico en la enseñanza de contabilidad a nivel medio superior. En el CBTis No. 145, los métodos tradicionales basados en memorización demuestran su ineficacia con índices de aprobación que varían drásticamente entre grupos (desde 85% hasta 45%). México presenta un rezago significativo en educación financiera (Arellano, 2023), donde la ausencia de formación práctica impacta directamente la capacidad de los estudiantes para tomar decisiones económicas informadas. Por ende, la brecha persistente entre teoría y práctica, junto con la falta de herramientas en la comprensión de los procesos tributarios complejos como la declaración anual, evidencia la necesidad urgente de desarrollar soluciones innovadoras que transformen el aprendizaje contable en una experiencia accesible y práctica para enfrentar los retos financieros de la vida real.

JUSTIFICACIÓN

IEMS CONTABLE surge como respuesta directa a las deficiencias en la enseñanza tradicional de contabilidad y procesos tributarios. Esta aplicación web se justifica por su capacidad para transformar conceptos abstractos en experiencias prácticas mediante simulaciones interactivas de la declaración anual. Los beneficios son múltiples: reduce significativamente el uso de papel (contribuyendo a la sostenibilidad ambiental), facilita la comprensión de conceptos complejos (potencialmente aumentando un 15% el rendimiento académico) y desarrolla habilidades financieras aplicables a la vida real. La plataforma responde a la necesidad urgente de modernizar los métodos pedagógicos, alejándose de la memorización para favorecer el aprendizaje experiencial. Al conectar teoría y práctica, IEMS CONTABLE no solo mejora el desempeño académico sino que prepara a los estudiantes para gestionar responsablemente sus finanzas personales y cumplir con sus obligaciones fiscales.

OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar una aplicación web educativa que facilite el aprendizaje de procesos tributarios y contables mediante simulación interactiva de la declaración anual.

Objetivos Específicos

- Implementar un entorno de simulación virtual que reproduzca el proceso de declaración anual ante el SAT.
- Integrar elementos interactivos y dinámicas lúdicas que transformen conceptos contables complejos en experiencias de aprendizaje accesibles y significativas.
- Mejorar en al menos un 15% la comprensión y aplicación de conceptos contables y tributarios entre los estudiantes del CBTis 145.

RESULTADOS

La herramienta **IEMS CONTABLE** conecta directamente con las necesidades diarias de quienes buscan llevar un mejor control de sus finanzas y cumplir con sus obligaciones fiscales. Al familiarizarse con el registro contable y la declaración anual, los estudiantes y sus familias pueden:

- **Evitar deudas innecesarias** al entender la importancia de presupuestar y administrar sus ingresos.
- **Fortalecer su economía familiar** gracias a una mejor toma de decisiones en gastos e inversiones.
- **Contribuir al crecimiento de la comunidad**, ya que la educación financiera reduce el rezago académico y fomenta la participación responsable en la economía formal.
- **Proteger el medio ambiente** al emplear una plataforma digital, disminuyendo la necesidad de impresiones y el uso de recursos físicos.

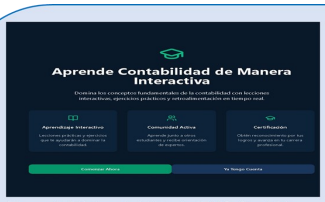


Figura 1. Página de inicio de IEMS Contable.

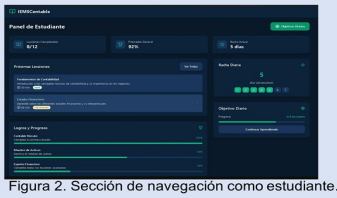


Figura 2. Sección de navegación como estudiante.



Figura 3. Establecimiento del rol del usuario.

Innovación al servicio de la educación contable

ALCANCES

- La aplicación web reproduce con precisión el proceso completo de declaración anual ante el SAT .
- El proyecto busca incrementar en al menos un 15% la comprensión de conceptos contables y tributarios.
- IEMS CONTABLE enfatiza el "aprender haciendo", permitiendo a los estudiantes cometer errores y aprender de ellos sin consecuencias reales.
- La plataforma funciona como un simulador didáctico.

CONCLUSIONES

La aplicación web IEMS CONTABLE representa una solución innovadora para los desafíos en la enseñanza contable y tributaria. Su enfoque de simulación interactiva transforma conceptos abstractos en experiencias prácticas, facilitando la comprensión de la declaración anual ante el SAT. Se proyecta un aumento del 15% en la comprensión conceptual, mayor confianza ante situaciones financieras reales y una reducción significativa en el consumo de papel. El impacto trasciende lo académico, mejorando la relación de los jóvenes con sus finanzas personales. IEMS CONTABLE demuestra cómo la tecnología educativa puede eliminar la brecha entre teoría y práctica, formando ciudadanos financieramente responsables capaces de impulsar su desarrollo personal y comunitario.

BIBLIOGRAFÍA

.Alegre, M (2023). Estrategias pedagógicas para la enseñanza de la contabilidad financieras basadas en teorías educativas. Universidad Autónoma de Asunción Paraguay.

.Álvarez, A. (2024). Educación sin fronteras; el arte de ser autodidacta. Infobae.

.Arellano, V. (2023). La educación financiera en México. Red de universidades Anáhuac.

.Esquematízate Editorial, (2024). ¿Cómo utilizar el juego como herramienta principal de aprendizaje en el aula?

ESTRATEGIAS DE ENGANCHE PARA EL APRENDIZAJE, CON JUEGOS FORMATIVOS Y EL ENFOQUE DIDÁCTICO CONSTRUCTIVISTA.

Arístides Caballero Alfaro*, Juan Reyes Reyes*, Gloria Lilia Osorio Gordillo*,Carlos Manuel Astorga Zaragoza*, Rodolfo Amalio Vargas Méndez*
*Tecnológico Nacional de México / CENIDET

Introducción

Los videojuegos educativos son una herramienta emergente para mejorar la participación de los estudiantes y facilitar experiencias de aprendizaje efectivas. Ofrecen entornos interactivos en los que los alumnos pueden explorar los conceptos a su propio ritmo, lo que hace que la educación sea más agradable e impactante. Sin embargo, es necesario implementar estrategias que los vuelvan una herramienta atractiva para los estudiantes. Estas estrategias pueden incluir el diseño de niveles desafiantes que fomenten la resolución de problemas, la incorporación de narrativas envolventes para mantener el interés y la adaptación del contenido a diferentes estilos de aprendizaje. En esta propuesta se plantean estrategias de enganche que se refuerzan con sinergia al enfoque didáctico constructivista.

Planteamiento del problema

Los videojuegos educativos son plataformas digitales diseñadas para facilitar el aprendizaje a través de juegos interactivos, lo que permite a los estudiantes interactuar con el contenido educativo de una manera divertida y motivadora. Las estrategias de enganche se aplican en rubros como la política y las ventas para conseguir resultados positivos al captar la atención del público y fomentar una mayor participación en las actividades propuestas, dentro de las disciplinas claves se encuentran la psicología, la planificación y la retorica, siendo elementos fundamentales la personalización, la narrativa, el manejo de las emociones y la interacción. En el ámbito de videojuegos está comprobado que la progresión personalizada, las experiencias adaptativas, la fantasía e inmersión y el equilibrio entre el desafío y la habilidad mantienen la motivación del jugador.

Estrategias de enganche, tipos de diversión y enfoque constructivista



¿sabías que...?

Estadísticas de mercado de videojuegos educativos, indican que solo el 20% de los estudiantes se sienten realmente comprometidos con este tipo de contenido, lo que plantea la necesidad de innovar en su diseño y enfoque. (Maslin et al., 2023)

Aprendizaje significativo y motivador a través de videojuegos

Planear estrategias adecuadas de enganche en videojuegos, relacionadas con las actividades de un enfoque didáctico constructivista, podrían generar experiencias que mantengan interesados a los jugadores y al cubrir estas necesidades, se facilitaría un aprendizaje más profundo y significativo, promoviendo no solo la adquisición de conocimientos, sino también el desarrollo de habilidades críticas con mayor motivación y disposición a explorar temas complejos y en última instancia, transformar la experiencia de aprendizaje en una aventura agradable.

Conclusión o mensaje final

Es evidente que en los videojuegos formativos no solo se deben cubrir objetivos educativos, se deben empezar a comprender otros aspectos que favorezcan la motivación y el interés de los usuarios. Al comprender y profundizar en los factores que influyen en la experiencia del jugador, se pueden desarrollar juegos más atractivos que no solo enseñen, sino que también mantengan a los estudiantes inmersos y motivados a aprender. Este estudio forma parte de un análisis más amplio que busca identificar las mejores prácticas en el diseño de videojuegos formativos.

Referencias "Para saber más"

Dhamija, A., & Dhamija, D. (2022). *Amalgamation of Game-Based Learning With Interactive Instructional Strategies for Active Learner Engagement*. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-7271-9.ch003
Hammami, H. (2024). Exploring the Mediating Role of User Engagement in the Relationship Between Immersive Experiences and User Satisfaction in Virtual Reality Gaming. *International Review of Management and Marketing*. https://doi.org/10.32479/irmm.17343
Poluru, N. V. (2024). Enhancing Student Authenticity and Engagement Through Gamification and Problem-Based Learning in Higher Education. *Advances in Media, Entertainment and the Arts (AMEA) Book Series*. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-8322-3.ch002
Yao, J., & He, C. (2023). *Engagement in Serious Games and Impact of Game Design Choices:Systematic Review (Preprint)*. https://doi.org/10.2196/preprints.53540
Hermawan, A. H., Bernarto, I., & Antonio, F. (2023). Video Game Engagement: A Passkey to the Intentions of Continue Playing, Purchasing Virtual Items, and Player Recruitment (3Ps). *International Journal of Computer Games Technology*. https://doi.org/10.1155/2023/2648097
Maslin, K., Murcia, K., Blackley, S., & Lowe, G. (2023). Fostering young children's creativity in online learning environments: A systematic literature review. *Thinking Skills and Creativity*. https://doi.org/10.1016/j.tsc.2023.101249
Deng, J., Lee, S., & Tan, Y. (2024). Flow of the Game: A Hidden Markov Model of Player Engagement in Online Mobile Games. *Information Systems Research*. https://doi.org/10.1287/isre.2021.0217

MEMORIAS DEL CONGRESO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA Y CIENCIA APLICADA (4to CITCA 2025)
21-23 de Mayo 2025, Cuernavaca, Morelos

Intervención educativa con tecnología y redes sociales

Elena Tzetzangary Aguirre Mejía*, Lilia Parada Morado**, Silvia Viridiana Parada Ávila*,
Rocío Lorena Rodríguez Chacón** , Francisco Eduardo Rodríguez Campos**
*TECNM - Instituto Tecnológico de la Laguna
**TECNM - Instituto Tecnológico Superior de Lerdo

Introducción

El índice de embarazo adolescente de un país esta relacionado directamente con el nivel de vida y la pobreza de sus habitantes (Soliz, 2021). Repercute en desigualdades sociales, económicas, laborales y culturales (CONAPO, 2019).

- Es un problema de salud pública, afecta negativamente la salud de las jóvenes y sus hijos.
- Es un problema educativo por deserción escolar.
- Es problema económico porque margina y posibilita mano de obra barata y condiciona ingresos (INEVAP, 2019).

Objetivo

Diseñar e implementar una intervención educativa con uso de tecnología y redes sociales dirigida a estudiantes nivel secundaria para mejorar conocimientos y reducir tasa de embarazo precoz.

Sabías qué



Resultados

Conocimiento real que tienen los jóvenes sobre factores relacionados al Embarao Adolescente

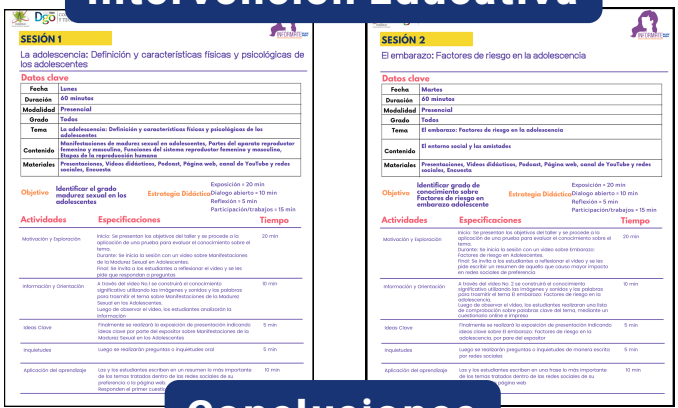


Para saber más

SIEADgo
@sieadurango
sieadurango

Podcast | Infografías | YouTube | Sitio Web | Juegos | Referencias y más

Intervención Educativa



SESIÓN 1

La adolescencia: Definición y características físicas y psicológicas de los adolescentes

Datos clave

Fecha	Lunes
Duración	60 minutos
Modalidad	Presencial
Grado	Todos
Tema	La adolescencia: Definición y características físicas y psicológicas de los adolescentes
Contenido	Manifestaciones de madurez sexual en adolescentes, Partes del aparato reproductor femenino y masculino, Funciones del sistema reproductor femenino y masculino, Etapas de la reproducción humana
Materiales	Presentaciones, Videos didácticos, Podcast, Página web, canal de YouTube y redes sociales, Encuesta

Objetivo	Estrategia Didáctica	
Identificar el grado madurez sexual en los adolescentes	Dialogo abierto = 10 min Reflexión = 5 min Participación/trabajos = 15 min	Exposición = 20 min

Actividades	Especificaciones	Tiempo
Motivación y Exploración	Inicio: Se presentan los objetivos del taller y se procede a la aplicación de una prueba para evaluar el conocimiento sobre el tema. Durante: Se inicia la sesión con un video sobre Manifestaciones de la Madurez Sexual en Adolescentes. Final: Se invita a los estudiantes a reflexionar el video y se les pide que respondan a preguntas.	20 min
Información y Orientación	A través del video No.1 se construirá el conocimiento significativo utilizando las imágenes y sonidos y las palabras para trasmitir el tema Manifestaciones de la Madurez Sexual en los Adolescentes. Luego de observar el video, los estudiantes analizarán la información.	10 min
Ideas Clave	Finalmente se realizará la exposición de presentación indicando ideas clave por parte del expositor sobre Manifestaciones de la Madurez Sexual en los Adolescentes.	5 min
Inquietudes	Luego se realizarán preguntas o inquietudes oral	5 min
Aplicación del aprendizaje	Los y los estudiantes escriben en un resumen lo más importante de los temas tratados dentro de las redes sociales de su preferencia o la página web Responden el primer cuestionario	10 min

SESIÓN 2

El embarazo: Factores de riesgo en la adolescencia

Datos clave

Fecha	Martes
Duración	60 minutos
Modalidad	Presencial
Grado	Todos
Tema	El embarazo: Factores de riesgo en la adolescencia
Contenido	El entorno social y las amistades
Materiales	Presentaciones, Videos didácticos, Podcast, Página web, canal de YouTube y redes sociales, Encuesta

Objetivo	Estrategia Didáctica	
Identificar grado de conocimiento sobre Factores de riesgo en embarazo adolescente	Dialogo abierto = 10 min Reflexión = 5 min Participación/trabajos = 15 min	Exposición = 20 min

Actividades	Especificaciones	Tiempo
Motivación y Exploración	Inicio: Se presentan los objetivos del taller y se procede a la aplicación de una prueba para evaluar el conocimiento sobre el tema. Durante: Se inicia la sesión con un video sobre Embarazo: Factores de riesgo en Adolescentes. Final: Se invita a los estudiantes a reflexionar el video y se les pide escribir un mini ensayo de aquello que obtuvo mayor impacto en redes sociales de preferencia	20 min
Información y Orientación	A través del video No. 2 se construirá el conocimiento significativo utilizando las imágenes y sonidos y las palabras para trasmitir el tema El embarazo: Factores de riesgo en la adolescencia Luego de observar el video, los estudiantes realizaran una lista de los factores de riesgo más importantes clave del tema, mediante un cuestionario online o impreso	10 min
Ideas Clave	Finalmente se realizará la exposición de presentación indicando ideas clave sobre El embarazo: Factores de riesgo en la adolescencia, por parte del expositor	5 min
Inquietudes	Luego se realizarán preguntas o inquietudes de manera escrita por redes sociales	5 min
Aplicación del aprendizaje	Los y los estudiantes escriben en una frase lo más importante de los temas tratados dentro de las redes sociales de su preferencia Ingreso web	10 min

Conclusiones

Se aplica intervención educativa con apoyo de Tecnología y redes sociales, se identifica el grado de conocimiento que tienen los jóvenes en temas importantes sobre el embarazo adolescente. La integración de contenidos y su difusión en redes sociales, permite que los jóvenes puedan consultar la información que detectaron ausente, aumenten y puedan valorar sus conocimientos mediantes las actividades interactivas diseñadas.

La intervención educativa puede ser replicada por instituciones educativas y docentes; los contenidos en el sitio web y redes sociales puede ser utilizado por los padres de familia, orientadores y tutores.

Toda la información es de acceso gratuito y se ha compartido publicamente.

ISBN: En trámite

"Planea con Inteligencia, Enseña con Vocación"

Una herramienta que transforma la planificación docente para cada estudiante y cada contexto.

Karla Nazareth Guerrero Sánchez*, Luis Alejandro Reyes Trigos**
* Secretaría de Educación Pública/ Secretaría de Educación de Veracruz

- Porque cada Estudiante lo vale … y cada Docente lo merece-

#DocenteConSentido

Planear una clase efectiva es un reto constante para los docentes, especialmente cuando cada grupo de estudiantes tiene estilos, ritmos y necesidades distintas.

Tradicionalmente, esta tarea consume tiempo y energía, dejando poco espacio para lo más importante: Que el alumno aprenda.

El GPP es una herramienta digital práctica que recopila información clave sobre el grupo.

Este enfoque no solo mejora la calidad de la enseñanza, también reduce el desgaste docente y promueve una educación más inclusiva y equitativa.

¿Sabías que...?

"Un docente enseña como aprende..."

¿Y si los estudiantes no aprenden de la misma forma?

Una buena planeación responde a las necesidades del estudiante.

El verdadero desafío del docente es conocer y responder a cada estudiante.

Planear una clase de forma manual puede tomar más de 5 horas por secuencia.

5 HR

Con el GPP, ese tiempo se reduce hasta en 60%, liberando al docente para enfocarse en que el alumno aprenda mejor.

− 2 HR

Gestor de Planeaciones Personalizadas (GPP):

Porque lo importante no es solo enseñar, sino lograr que cada alumno aprenda.



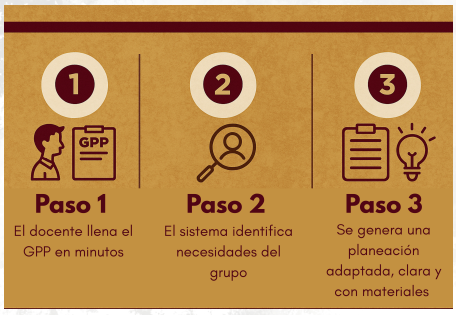
¿Qué es el GPP?

No es solo una encuesta. Es una herramienta inteligente y práctica que recopila lo esencial para personalizar cada clase:

- ¿Qué se debe enseñar? (grado, campo formativo)
- ¿Cómo se aprende mejor? (modelo pedagógico)
- ¿A quién se enseña? (diagnósticos, estilos, barreras)

Con esos datos, el sistema genera una planeación coherente, adaptada y lista para usar.

Ejemplo práctico 1, 2, 3...



"Porque cuando conocemos a nuestros estudiantes... aprenden mejor."

Aplicaciones prácticas en la vida cotidiana

Clases más claras y organizadas, con menos carga operativa para docentes.

Inclusión desde el aula al adaptar la enseñanza a las necesidades reales del grupo.

Equidad educativa, incluso en escuelas rurales o con alta diversidad.

Estudios muestran que planificar la enseñanza considerando las diferencias individuales del alumnado mejora la motivación, el aprendizaje y la equidad en el aula (Granda Asencio et al., 2019); (Soler & González, 2017); (Sánchez Barrios et al., 2015).

Docentes que emplean herramientas digitales y automatizadas reportan mayor satisfacción y mejores resultados educativos (Martínez, 2013); (Ortigueira-Sánchez & Gómez-Selemeneva, 2016); (Medrano Sáez et al., 2018).

Beneficio e Impacto

- **Menos tiempo en planeación** — De 5 a 1.5 hrs por secuencia
- **Planeaciones adaptables** — 70% se reutilizan
- **Más coherencia curricular** — Mejora del 46.88%
- **Más tiempo con el alumnado** — Menos papeleo, más atención real

Para saber más

- Awodiji, A., Agyemang, C.B., Boateng, F.G. & Dako-Gyeke, M. (2023). School leadership development for sustainability in the post-digital era. SFU Educational Review.
- Kowch, E.G. (2021). Leading transformation with digital innovations. In: Spector, J.M. (ed.) Digital Transformation of Learning Organizations. IGI Global.
- Rasdiana, R., Rachmawati, E. & Herianingrum, S. (2024). Digital leadership and teachers' innovation. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8(1), 1–17.

Contacto y Comunidad

gestioneducativadigital@outlook.com
www.gestioneducativadigital.org

(Próximamente)

#DocenteConSentido

"La automatización de la planeación didáctica no reemplaza al docente, lo respalda."

GPP es una herramienta ética y eficiente que fortalece la enseñanza, reduce el agotamiento y coloca al estudiante en el centro.

Estudio y optimización de una celda de combustible de intercambio protónico mediante la implementación de un sistema de control y modelado

Diana Montserrat Antonio Gordillo *, Betty Yolanda López Zapata*, Manuel Adam Medina **

* Universidad Politécnica de Chiapas.

** Centro nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Introducción

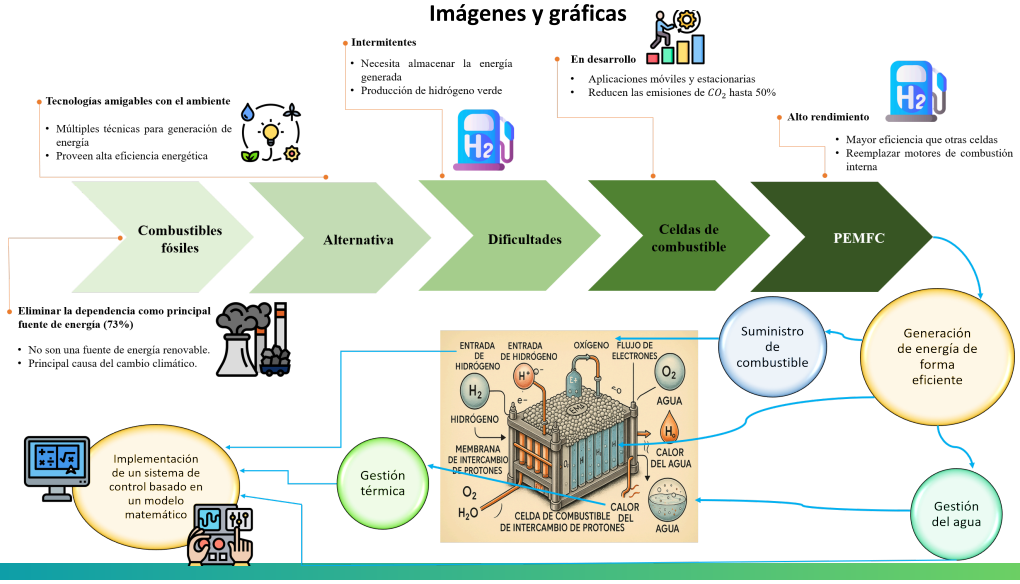
De acuerdo a la alta demanda de energía que existe hoy en día en México, la dependencia de los combustibles fósiles ha incrementado, sin embargo, esto impacta al ambiente debido al aumento de CO_2 en la atmósfera. Por lo tanto se destaca la importancia de las energías limpias, que son una alternativa viable para generar energía de manera eficiente y con bajas emisiones contaminantes. Las celdas de combustible de intercambio protónico (PEMFC, por sus siglas en inglés) son una tecnología eficiente para la conversión de energía quimica a energía eléctrica limpia. Sin embargo, se enfrenta a desafíos relacionados con la eficiencia, durabilidad y confiabilidad operativa.

Contenido principal

El modelado matemático permite representar de manera precisa el comportamiento dinámico de las celdas de combustible tipo PEMFC, lo que facilita el análisis de variables clave como la presión, temperatura, flujo de reactivos y distribución de corriente.

Estos modelos son fundamentales para diseñar sistemas de control que regulen el funcionamiento de la celda, permitiendo mantener condiciones óptimas de operación, mejorar la estabilidad del sistema y predecir su respuesta ante distintos escenarios.

Imágenes y gráficas



Sección "¿sabías que...?"

¿Sabías que las celdas de combustible tipo PEM sólo emiten agua y calor como subproductos? Y además, si se alimentan con hidrógeno producido mediante energías renovables como la solar o la eólica, su funcionamiento es completamente limpio: cero emisiones contaminantes y energía eléctrica continua con alta eficiencia.

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Las PEMFC pueden operar a temperaturas relativamente bajas (60 - 80 °C), lo que las hace ideales para aplicaciones en vehículos eléctricos y sistemas portátiles de energía. Esto se debe a su membrana electrolítica de polímero sólido (Nafion), que permite una conducción eficiente de protones a bajas temperaturas, además de ser compactas y de arranque rápido. Al ser utilizadas en vehículos, solo emiten agua como residuo y tienen una autonomía similar a los vehículos de gasolina, pero sin las mismas emisiones de CO_2 en la atmósfera.

Las PEMFC también se integran en dispositivos como computadoras portátiles, teléfonos móviles y equipos militares. Su uso en generación de energía de respaldo es crucial en sectores como el bancario, hospitalario y telecomunicaciones.

Conclusión o mensaje final

El modelado matemático y el diseño de sistemas de control son herramientas clave para entender y mejorar el comportamiento dinámico de las celdas PEMFC. Si bien no hacen directamente más eficiente al sistema, sí permiten desarrollar estrategias que optimicen su operación, confiabilidad y adaptabilidad en distintos entornos. Estas herramientas contribuyen a extender la vida útil, reducir fallos operativos y facilitar su integración en aplicaciones prácticas.

Referencias "Para saber más"

Y. Wang, X. Yang, Z. Sun, and Z. Chen, "A systematic review of system modeling and control strategy of proton exchange membrane fuel cell," Energy Reviews, vol. 3, no. 1, p. 100054, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.ENREV.2023.100054.

B. Gou, W. K. Na, and B. Diong, Fuel cells: Modeling, control, and applications. CRC Press, 2010. doi: 10.1201/9781420071627.

A. Alaswad et al., "Technical and commercial challenges of proton-exchange membrane (Pem) fuel cells," Energies (Basel), vol. 14, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.3390/EN14010144.

A. B. M. Ali, A. K. Nemah, Y. A. Al Bahadli, and Ehsan kianfar, "Principles and performance and types, advantages and disadvantages of fuel cells: A review," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 10, p. 100920, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.CSCEE.2024.100920.

IMPACTO DE IOT/IA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

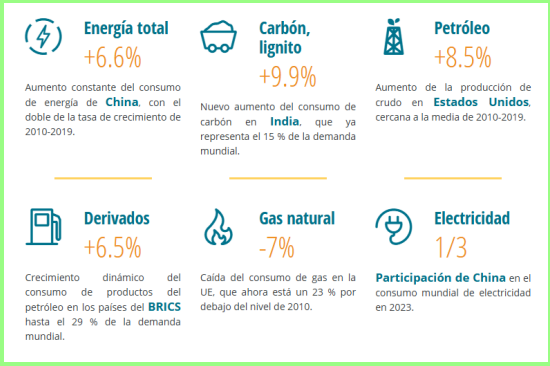
Aparicio Garcia William, Díaz Tapia José Ángel, García Escobar Delia Karen,

Introducción

La convergencia del Internet de las Cosas (IoT) y la Inteligencia Artificial (IA) está transformando la gestión energética en diversos sectores. Estas tecnologías permiten una monitorización y control más precisos del consumo energético, optimizando recursos y reduciendo costos y emisiones. Este póster explora cómo la integración de IoT e IA contribuye significativamente a la eficiencia energética en entornos urbanos, industriales y residenciales.

Hoy en día nuestro mundo no deja de crecer y la tecnología evoluciona constantemente. Como consecuencia de esto nos surge una pregunta, ¿Cómo podríamos satisfacer nuestro uso de energía sin dañar a nuestro planeta? Una posible solución sería la eficiencia energética, es decir, usar la energía necesaria sin sacrificar nuestra calidad de vida.

Estadística global 2023



Metodología

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque descriptivo-analítico, con el objetivo de explorar y analizar las aplicaciones de la integración del Internet de las Cosas (IoT) y la Inteligencia Artificial (IA) en proyectos urbanos, industriales y de infraestructura relacionados con la eficiencia energética.

1. Revisión Bibliográfica: Se consultaron fuentes y casos prácticos recientes sobre la aplicación de IoT e IA en eficiencia energética.
2. Análisis de Casos de Estudio: Se seleccionaron ejemplos representativos en distintos sectores para ilustrar el impacto real de estas tecnologías[1].
3. Síntesis de Resultados: Se integraron los hallazgos para ofrecer una visión comprensiva de los beneficios y desafíos asociados.



CARACTERÍSTICA	IOT	IA
Función principal	Recolecta datos en tiempo real desde sensores físicos	Analiza y toma decisiones en relación a datos complejos
Ventaja	- Monitoreo continuo - Control remoto - Datos precisos y actualizados	- Control inteligente - Reducción del consumo
Desventaja	- Requiere infraestructura física costosa - Riesgos de ciberseguridad	- Necesita grandes volúmenes de datos - Implementación compleja



Conclusiones

El hecho de implementar dos tecnologías tanto en lo personal como en el entorno urbano inteligente, a dado lugar a favorecer a una mayor eficiencia y menor consumo. Esto nos lleva a deducir que:

1. Impacto energético: Es destacable la reducción de costos en los diversos sectores industriales y comerciales, permitiendo un ajuste del consumo al recopilar los datos en tiempo real [1].

2. Aspecto ambiental: Las ciudades inteligentes y los edificios potenciados por la utilización de IA y IoT genera una acción en la sostenibilidad ambiental, dándole puerta a la reducción de emisores de CO_2 y otros contaminantes[2].

3. Retos y limitaciones: Implementar estas tecnologías podría causar costos elevados, así como la protección de los datos recopilados por los dispositivos seria un tema crucial para la implementación de medidas y políticas adecuadas[3].

Bibliografía

- [1] **Avasarala, V., & Sharma, S.** (2022). Energy Optimization for Smart Cities Using IoT. Applied Artificial Intelligence, 36(1), 1-20. https://doi.org/10.1080/08839514.2022.2037255 TandF Online
- [2] **Jain, R., & Sharma, V.** (2020). *Application of machine learning algorithms in smart energy systems: A review*. *Energy Reports*, 6, 719-730. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484718302671?via%3Dihub
- [3] **Smart Cities World**. (2023). *Barcelona and Copenhagen optimize street lighting with IoT*. Smart Cities World. Recuperado de https://www.smartcitiesworld.net
- Samsung Electronics. (2023). Samsung Electronics Sustainability Report 2023. Recuperado de https://www.samsung.com/global/sustainability/media/pdf/Samsung_Electronics_Sustainability_Report_2023_ENG.pdf Samsung

SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍAS RENOVABLES: CARACTERÍSTICAS Y BENEFICIOS EN COMUNIDADES MARGINADAS.

Ing. Nilber Cruz Arias, Dra. Susana Estefany De León Aldaco, Dr. Jesús Aguayo Alquicira
Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Introducción

A nivel mundial, aún existen comunidades que carecen de acceso a la electricidad y a internet. Esta carencia limita gravemente el acceso a la educación, el trabajo y la comunicación, generando una profunda brecha en un mundo cada vez más interconectado y acelerado [1].
Una alternativa viable para reducir esta desigualdad son las energías renovables, las cuales ofrecen fuentes limpias, sostenibles y disponibles de forma local. Sin embargo, su disponibilidad puede ser intermitente [2].

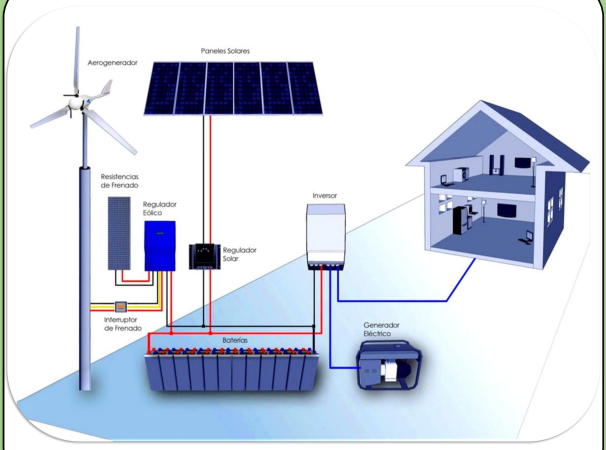


Figura 1. Ejemplo de estructura de un Sistema Híbrido de Energías Renovables. [4]

¿Sabías que…?

En México, más de 4,700 **comunidades rurales han sido electrificadas con sistemas híbridos** [6].

675 millones de personas en el mundo aún **viven sin acceso a la electricidad** [7].

Los Sistemas Híbridos de Energías Renovables

¿QUÉ ES UN SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍAS RENOVABLES?
Un sistema híbrido de energías renovables integra dos o más fuentes limpias (como solar, eólica o hidráulica) para extraer energía eléctrica según la disponibilidad de estas, lo que permite adaptarse a condiciones locales variables y garantizar un suministro confiable [3].

ELEMENTOS DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍAS RENOVABLES

Fuentes de generación de energía:
- ***Paneles solares fotovoltaicos***.
- ***Aerogeneradores***.
- ***Pequeños sistemas hidroeléctricos***, entre otros.

Equipos de gestión y conversión:
- ***Controladores y reguladores de carga.***
- ***Inversores.***

Elementos opcionales (según las necesidades):
- ***Baterías u otros sistemas de almacenamiento:*** Se utilizan principalmente en sistemas aislados.
- ***Generadores diésel:*** Como respaldo cuando la producción o almacenamiento de energía eléctrica no satisface la demanda [4].

Algunos de estos elementos se pueden ver en la **figura 1**.

SECUENCIA DE FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA HÍBRIDO
El siguiente ejemplo describe un funcionamiento general:
1. Durante el día soleado, la energía eléctrica se genera principalmente a partir de los paneles solares.
2. Si no hay sol, otras fuentes como turbinas eólicas o hidráulicas complementan la generación.
3. La energía generada llega al controlador inteligente que, junto con reguladores de carga, determina si se almacena en baterías o se envía al inversor.
4. Finalmente, el inversor adapta esta energía y la convierte en corriente alterna para para uso doméstico o conexión a la red [5].

BENEFICIOS EN COMUNIDADES MARGINADAS

Los sistemas híbridos de energías renovables permiten transformar las condiciones de vida en zonas sin acceso a la red eléctrica al proporcionar:

- ❑ **Iluminación** para hogares, escuelas y espacios comunitarios (**véase figura 2**).
- ❑ **Energía eléctrica** para centros de salud rurales (refrigeración de medicamentos, equipos médicos).
- ❑ **Facilidades para realizar actividades productivas**: bombeo de agua, carpintería, talleres, etc.

De esta manera, los sistemas híbridos de energías renovables permiten:

- ✓ Cubrir necesidades básicas e impulsar el desarrollo económico y social local [7].
- ✓ Una transición energética justa y evitar retrocesos sociales, especialmente en zonas vulnerables [8].



Figura 2. Iluminación de casa con paneles fotovoltaicos. [7]

Conclusión

Los sistemas híbridos de energías renovables representan una solución real y accesible para llevar energía eléctrica a comunidades que han vivido históricamente en condiciones de marginación energética, mejorando no solo la infraestructura, sino también la calidad de vida de las personas.
Invertir en energías limpias no es solo una decisión tecnológica, sino también una apuesta por la equidad, el desarrollo y el futuro de las comunidades.

Para saber más

[1] W. Ibrahim et al., *Optimized Energy Management Strategy for an Autonomous DC Microgrid Integrating PV/Wind/Battery/Diesel-Based Hybrid PSO-GA-LADRC Through SAPF*, MDPI, 2024. [DOI: 10.3390/technologies12110226].
[2] M. Ali et al., *Optimal Scheduling of Isolated Microgrids with Hybrid Renewables and Energy Storage Systems Considering Demand Response*, IEEE, vol. 11, pp. 80266–80273, 2023. [DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3296540].
[3] J. C. De León et al., *A Review of Hybrid Renewable Energy Systems: Architectures, Battery Systems, and Optimization Techniques*, MDPI, vol. 4, 2024. [DOI: 10.3390/eng4020084].
[4] J. J. Robert, *Proyecto de un Sistema Híbrido de Generación con Energías Renovables para un Establecimiento Rural Aislado*, ResearchGate, 2015. Disponible en: www.researchgate.net/publication/293950988.
[5] Iberdrola, *¿Qué es la energía híbrida?*, 2024. Disponible en: www.iberdrola.com/innovacion/energia-hibrida.
[6] SEMARNAT, *Electrificación rural para comunidades fuera de la red*, 2021. Disponible en: www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/690391/INFORME_Electrificacion_integrado18112021.pdf.
[7] IRENA, *Renewable Energy for Remote Communities: A Guidebook for Off-Grid Projects*, 2023. Disponible en: www.irena.org.
[8] IEA, *World Energy Outlook 2022*, International Energy Agency, 2022. Disponible en: www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022.

USO DE SEMICONDUCTORES COMO VARIADORES DE CARGA PARA SEGUIDOR DEL MÁXIMO PUNTO DE POTENCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Marco Antonio Zúñiga Reyes *,**, Carlos Eduardo Morales Jiménez *, Karina Lizbeth Escobar Sánchez *, Avisaí Sánchez Alegría *, Sergio Iván Díaz Hernández *, Roberto Carlos García Gómez *
* Tecnológico Nacional de México/IT de Tuxtla Gutiérrez.
** Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos del Estado de Chiapas.

Resumen

La generación de energía de los módulos fotovoltaicos (MFV) varía en función de la irradiancia solar (*G*), la temperatura (*T*) y otros factores ambientales, lo que significa que su punto óptimo de operación no es constante. Por lo tanto, un Seguidor del Punto Máximo de Potencia (MPPT) es un componente diseñado para ajustar continua y automáticamente la tensión y la corriente del MFV para localizar y mantener el punto de máxima potencia (MPP).

Utilizando algoritmos avanzados y dispositivos electrónicos, se optimiza la carga conectada al módulo, maximizando así la captación de energía. En la presente propuesta, se utiliza la variación de la amplitud del voltaje aplicado en la entrada de control de un dispositivo semiconductor. La cual es una opción de control distinta a la modulación por ancho de pulso (PWM).

Objetivos

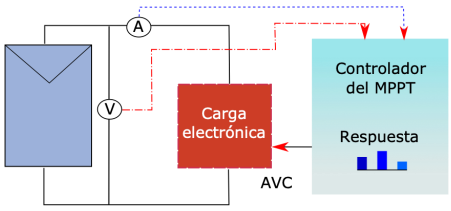
Objetivo general: Desarrollar un sistema electrónico que permita localizar el punto de máxima potencia de un módulo fotovoltaico usando potenciómetros digitales como variadores de carga.

Objetivos específicos:

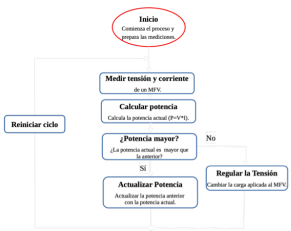
Implementar un circuito electrónico digital que permita modificar la carga electrónica aplicada a un módulo fotovoltaico.

Utilizar un dispositivo semiconductor controlado por voltaje mediante potenciómetros digitales como elemento de carga variable aplicado a un módulo fotovoltaico.

Metodología



a) Amplitud variable usada para controlar la carga electrónica.



b) Algoritmo básico del control de potencia entregada por un MFV.

Figura 1.- a) Esquema general. b) Algoritmo básico de control.

Resultados

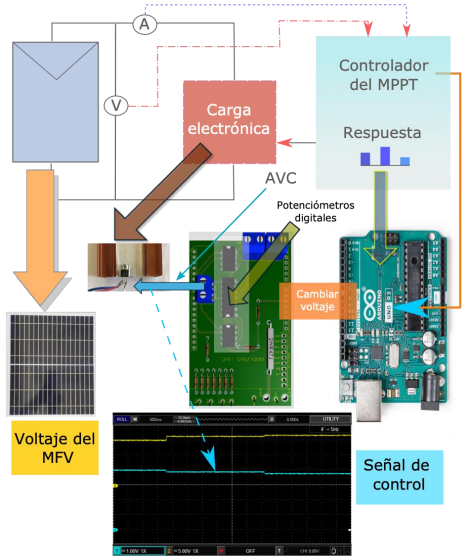


Figura 2.- Diagrama a bloques del circuito y pruebas realizadas.

Conclusiones

La búsqueda del punto de máxima potencia de un MFV es de relevancia para el diseño de inversores o controladores de carga de baterías. Una técnica de fácil aplicación es la de "Perturba y Observa", que implica un ajuste dinámico del punto de operación para encontrar y mantener el MPP. Los dispositivos semiconductores como el IGBT son controlados por voltaje, por lo tanto, el uso de potenciómetros digitales para provocar la variación de carga a un módulo fotovoltaico se presenta como una opción a la técnica de PWM.

Referencias

[1] El-Khozondar, H.J., El-Khozondar, R.J., Matter, K. et al. A review study of photovoltaic array maximum power tracking algorithms. Renewables 3, 3 (2016). https://doi.org/10.1186/s40807-016-0022-8.
[2] Mahdi, A.S., Mahamad, A.K., Saon, S. et al. Maximum power point tracking using perturb and observe, fuzzy logic and ANFIS. SN Appl. Sci. 2, 89 (2020). https://doi.org/10.1007/s42452-019-1886-1.
[3] I. M. Kirpichnikova y A. Yu. Sologubov, "Multivariable Control of Solar Battery Power by Extremum Seeking: Starting from Linear Analysis", Machines, vol. 7, núm. 4, 2019, doi: 10.3390/machines7040064.
[4] Huang, L., Pan, B., Wang, S., Dong, Y., & Mou, Z. (2024). Review on Maximum Power Point Tracking Control Strategy Algorithms for Offshore Floating Photovoltaic Systems. Journal of Marine Science and Engineering, 12(12), 2121. https://doi.org/10.3390/jmse12122121.

IMPORTANCIA DEL MONITOREO Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN TURBINAS HIDROCINÉTICAS EN CANALES DE AGUA

Fher Said Macedo-García*/**, Jaime Arau*, Manuel Adam-Medina*, Manuel Rico-Secades**
*Tecnológico Nacional de México, CENIDET, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.
** Universidad de Oviedo, EPI Gijón, C.P. 33203, Gijón, Asturias, España.

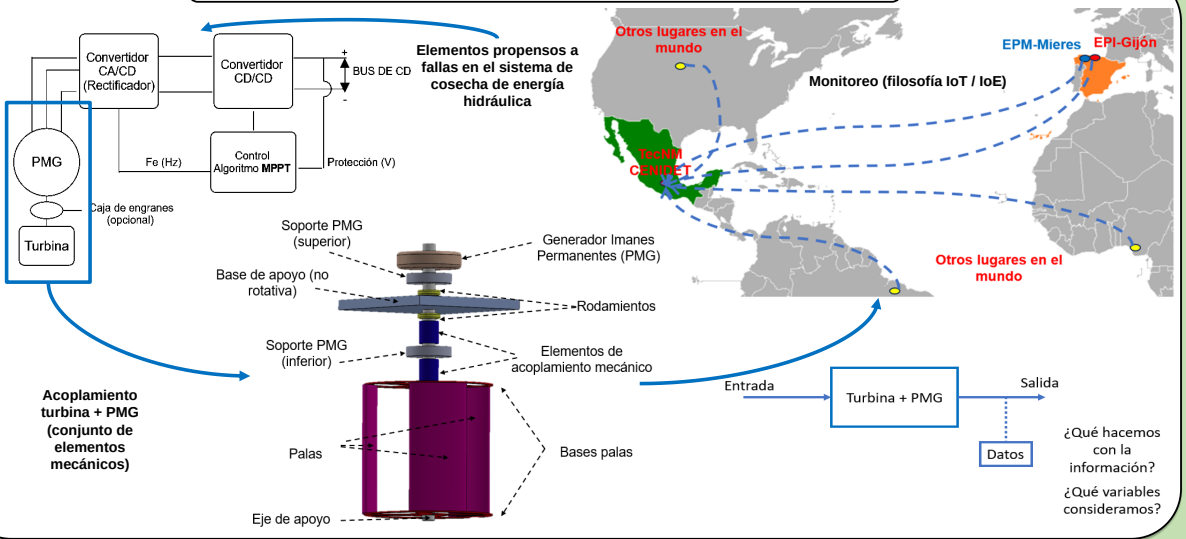
Introducción

Ante la creciente búsqueda por alternativas para obtención de **energía eléctrica sostenible**, se ha encontrado adecuado el uso de sistemas solares, eólicos, o hidráulicos, entre otros; sin embargo, los primeros dos tienen limitantes ya que dependen de variables como la irradiancia solar o velocidad del viento, lo que causa cambios inesperados en la **generación de energía**; a diferencia de los sistemas que aprovechan el flujo de agua con **turbinas hidrocinéticas**, colocándolas en ríos de bajo cauce o canales de riego, los cuales no presentan cambios bruscos en este sentido. Motivo por el que actualmente se siguen buscando soluciones tecnológicas y científicas aplicando la ingeniería para mejorar la **operación, mantenimiento, diagnóstico de fallas y monitoreo** de este tipo de sistemas.

Contenido principal

Las turbinas hidrocinéticas cuentan con **múltiples aplicaciones** y recientemente se han utilizado principalmente en canales de agua, sin embargo se han detectado algunas **fallas principales** de este tipo de sistemas, por lo que resulta muy importante e interesante poder contar con estrategias de diagnóstico de fallas y monitoreo. Las fallas pueden dividirse en dos grupos principales (**mecánicas y electrónicas**), en las cuáles se encuentra más las mecánicas derivado del esfuerzo y fatiga de los elementos a los que se someten este tipo de turbinas en el fluido, como **fallas en palas** (suciedades, deformaciones, roturas parciales o totales), así como rodamientos amarrados, entre otras. En el grupo de fallas electrónicas están las fallas en el PMG, regulación del bus de CD y **algoritmo MPPT** principalmente.

Imágenes y gráficas



Sección "¿sabías que…?"

Las turbinas hidrocinéticas instaladas en canales de agua aprovechan mejor el **recurso hídrico** a diferencia de instalarlas en ríos (campo abierto). Esto debido a lo que los expertos llaman: "**condiciones por bloqueo**", ya que se extrae energía de la altura del fluido adicional a la energía cinética del mismo. Por tal motivo ha resultado interesante el estudio de **sistemas de cosecha de energía** que utilizan turbinas en este contexto de instalación, por lo que es importante realizar esfuerzos tecnológicos y científicos para mejorar estas condiciones de operación [1].

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

El uso de las turbinas hidrocinéticas ha tenido un amplio crecimiento en los últimos años, ya que se han encontrado ventajas de instalación (económicas, tecnológicas y ambientales). Estas se han utilizado principalmente para electrificación rural, interconexión a la red, sistemas híbridos que combinan sistemas de turbinas hidrocinéticas con otros como solares o eólicos, estaciones de carga de vehículos eléctricos, etc. Motivo por el que el impacto social es alto, es importante contar con opciones económicas y confiables para el monitoreo y diagnóstico de fallas.

Conclusión o mensaje final

Los sistemas hidráulicos como alternativa para electrificación de comunidades alejadas de la red de distribución (entre otras aplicaciones más) son muy interesantes y viables, por tal motivo es importante el diagnóstico remoto de la correcta operación del sistema.

Actualmente se están realizando esfuerzos científicos y tecnológicos en diferentes campos y líneas de investigación, un ejemplo es una tesis doctoral en modalidad cotutela (TecNM CENIDET / Universidad de Oviedo) por parte de los autores de este material.

Referencias "Para saber más"

[1] M. Rico-Secades, A. J. Calleja-Rodríguez, A. Fernández-Jiménez, E. Álvarez-Álvarez, F. S. Macedo-Garcia y J. Arau-Roffiel, "**Design of a new hydrokinetic turbine simulation model based on the extended power coefficient concept**", Int. J. Elect. Power & Energy Syst., vol. 165, p. 110515, abril de 2025. doi:10.1016/j.ijepes.2025.110515

[2] A. Fernández-Jiménez, E. Blanco-Marigorta, A. Gharib-Yosry, V. M. Fernández-Pacheco, y E. Álvarez-Álvarez, "**Evaluation of a vertical axis hydrokinetic turbine for water channels**", Dyna (Spain), vol. 96, núm. 2, pp. 194–199, mar. 2021, doi: 10.6036/9883.

[3] P. Li y Y. Cao, "**A Fault-Tolerance MPPT Design and Model Analysis for Hydrokinetic Turbine Systems**", en 2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2023, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 252–257. doi: 10.1109/ECCE53617.2023.10362836.

[4] E. Peralta-Escobar, S.-R. Galván-González, G. Solorio-Díaz, N.-D. Herrera-Sandoval, and D. Cahue-Díaz, " **Estimation of the electrical energy provided by an irrigation canal with the design of a hydrokinetic turbine**", IEEE LAT AM T, vol. 23, no. 1, pp. 58–67, Dec. 2024.

ISBN: En trámite

COMPORTAMIENTO DE UNA PLACA DE HIERRO EXPUESTA A LA RADIACIÓN SOLAR

Rafael Guadalupe Solano Góngora, Juan Reyes Reyes, Jesús Arce Landa
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Introducción

La organización mundial de la salud (OMS) en 2010 estimaba que aproximadamente la mitad de la población mundial, quemaba carbón o leña para la cocción de sus alimentos o calentar agua. Actualmente las energías sostenibles se desarrollan de forma exponencial, como fuentes alternas, ecológicas, renovables, no contaminantes y amigables con el medio ambiente, proveyendo un modo de energía alterno para satisfacer las necesidades del hombre, utilizando la radiación solar como fuente de energía calorífica, utilizada para el calentamiento de agua, secado de frutas y verduras, así como la cocción de alimentos.

Formulación

Derivado del resultado de la primera ley de la termodinámica (*principio de la conservación de la energía*), ecuación número (1), se desarrolla el modelo térmico dinámico de una placa expuesta a la radiación solar, la cual se define a continuación.

$$\triangle_{syst} = E_{in} + E_g - E_{out} \quad (1)$$

Desarrollo

$$mc\frac{dT(t)}{dt} = \underbrace{-\alpha S\,(T(t) - T_{amb})}_{\begin{array}{l} E_{in} \quad \text{si} \quad T < T_{amb} \\ E_{out} \quad \text{si} \quad T > T_{amb} \end{array}} + AI(t)$$

Propuesta del modelo térmico dinámico simplificado

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\alpha S}{mc}(T(t) - T_{amb}) + \frac{A}{mc}I(t) \quad (2)$$

a) Una placa de hierro con las siguientes dimensiones

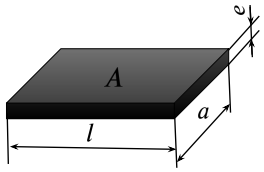


Fig. 1 Dimensiones de una placa de hierro

Donde:

$$S = 2A + 2ea + 2el \quad (3)$$

$$A = a \cdot l \quad (4)$$

b) Que $I(t)$ incide de manera perpendicular a la superficie A

Definición de variables:

- E_{in} : Energía de entrada
- E_g : Energía generada
- E_{out} : Energía de salida
- I : Radiación solar
- A : Área en contacto con el medio ambiente
- T_{amb} : Temperatura ambiente
- T : Temperatura de la placa
- m : masa de la placa
- c : calor específico de la placa
- S : área en contacto con el medio ambiente
- α : coeficiente asociado a la convección
- a : ancho de la placa
- e : espesor de la placa
- l : largo de la placa

Objetivo

Proponer un modelo dinámico simplificado partiendo de la primera ley de la termodinámica y la ley de enfriamiento de Newton para describir el comportamiento de una placa de hierro expuesta a la radiación solar.

Resultado

Enseguida se muestra el modelo dinámico de una placa expuesta a la radiación solar, desarrollado a partir de la sustitución de las ecuaciones (3) y (4) en la ecuación (2).

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\frac{2\alpha(al + ae + le)}{mc}(T(t) - T_{amb}) + \frac{al}{mc}I(t) \quad (5)$$

Para representar la radiación solar transitoria del día hacia la noche se propone la ecuación (6), graficada en la figura 2.

$$I(t) = 500\,[1 - tanh(t - 6)] \quad (6)$$

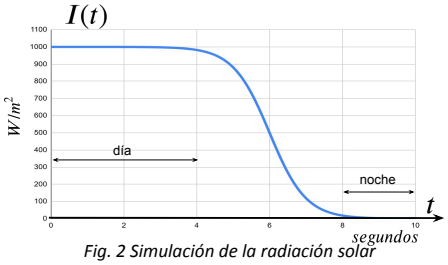


Fig. 2 Simulación de la radiación solar

El efecto de la temperatura de la placa expuesta a la radiación solar mostrada en la figura 2 se muestra en la figura 3.

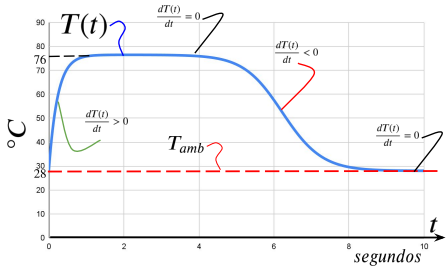


Fig. 3 Comportamiento de la temperatura partiendo de una simulación

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Hacer uso de la energía solar que está disponible a nivel nacional, aprovechando el poder calorífico a partir de la radiación solar. Teniendo como beneficios el calentar, deshidratar y cocinar alimentos, coadyuvando a la eliminación de la quema de leña, consumo de gas natural y la contaminación del medio ambiente.

Conclusión

El uso de la radiación solar en forma de energía térmica, nos permite tener una concentración eficiente de calor, para cocinar, calentar y deshidratar de forma segura, eliminando el alto consumo de combustible natural, electricidad o leña, disminuyendo la contaminación del medio ambiente.

Referencias

- Cinthya Y. Hernández-Cano a, Valery P. Juárez-Molina b, Josue Tejeda - Araujo (Primera Ley de la Termodinámica, 2025)
- Zinedine Adrian Arias Vera (Ley de enfriamiento de Newton, Diciembre 2022)
- P. E. Moreira Galván, O. Ortega Ruíz. *Ley de enfriamiento de Newton con temperatura variable*. Revista Mexicana de Física E 22 010218 1–6. January–June 2025
- Miguel Pareja Aparicio, Radiación solar y su aprovechamiento energético, Marcombo 2010

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN HORNO ELÉCTRICO.

Jesús Adrián Chávez Vázquez *, Jorge Barron Corrales*, Viridiana Guadalupe García López * , Enrique Saavedra Arroyo**,
* Instituto Tecnológico Superior de Irapuato.
** Instituto Tecnológico Superior de Irapuato.

Introducción

En algunas instituciones públicas de nivel superior se presentan una escasez en equipos de laboratorio, entre ellos los hornos eléctricos necesarios para prácticas de laboratorio que enriquecen los conocimientos de los estudiantes, por ello, hemos tomado la iniciativa de desarrollar un horno eléctrico capaz de alcanzar los 900°C cuyo consumo energético sea sustentable usando materiales accesibles y reciclados para mejorar el desempeño de los estudiantes.

Imágenes y gráficas

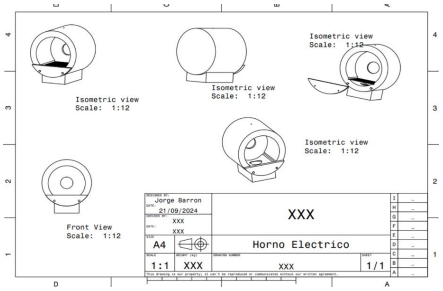


Fig. 1 Planos preliminares del horno eléctrico

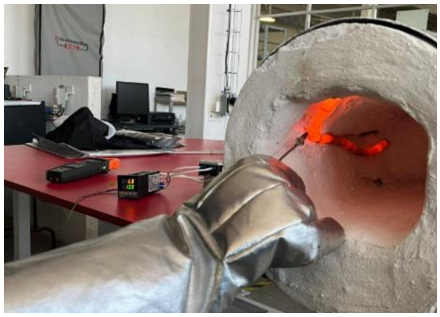


Fig. 2 Prueba de temperatura del horno

Contenido principal

El horno eléctrico cuenta con un diseño cilíndrico, lo cuál favorece una distribución de calor más uniforme en comparación con hornos de geometría rectangular o cúbica, de los cuales tienden a tener una concentración del calor en las esquinas debido a su geometría.
Es esencial considerar la fuente generadora de calor, la cual esta pensada en una resistencia de nicromo, la cual es ideal para alcanzar temperaturas altas, cabe destacar que el consumo de energía es significativo, ya que alcanza temperaturas de 900 °C con 110 voltios.
Además de eso, el horno eléctrico cuenta con materiales de fácil acceso, lo que hace que la reposición de algún componente sea de fácil alcance y fácil de instalar.
Los componentes estructurales del horno se basan en ladrillo refractario reutilizado de industrias metalúrgicas y mortero refractario, favoreciendo la resistencia térmica y la prolongación de la vida útil del horno.

Imágenes y gráficas



Fig. 3 Análisis de perdida de calor en secciones del horno

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Un horno eléctrico, también conocido como mufla, se desarrolla con el objetivo de apoyar la formación de los estudiantes mediante diversas prácticas, especialmente en áreas como la metalurgia y el estudio del comportamiento térmico de los materiales. Estas aplicaciones fomentan el aprendizaje a través de la experiencia práctica. El desarrollo de este horno esta enfocado en las necesidades de instituciones con recursos limitados, las cuales carecen de equipo de laboratorio, lo que puede mermar la calidad del conocimiento adquirido por los estudiantes.

Conclusión o mensaje final

Considerando los factores de diseño, consumo energético, materiales de construcción, temperatura máxima alcanzada y su propósito, se concluye que el horno representa una oportunidad accesible para enriquecer el conocimiento de los estudiantes que sólo puede complementarse mediante las prácticas de laboratorio.

.

Referencias "Para saber más"

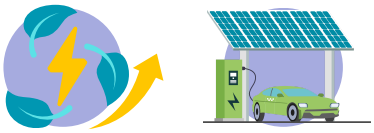
https://elcrisol.com.mx/mufla-digital-industrial-de-10-1-x-22-8-x-9-5cm-thermo-scientific.html?srsltid=AfmBOooCHGZwRwmlroyyaodKUjtxuDFJ9CW-wfUaRcBC1-mPjbLYMossN2M
https://www.amazon.com.mx/Horno-temperatura-aplicaciones-laboratorio-industriales/dp/B0DTKXHBH3?th=1
Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* .
https://www.un.org/desarrollosustainable/es/agenda-2030/
Valdez, A. (2007). Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para fundiciones. IFC, 1-28.

ISBN: En trámite

Combinando la energía del sol y del viento, ¡podemos obtener energía limpia para todos!

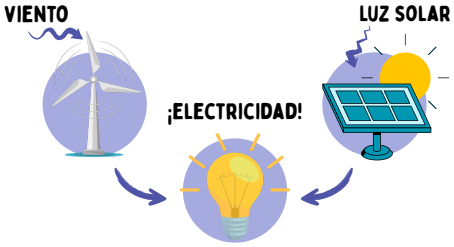
Andrea Alejandra López Barreto, Jarniel García Morales, Juan Reyes Reyes, Marisol Cervantes Bobadilla
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Introducción

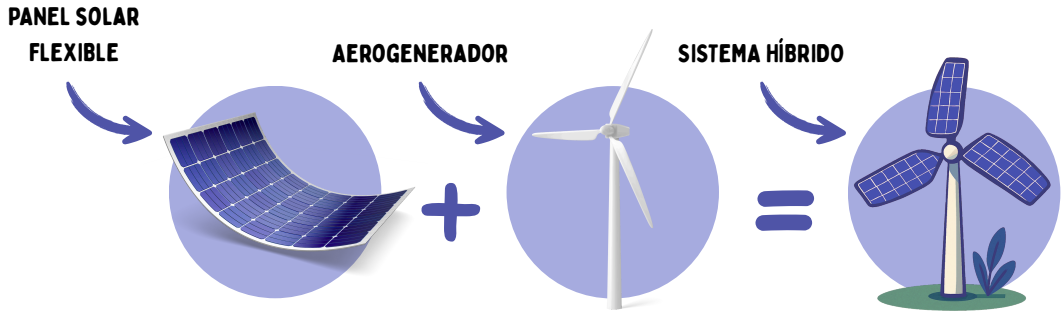


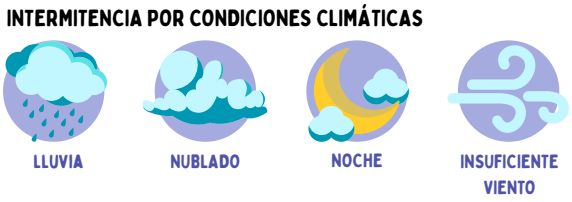
La integración de un **sistema híbrido** que combine energía **eólica** y **fotovoltaica** se propone para evaluar el impacto en la eficiencia energética dentro de una configuración específica.

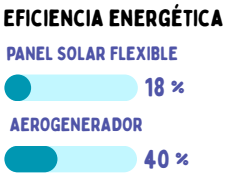
Paneles solares y aerogeneradores



Propuesta que combina energía del sol y del viento







Impacto en el entorno



Mensaje final



El futuro depende de la adopción de energías limpias y tecnologías sostenibles.
¡Sé parte del cambio!

Referencias "Para saber más"

Comisión Federal de Electricidad. (2024). *El futuro de la energía solar: Desafíos de la red de transmisión de la Central Fotovoltaica Puerto Peñasco.*
Iberdrola. (2025). *Sostenibilidad.*
Sánchez Juárez, A., Martínez Escobar, D., Santos Magdaleno, R. de la L., Ortega Cruz, J., y Sánchez Pérez, P. A. (2017). *Aplicaciones fotovoltaicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industrial.* Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México.

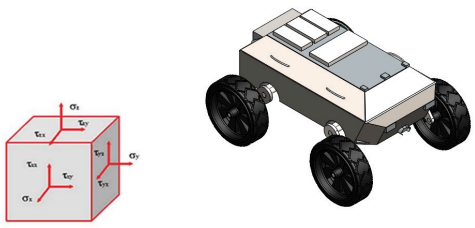
DISEÑO DE UN VEHÍCULO TERRESTRE NO TRIPULADO (UGV) PARA RECONOCIMIENTO

Miguel Angel Reyes Lemus, Jesús Eduardo Acosta Hernandez, Sigfrido Oscar Soria Frias
Tecnológico Nacional de México Campus Iztapalapa

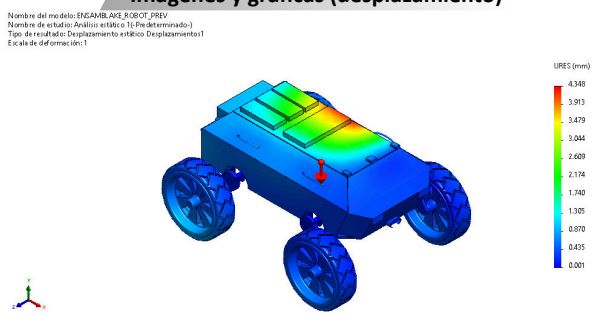
Introducción

Los vehículos no tripulados (UGV) son claves en aplicaciones de seguridad, exploración y rescate donde el acceso humano es riesgoso o imposible. Su implementación radica en las capacidades para operar en entornos hostiles como zonas de desastres o terrenos inestables. El prototipo centra el diseño de un UGV para el reconocimiento, mediante un modelado 3D en SolidWorks Student y sometido a diversos análisis de esfuerzos y condiciones.

Modelo 3D en solidworks 2023 student



Imágenes y gráficas (desplazamiento)



Materiales empleados en la estructura:

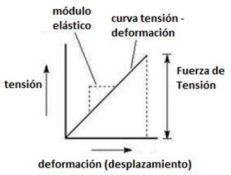
- *Carrocería:* AISI 321 acero inoxidable (SS)
- *Ejes y soporte:* AISI 1020
- *Llantas* Caucho SBR (caucho de estireno-butadieno)

Factor de malla:

- Malla basada en curvatura combinada.
- Tamaño máximo del elemento: 58.83844053 mm.
- Tamaño mínimo del elemento: 2.94192203 mm.
- Número mín. de elementos en un círculo: 8
- Cociente de crecimiento del tamaño del elemento: 1.4

Cargas externas:

- Gravedad: 9.81 m/s^2
- Par: 300 N·m
- Fuerza de carga: 500 kg



Modelo 3D

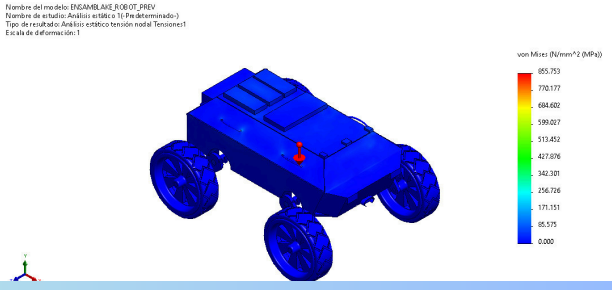
El modelo está compuesto por una estructura fabricada en acero inoxidable grado 321 y soportes de acero al carbono AISI 1020, los cuales proporcionan una rigidez estructural óptima. Adicionalmente, incorpora una serie de compartimentos de almacenamiento modular diseñados para optimizar el espacio y resistir cargas estáticas de hasta 500 kg.

Dimensiones del vehículo: 96.20 cm x 72 cm x 40 cm.
Carga máxima: 500 kg.

"¿sabías que…?"

- Los robots terrestres no tripulados (UGV) pueden reducir hasta en un 40% el tiempo de búsqueda de supervivientes en zonas de desastre.
- En incendios o derrumbes, estos dispositivos acceden a áreas inestables o contaminadas 3 veces más rápido que los equipos humanos, gracias a sensores térmicos y cámaras multiespectrales.
- Además, en minería y agricultura, evitan hasta el 60% de accidentes al monitorear terrenos peligrosos y detectar gases tóxicos o grietas ocultas.

Imágenes y gráficas (Von Mises)



El análisis de ***desplazamiento*** permite el estudio tanto de deformaciones como del movimiento de objetos al ser aplicadas fuerzas, cargas u otras condiciones físicas. Su propósito es predecir los cambios en las diferentes posiciones y formas de cada pieza, dadas unas condiciones aproximadas a situaciones reales.

El estudio de ***elemento finito*** es un método que divide un modelo en partes pequeñas llamadas elementos finitos, las cuales analizan comportamientos bajo las cargas físicas.

Dentro de los criterios de **Von Mises**, se encuentra la medida de tensión equivalente que combina los efectos de todas las tensiones (tracción, compresión, cortante) en solo un valor que evalúa si un material tiende a fallar mediante su deformación plástica o de ruptura.

Oportunidades de mejora:

La aplicación de un sistema avanzado de reconocimiento por inteligencia artificial y navegación autónoma, rediseño del sistema de tracción y movilidad por medio de mecanismos robóticos y/o actuadores.

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

- Dentro del marco de la **seguridad**, refleja el reconocimiento de zonas de conflicto o vigilancia.
- En el apartado de **rescate,** mediante la búsqueda de supervivientes, incendios o áreas contaminadas.
- En **agricultura y minería**, donde prevalece el monitoreo de terrenos peligrosos.

Conclusión

Los UGV son herramientas empleadas en seguridad, rescate e industria, pero su eficacia depende de un equilibrio entre tecnología y diseño adaptable. El hecho de priorizar materiales ligeros y sensores será clave en futuras actualizaciones y así las desventajas podrán ser mitigadas.

Referencias

Meza, M. E. L., & Director, D.-. (2023, May 17). Diseño del prototipo AR17 UGV, vehículo semi autónomo no tripulado, una herramienta de búsqueda y rescate. https://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/3682

De Rivera Peces Guillermo José, G., & De Tecnología Electrónica Y De Las Comunicaciones, U. D. (2014, December 1). Desarrollo e integración de un conjunto de sensores para la navegación autónoma de un UGV (Vehículo terrestre no tripulado) perteneciente a la plataforma robótica ARGOS. Universidad Autónoma De Madrid. https://repositorio.uam.es/handle/10486/663138

Electromovilidad en México.

Hernández Ruiz Alan Yabin*, Susana Estefany De león Aldaco*, Jesús Aguayo Alquicira *Gonzales Ortega Alfredo*Mina Antonio Jesús Darío*
* Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Introducción

La electromovilidad se basa en medios de transporte impulsados o asistidos por motores eléctricos. Se pueden categorizar en tres variantes.

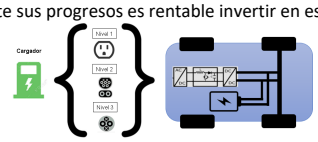
- Vehículos eléctricos
- Vehículos híbridos
- Vehículos híbridos enchufables

En su gran mayoría las empresas enfocadas a movilidad cuentan con opciones de electromovilidad, sin embargo, marcas como Tesla, BYD y Toyota son las que llevan mayor índice de ventas.

Contenido principal

La electromovilidad busca mitigar el consumo excesivo de hidrocarburos con la aplicación de vehículos híbridos, híbridos enchufables y eléctricos, con la ventaja de reducir la emisión de gases contaminantes a nivel mundial. [3]

Hoy en día la electrónica de potencia es el corazón de la electromovilidad ya que mediante sus progresos es rentable invertir en estas unidades.

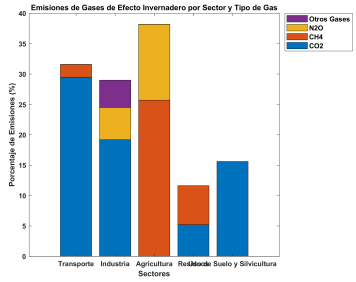


Estructura de un vehículo eléctrico

Algunos de los retos para la adopción o uso extendido de los vehículos eléctricos son: la autonomía, la escasez de estaciones de recarga y el tiempo de recarga. Además, se debe evaluar e impacto en la red eléctrica para sumistrar las estaciones de recarga ante una inminente adopción masiva

¿Por qué es importante?

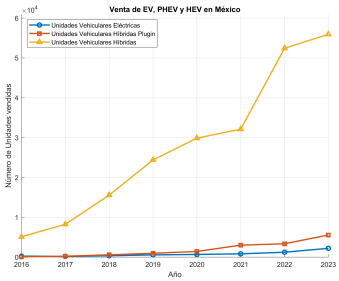
De acuerdo a datos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el transporte en México dónde predominan los vehículos de combustión interna (combustible gasolina o diésel) proporciona a la atmósfera el 32% de las emisiones de gases de efecto invernadero en su mayoría CO2 [1]



INECC. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero

¿sabías que…?

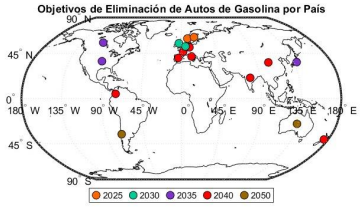
Actualmente podemos encontrar la implementación de vehículos eléctricos como una realidad y no ideas futuristas que se ven en películas de ciencia ficción plantando la idea de futuristas, la cual busca una adopción masiva de estas unidades [2].



INEGI.

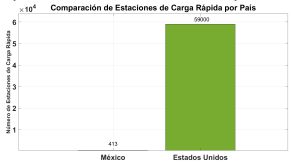
Conclusión

El plan futuro a nivel mundial se centra en la adopción total de la electromovilidad, aprovechando los avances tecnológicos para hacerla más accesible y eficiente. Actualmente, se están desarrollando estaciones de recarga más asequibles y con mayor cobertura, lo que facilitará el uso a gran escala. Esta expansión permitirá a los usuarios realizar trayectos más largos con mayor confianza, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental. Además, se están explorando nuevas tecnologías, como baterías de mayor autonomía y sistemas de carga ultrarrápida, que optimizarán aún más la experiencia de los vehículos eléctricos. [4]



Cargadores rápidos y ultra rápidos

México cuenta con muy pocas estaciones de carga rápida distribuidas a lo largo del país, esto debido al costo y complejidad de dichos dispositivos haciendo que los usuarios se centren en recargas domesticas lentas, ejemplificando se muestra un mapa de Plugshare de estaciones rápidas.



Plugshare. Cargadores rápidos y ultrarrápidos [5].

Referencias "Para saber más"

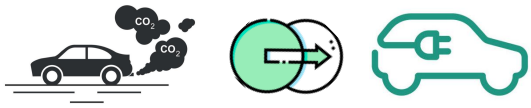
[1] I. N. d. E. y. C. Climático, "Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero," 2018.
[2] INEGI. Venta de vehículos híbridos y eléctricos por entidad federativa, INEGI. 2024.
[3] P. Frías Marín and J. Román Úbeda, "Vehículo eléctrico: situación actual y perspectivas futuras," 2019.
[4] J. A. Ros Marín and O. Barrera Doblado, Vehículos eléctricos e híbridos. Ediciones Paraninfo, SA, 2017.
[5] Plugshare, Estaciones de recarga rápida y ultrarrápida. 2025

Motor de 2 cilindros que funciona por atracción/repulsión magnética.

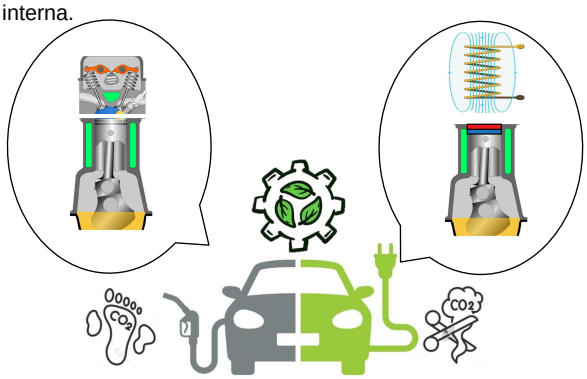
Arturo Daniel Espinosa Pedroza*, Manuel Adam Medina*, Jarniel García Morales*, Marisol Cervantes Bobadilla*
* Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

Introducción

La dependencia de los **combustibles fósiles** causa graves **daños ambientales**, motivando el cambio a tecnologías limpias como los vehículos eléctricos.

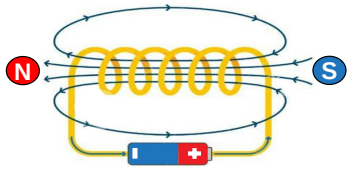


Imagina un **motor que no necesita gasolina**. Los **motores magnéticos** son una tecnología que usa imanes y electroimanes para generar movimiento e infraestructura existente de los motores de combustión interna.

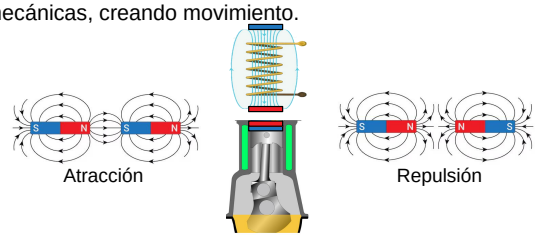


¿Cómo funcionan?

Un **electroimán** es un dispositivo que **genera** un **campo magnético** únicamente cuando la **electricidad circula** por él**.**



Usan **fuerzas magnéticas** para atraer y repeler partes mecánicas, creando movimiento.



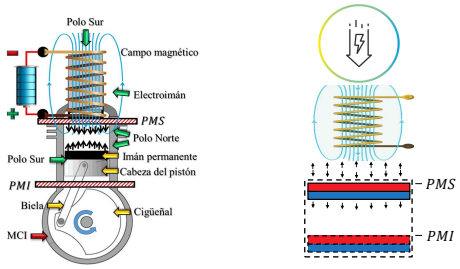
¿Por qué son una opción viable para el futuro?

En un mundo que busca alternativas energéticas limpias y eficientes.

- **Elimina** la dependencia de **combustibles fósiles.**
- **Opera** con **cero emisiones** contaminantes.
- **Reduce** las pérdidas **por calor.**

¿Sabías que…?"

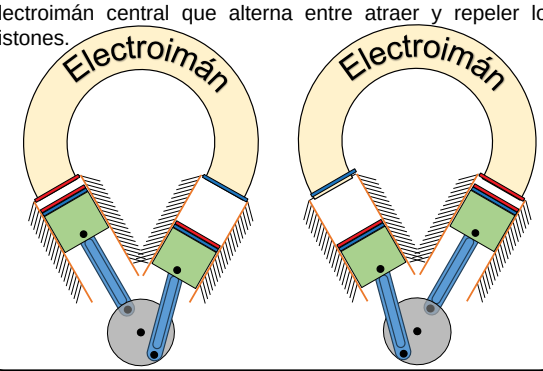
En CENIDET ha trabajado con motores magnéticos y se observaron áreas de oportunidad**.**



Recuperado de Ríos et al.2024.

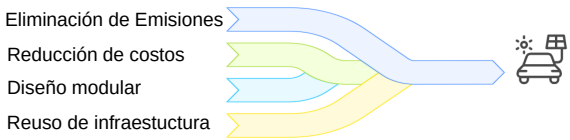
Propuesta de estudio

Con el objetivo de **aprovechar** ambos **campos magnéticos**, se propone un motor de 2 cilindros accionado por un electroimán central que alterna entre atraer y repeler los pistones.



Mensaje final

Los motores de gasolina pueden reconvertirse, sustituyendo sus componentes por imanes y electroimanes, logrando:



"Electromovilidad real ya: motores magnéticos que reconvierten, no desechan."

Referencias "Para saber más"

- Alcalde San Miguel, P. (2016). Electrónica aplicada 2. Ediciones Paraninfo, SA.
- López Crespo, Jorge. (2024). Módulo 3. Fundamentos de electricidad 2.ª edición 2024. Ediciones Paraninfo, SA.
- Rios-Enriquez, C., Adam-Medina, M., García-Morales, J., Guerrero-Ramírez, G. V., & Cervantes-Bobadilla, M. (2024). Modeling and Simulation of a Magnetic Reciprocating Engine. *IEEE Access*.
- Ríos Enríquez, C. (2024). Modelado y control de un motor reciprocante magnético [Tesis doctoral, Tecnológico Nacional de México - Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico].

ISBN: En trámite

Gamificación con Inteligencia Artificial para la Selección de Aspirantes: Un Enfoque Innovador e Inclusivo

Mónica Cristal Girón Colín*, Daniela Hernández Castañeda*, José Francisco Gómez Aguilar**
*Tecnológico Nacional de México Campus CENIDET
**Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Introducción

La forma en que seleccionamos talento está evolucionando. Los procesos tradicionales de admisión en programas académicos enfrentan desafíos como la subjetividad, la falta de inclusión y la dificultad para evaluar habilidades blandas. Hoy en día, la combinación de herramientas como la gamificación y la inteligencia artificial (IA) permite realizar evaluaciones más dinámicas, objetivas y eficientes [1]. La gamificación transforma las pruebas tradicionales en experiencias atractivas, mientras que la IA analiza los datos para identificar candidatos con verdadero potencial. Este enfoque busca no solo mejorar los resultados, sino también promover procesos más justos, inclusivos y acordes con las necesidades del entorno actual [2].

Sabías que…

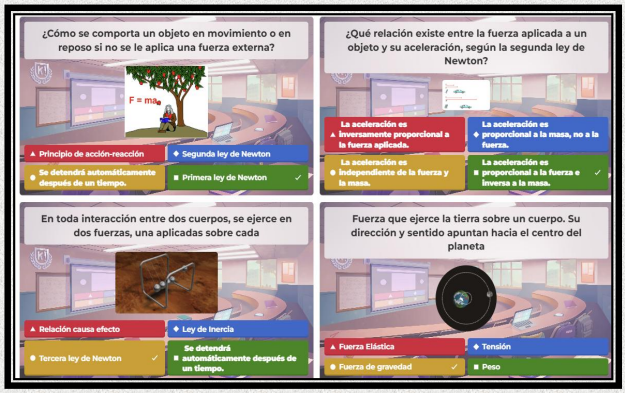
La **gamificación** introduce elementos de juego en procesos educativos y de selección, transformando la evaluación en una experiencia interactiva y motivadora. Esta estrategia permite observar habilidades como la toma de decisiones, el pensamiento crítico y el trabajo en equipo en un entorno más relajado y participativo [3].

Aplicación de Kahoot en el Proceso de Selección.

Kahoot es una plataforma interactiva que permite evaluar conocimientos mediante cuestionarios en tiempo real. En este proyecto, se utiliza como herramienta lúdica para detectar habilidades y aptitudes relevantes en los aspirantes.



La aplicación web da la bienvenida a los usuarios mediante un bot interactivo, que ofrece información y pautas de manera clara.



BúfaloMágico

Preguntas	Tipo	Respondió	Correcto/incorrecto	Tiempo	Puntos
9 A la acción mutua entre ...	Quiz	Interacción	Correcto	5.3 s	867
5 Fuerza que ejerce un hil...	Quiz	Tensión	Correcto	4 s	899
10 Son las fuerzas que pue...	Quiz	peso y fricción	Correcto	3.8 s	904
8 Cuándo un cuerpo perm...	Quiz	en equilibrio	Correcto	3.4 s	916
6 La dinámica se diferenci...	Quiz	Actúa la aceleración	Correcto	2.7 s	933
7 ¿Qué fuerza ejercen los ...	Quiz	Fuerza elástica	Correcto	2.4 s	940
4 Fuerza que ejerce la tier...	Quiz	Fuerza de gravedad	Correcto	0.1 s	1000

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Gamificación en educación: Hace el aprendizaje más interactivo y divertido, mejorando la participación y el compromiso de los estudiantes (ej. Kahoot).

Inteligencia artificial en selección de candidatos: Permite analizar grandes volúmenes de datos para tomar decisiones más objetivas y eficientes.

Primeros resultados

- ✓ Se diseñó una aplicación web que utiliza Kahoot como entorno gamificado para evaluar conocimientos y habilidades.
- ✓ Un bot interactivo da la bienvenida y guía al usuario, creando una experiencia personalizada.
- ✓ Se recopilan datos del desempeño durante el juego.
- ✓ Se planea aplicar modelos de IA supervisada, como árboles de decisión o redes neuronales, para identificar patrones que sirvan para predecir el éxito académico.

Conclusión

Combinar la gamificación con la IA ofrece una forma novedosa y atractiva de seleccionar candidatos. Los juegos ayudan a que las personas muestren sus habilidades en un ambiente más relajado, mientras que la IA permite analizar la información de manera objetiva y rápida. Para que este proceso funcione bien, es importante tener claro desde el principio qué se quiere evaluar y predecir, como el desempeño futuro o la capacidad de aprender. Con esta claridad, se pueden usar las herramientas adecuadas y lograr procesos de selección más justos, inclusivos y eficaces.

Para saber más

1.- Latina, C. (2024, septiembre 20). *Inteligencia Artificial para optimizar el proceso de admisión y matrícula en las universidades*. Linkedin.com. https://es.linkedin.com/pulse/inteligencia-artificial-para-optimizar-el-proceso-de-admisi%C3%B3n-todl
2.- Herrera, C. (2022, febrero 5). *Como un juego. La gamificación se mete en la búsqueda del talento IT más calificado*. LA NACION. https://www.lanacion.com.ar/economia/negocios/como-un-juego-la-gamificacion-se-mete-en-la-busqueda-del-talento-it-mas-calificado-nid05022022/
3.- Villalba, SM (2024, 10 de abril). *Implementación de la Gamificación y la Inteligencia Artificial en la Educación Virtual* . IA Educativa. https://iaeducativa.org/2024/04/10/implementacion-de-la-gamificacion-y-la-inteligencia-artificial-en-la-educacion-virtual/

ALGORITMOS DE APRENDIZAJE PROFUNDO PARA LA DETECCIÓN DE PLAGAS EN CULTIVOS DE MAÍZ CON IMÁGENES SATELITALES

Andrea Sánchez Ruiz*, Antonio Juan Capistran Abundez*, Vitervo López Caballero*, Noé Alejandro Castro Sánchez*
* Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Introducción

La Agenda 2030 a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2 y 12 propone garantizar la seguridad alimentaria, mejorar la productividad agrícola. En este contexto, el maíz destaca como un cultivo esencial a nivel mundial y en México destaca por su valor económico, cultural y alimentario. Sin embargo, las plagas representan una amenaza para la producción del maíz, por lo cual es fundamental monitorear la salud de los cultivos (U. Nations, 2015).

Actualmente, esta actividad se realiza de forma visual, lo cual puede tener sesgos en la información. La agricultura de precisión, apoyada en tecnologías como la inteligencia artificial y el aprendizaje profundo permite detectar plagas con mayor certeza. Por lo tanto, en esta investigación se propone desarrollar un método con redes neuronales convolucionales para identificar plagas en hojas de maíz a partir de imágenes satelitales.

Descripción del problema

La detección temprana de plagas en cultivos de maíz es clave para evitar daños graves, pero los métodos manuales son lentos, costosos y limitados por la visibilidad en la etapa de elote/espiga. Esto atrasa la intervención y aumenta el uso de pesticidas, afectando la productividad y el medio ambiente

Algunas de las enfermedades foliares destacan por ser las más visibles, tales como: los tizones, las manchas y las royas de las hojas, ya que a primera vista son alarmantes (Paliwal, R. L., 2025). Es decir, todo tipo de plagas que afectan los maizales, aumentan los costos por el uso de tratamientos químicos, lo cual dificulta tener buenas cosechas de maíz y la posibilidad de mejorar la seguridad alimentaria.

Objetivos

Objetivo general

Implementar una arquitectura de una red neuronal convolucional para la detección de plagas en cultivos de maíz mediante el análisis de imágenes satelitales.

Objetivos específicos

- Diseñar un conjunto de dato de imágenes satelitales de alta resolución que permita la identificación y clasifiación de plagas en cultivos de maíz.
- Diseñar una arquitectura de una red neuronal convolucional para detectar la presencia de plagas en las áreas de cultivo de maíz.
- Validar la arquitectura diseñada a través del conjunto de pruebas de imágenes satelitales con presencia y ausencia de plagas.



Metodología

1. Selección de una API
2. Recolección de datos
3. Preprocesamiento
4. Diseño del modelo
5. Entrenamiento del modelo
6. Validación del modelo
7. Visualización de curvas PR y ROC

Impacto social

Según la FAO, el maíz es un cultivo estratégico a nivel mundial por su valor económico y su papel en la seguridad alimentaria. Sin embargo, las plagas reducen hasta un 40 % de su producción, afectando la calidad y aumentando el uso de pesticidas, con impactos negativos en el medio ambiente y la salud (Masood et al., 2023).
La detección temprana mediante aprendizaje profundo e imágenes satelitales ofrece una solución eficiente y sostenible, permitiendo un monitoreo preciso que optimiza la gestión del cultivo, reduce pérdidas y fortalece la seguridad alimentaria, beneficiando tanto a pequeños como a grandes agricultores (Nakalembe et al., 2021).

Conclusión

Aunque la detección de plagas mediante imágenes capturadas con cámaras, celulares y drones ha sido ampliamente explorada en los últimos años, esta investigación se enfoca específicamente en el uso de imágenes satelitales aplicadas a través de técnicas de aprendizaje profundo. Se propone implementar una red neuronal convolucional entrenada con imágenes satelitales de cultivos de maíz provenientes de distintas regiones, con el objetivo de evaluar su desempeño mediante métricas como la matriz de confusión, la precisión, sensibilidad, puntaje F1 y exactitud. Como resultado, se obtendría una valoración clara sobre la efectividad del modelo para detectar plagas de forma automática.

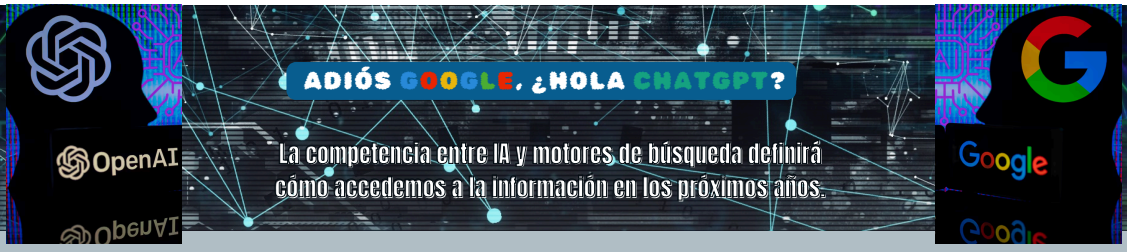
Referencias

Masood, M., Nawaz, M., Nazir, T., Javed, A., Alkanhel, R., Elmannai, H., Dhahbi, S., & Bourouis, S. (2023). MaizeNet: A Deep Learning Approach for Effective Recognition of Maize Plant Leaf Diseases. IEEE Access, 11, 52862-52876. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3280260
Nakalembe, C., Becker-Reshef, I., Bonifacio, R., Hu, G., Humber, M. L., Justice, C. J., Keniston, J., Mwangi, K., Rembold, F., Shukla, S., Urbano, F., Whitcraft, A. K., Li, Y., Zappacosta, M., Jarvis, I., & Sanchez, A. (2021). A review of satellite-based global agricultural monitoring systems available for Africa. Global Food Security, 29, 100543. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100543
Paliwal, R. L. (2025). EL MAíZ EN LOS TRÓPICOS: Mejoramiento y producción Table of Contents. Fao.org. http://www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s00.htm
U. Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. doi: 10.18268/bsgm1908v4n1x1.

ISBN: En trámite

EL FUTURO DE LA BÚSQUEDA

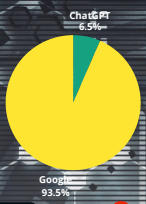
Gloria Betzabeth Ventura Ramírez
Instituto Tecnológico de Puebla

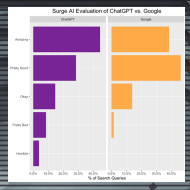


La forma en que buscamos información está cambiando. Google ha sido el rey de las búsquedas por años, pero ChatGPT y la inteligencia artificial están revolucionando la manera en que obtenemos respuestas. La IA puede hacer búsquedas más rápidas y precisas, pero también plantea desafíos como la veracidad de la información y el control de datos. De ahí surge la importancia de saber la confiabilidad y veracidad de los motores de búsqueda.

ChatGPT

Es un sistema de inteligencia artificia que se ha vuelto muy útil en áreas como la educación, los negocios y las finanzas, ayudando a resolver dudas, escribir textos y hasta dar ideas creativas.





Google

Es el motor de búsqueda más popular que existe, cuya función es brindar a los usuarios acceso a listados de páginas web y referencias de distinto tipo, como una forma de facilitar su recorrido del vasto mundo de la Internet.



En la actualidad, Google sigue siendo el motor de búsqueda más utilizado a nivel mundialcon números de 5 billones de búsquedas este último marzo 2025, sin embrago, el crecimiento de ChatGPT ha tenido un crecimiento superior y notable desde su lanzamiento en 2022, con más de 1,000 millones de búsquedas diarios.



¿Cómo influirán estas tecnologías en nuestras decisiones diarias y en el acceso a la información?



Automatización: Las IA pueden transformar la forma en que las empresas y los individuos obtienen información

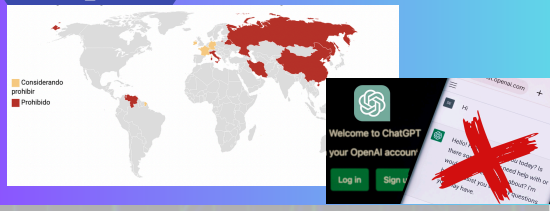
Educación: Mejora del aprendizaje interactivo y acceso a información

Desafíos éticos: Consideraciones sobre la veracidad de la información, la privacidad y la dependencia de la tecnología.

Ambas tecnologías cambiarán la forma en que buscamos y procesamos información. Google ha sido fundamental en el acceso y la filtración de información, pero ChatGPT introduce una experiencia conversacional que promete un acceso más directo y personalizado. Sin embargo, el reto está en cómo manejamos la dependencia tecnológica, los sistemas, la desinformación y la calidad de nuestras decisiones al depender de estas herramientas.

¿SABÍAS QUÉ?

ChatGPT está prohibido en China, Rusia, Ucrania, Bielorrusia, Afganistán, Irán y Venezuela



¿Y TÚ, ERES TEAM CHATGPT O TEAM GOOGLE?

Para saber más...

Para saber más...

Para saber más...

Singh, SK, Kumar, S. y Mehra, PS (junio de 2023). Chat GPT y Google Bard AI: Una revisión. Conferencia Internacional sobre IoT, Comunicación y Tecnología de Automatización (ICICAT) de 2023 (pp. 1-6). IEEE.

Xu, R., Feng, Y. y Chen, H. (2023). ChatGPT vs. Google: Un estudio comparativo del rendimiento de búsqueda y la experiencia del usuario. Preimpresión de arXiv:2307.01135 .

Identificación inteligente de pinos: Una Herramienta para la conservación

Adan Cruz Garcia*, Rosalba Pacheco Sánchez*
*Instituto Tecnológico Superior de San Miguel el Grande

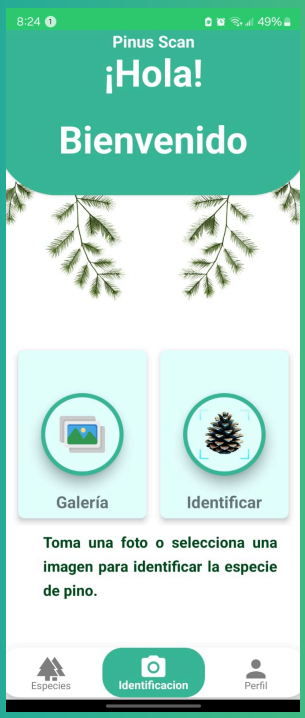
Introducción

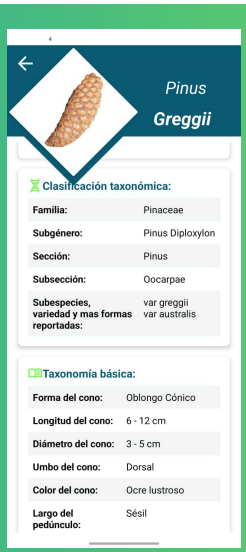
El municipio de San Miguel el Grande, Oaxaca, alberga una gran diversidad de especies de pinos, los cuales son fundamentales para el equilibrio ecológico y el patrimonio natural del país. La presente propuesta en desarrollo propone un sistema de inteligencia artificial basado en redes neuronales para identificar especies de pinos en tiempo real, mediante imágenes capturadas bajo iluminación controlada. Esta tecnología agilizara la identificación de especies superando las limitaciones asociadas con métodos tradicionales, además de apoyar como herramienta educativa dentro y fuera de aula.

¿Cómo funciona la aplicación?

- Captura una imagen del cono del pino con la cámara del dispositivo móvil, o bien selecciona una imagen desde la galería.
- El sistema aplica el modelo previamente entrenado para identificar una de las cinco especies de pinos: Oaxacana, Greggii, Ayacahuite, Leiophylla o Teocote.
- Muestra el resultado junto con información relevante sobre la especie identificada.







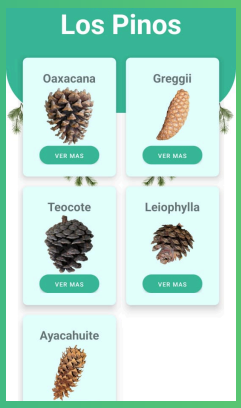
Metodología

Este proyecto se desarrolla siguiendo un enfoque basado en Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático. Para garantizar la precisión, se recopilaron y analizaron cientos de imágenes de conos de cinco diferentes especies de pinos. La aplicación utiliza algoritmos que aprenden patrones específicos de cada especie y los aplica para hacer identificaciones en tiempo real. Podemos compararlo con la forma en que un niño aprende a reconocer frutas: después de ver muchas manzanas y naranjas, puede identificarlas sin dificultad. De manera similar, este tipo de sistemas aprenden a distinguir las especies (en este caso de pinos) basándose en imágenes previas.

Aplicaciones en la vida cotidiana

- Monitoreo de especies y protección de áreas naturales.
- Estudiantes e investigadores: Herramienta educativa para identificar especies.
- Manejo sostenible de los recursos forestales.





¿Sabías que...?

Existen diversos métodos para reconocer especies de pinos, tales como la forma y el tamaño de sus conos, la disposición de sus acículas (hojas en forma de aguja) y la textura de su corteza. La inteligencia artificial es capaz de analizar estas características para hacer identificaciones precisas.

Además, la clasificación precisa de especies de pinos permite conocer y conservar nuestra biodiversidad, fortalecer estudios sobre el cambio climático, el manejo forestal, y la prevención de pérdida de especies.

Conclusión

La identificación de especies de pinos ha representado un proceso complejo, debido a la necesidad de conocimientos especializados. Esta aplicación, basada en inteligencia artificial, permite una clasificación rápida, accesible y precisa mediante el análisis de conos de pinos, transformando la forma en que interactuamos con la biodiversidad. Su valor no solo radica en el ámbito educativo, al fomentar el aprendizaje activo y la conciencia ecológica, sino también en su utilidad científica para el monitoreo forestal y la investigación ambiental. Además, fortalece la gestión sostenible de los recursos naturales en comunidades locales. De esta manera, la tecnología y la conservación se unen para impulsar la protección y el conocimiento de nuestros ecosistemas.

Referencias "Para saber más"

Torres, I., Moreno, J., Morales-Molino, C., & Arianoutsou, M. (10 2021). Ecosystem Services Provided by Pine Forests. doi:10.1007/978-3-030-63625-8_29

Boskia &Diego Ernesto Lira González (2020). Guía Básica de Pinos Mexicanos(PDF)

ISBN: En trámite

Aplicación del Algoritmo Genético a Problemas de Optimización

Beatriz Martínez-Bahena, Jazmín Yanel Juárez-Chávez, Juana Enríquez-Urbano
Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Introducción

Los algoritmos genéticos (AG) son métodos adaptativos que se utilizan para resolver problemas de búsqueda y optimización de soluciones. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos e inspirados en la selección natural y la supervivencia del más apto (Londoño, 2006). Sus principales características son la flexibilidad y adaptabilidad a diferentes problemas. La optimización es crucial en muchas disciplinas porque permite encontrar soluciones eficientes a problemas difíciles. En ingeniería, se utilizan para el diseño de estructuras, caracterización de materiales, circuitos eléctricos, control de procesos industriales, diseño de redes, problemas de transporte, logística, asignación de recursos, entre otros. En inteligencia artificial, se emplean en modelos de aprendizaje automático, la optimización de redes neuronales y en el campo de medicina (Katoch et al., 2021).

.

Contenido principal

Los componentes principales de un AG son:

1. **Generación de la población inicial:** se establece un conjunto de soluciones candidatas al problema (individuos), aleatoriamente o con métodos heurísticos.
2. **Evaluación de la aptitud de cada individuo de la población:** se realiza en base a qué tan bien resuelve el problema planteado, guiando la selección de soluciones.
3. **Selección:** Se eligen las mejores soluciones (individuos).
4. **Cruzamiento:** Combinación de dos individuos (padres) para crear un nuevo descendiente (solución).
5. **Mutación:** Pequeñas alteraciones aleatorias en la solución (individuo) para mantener la diversidad genética.
6. **Reemplazo:** Sustitución de individuos menos aptos por nuevos descendientes generados a través de cruces y mutaciones.
7. **Criterio de paro:** El proceso se repite hasta que se cumpla una condición.

Imágenes y gráficas

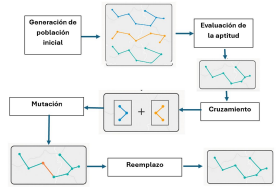


Fig. 1 Ejemplo de AG aplicado a problemas de transporte.

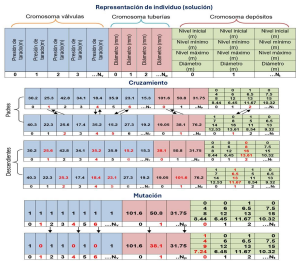


Fig. 2 Ejemplo de AG aplicado a una red hidráulica. (Martínez Bahena et al. 2018).

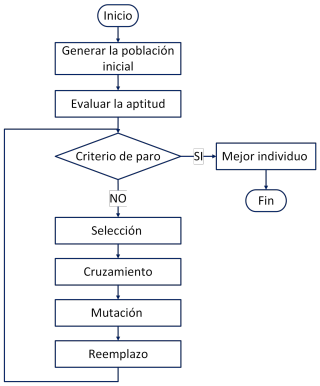


Fig. 3 Diagrama de flujo de un AG simple.

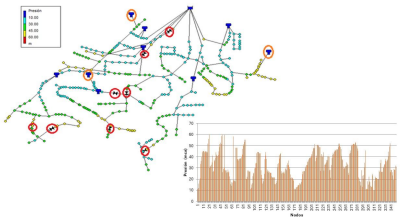


Fig. 4 Simulación hidráulica y presiones en cada nodo de la mejor solución.

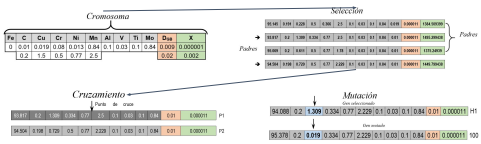


Fig. 5 Ejemplo de AG aplicado a un acero microaleado de alta resistencia y baja aleación (HSLA) (Juárez Chávez Jazmín Yanel).

Fe	C	Cu	Cr	Ni	Mn	Al	V	Ti	Mo	dGB	X	σy
93.460014	0.2	1.5	0.5	0.77	2.5	0.1	0.03	0.1	0.84	0.01	0.000011	1530.4544677734375

Fig. 6 Resultado de una solución aproximada a la mejor resistencia encontrada utilizando el AG con la composición química de un acero microaleado. (Juárez Chávez Jazmín Yanel).

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Diversas investigaciones han empleado AG para abordar problemas de optimización en distintos campos. Por ejemplo, han sido utilizados en el diseño de redes de distribución de agua (Ávila-Melgar et al., 2017; Alemaw & Jankie, 2023). Martínez-Bahena et al. (2018) aplicaron un AG con el objetivo de minimizar los costos asociados a la incorporación de tanques, tuberías y válvulas en un sistema hidráulico existente, asegurando el cumplimiento de los requisitos de presión, con un mínimo de 10 metros de columna de agua (mca) y un máximo de 60 mca (ver fig. 4). En otro estudio, Juárez Chávez Jazmín Yanel (Fig. 6) empleó un AG para optimizar la composición química de un acero microaleado, con el propósito de maximizar una solución y lograr una mayor resistencia mecánica. Más recientemente, los AG se han aplicado en el ámbito de la salud, en investigaciones orientadas al diagnóstico y clasificación de enfermedades (Prasetio, 2020), así como en la optimización de tratamientos personalizados, particularmente en el manejo de la diabetes mellitus (Tyagi et al., 2024) y la diabetes tipo II (Al Switi et al., 2019), entre otros.

Conclusión o mensaje final

En la revisión de la literatura, se puede observar que el AG es una metodología poderosa inspirada en la naturaleza para resolver problemas complejos de manera eficiente. A través de este póster, se muestra su funcionamiento y aplicación en distintas disciplinas. Su desempeño para encontrar soluciones óptimas lo convierte en una herramienta valiosa en el mundo actual, donde cada vez se requiere mayor precisión y rapidez en la toma de decisiones.

Referencias

Al Switi, M., Alshraideh, B., Alshraideh, A., Massad, A., & Alshraideh, M. (2019). Treatment of diabetes type II using genetic algorithm. *International Journal of Online and Biomedical Engineering, 15*(11), 53–68.

Alemaw, B. F., & Jankie, T. E. (2023). Optimization of urban water pipe network design using fast-messy genetic algorithms (fmGA). *H2Open Journal, 6*(3). https://doi.org/10.2166/h2oj.2023.029

Avila-Melgar, E. Y., Cruz-Chávez, M. A., & Martinez-Bahena, B. (2017). General methodology for using Epanet as an optimization element in evolutionary algorithms in a grid computing environment for water distribution network design. *Water Science and Technology: Water Supply, 17*(1), 39–51. https://doi.org/10.2166/ws.2016.101

Katoch, S., Chauhan, S. S., & Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications, 80*(5), 8091–8126. https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6

Londoño, N. G. (2006). *ALGORITMOS GENETICOS.*

Martínez-Bahena, B., Cruz-Chávez, M. A., Ávila-Melgar, E. Y., Cruz-Rosales, M. H., & Rivera-Lopez, R. (2018). Using a genetic algorithm with a mathematical programming solver to optimize a realwater distribution system. *Water (Switzerland), 10*(10). https://doi.org/10.3390/w10101318

Prasetio, R. T. (2020). Genetic Algorithm to Optimize k-Nearest Neighbor Parameter for Benchmarked Medical Datasets Classification. *Jurnal Online Informatika, 5*(2). https://doi.org/10.15575/join.v5i2.656

Tyagi, K., Kumar, D., & Gupta, R. (2024). Application of Genetic Algorithms for Medical Diagnosis of Diabetes Mellitus. *International Journal of Experimental Research and Review*, 37, 1–10. https://doi.org/10.52756/ijerr.2024.v37spl.001

ESTRATEGIA DE CONTROL NEURONAL PARA LA CONCENTRACIÓN DE BIODIÉSEL

Daniel Moreno Galíndez[1] , Marisol Cervantes Bobadilla[1], Abisai Acevedo Quiroz[1], Manuel Adam Medina[1]
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. [1]

Introducción

Los combustibles fósiles siguen siendo los principales responsables de la contaminación por gases de efecto invernadero. El biodiésel es una opción más amigable con el ambiente, pero producirlo con la calidad requerida aún es complicado.

En este contexto, la inteligencia artificial ha surgido como una herramienta fiable para asegurar que el biodiesel cumpla con las características necesarias para su uso en la vida cotidiana[5].



Figura1. Ciclo del biodiésel

¿Que buscamos hacer?

Aplicar inteligencia artificial en la producción de biodiésel puede facilitar su incorporación en la vida cotidiana. Esta tecnología puede encargarse de supervisar el proceso de transformación del aceite vegetal, ajustando automáticamente las condiciones de operación del reactor para obtener un biodiésel que cumpla con los estándares internacionales.

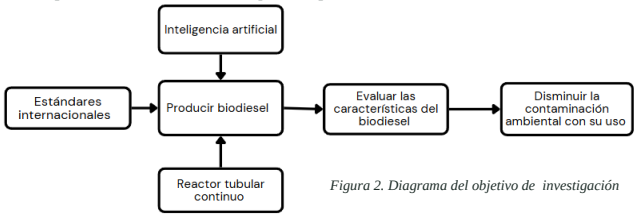


Figura 2. Diagrama del objetivo de investigación

¿Cómo se planea hacer?

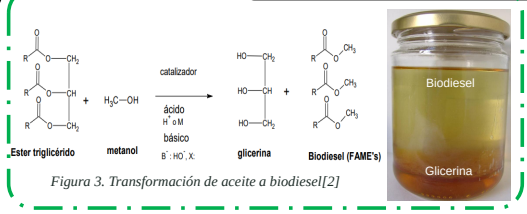


Figura 3. Transformación de aceite a biodiesel[2]

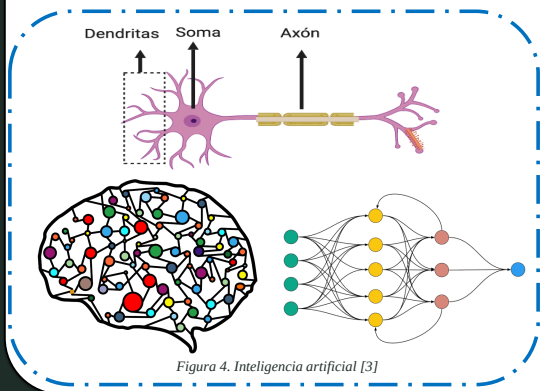


Figura 4. Inteligencia artificial [3]

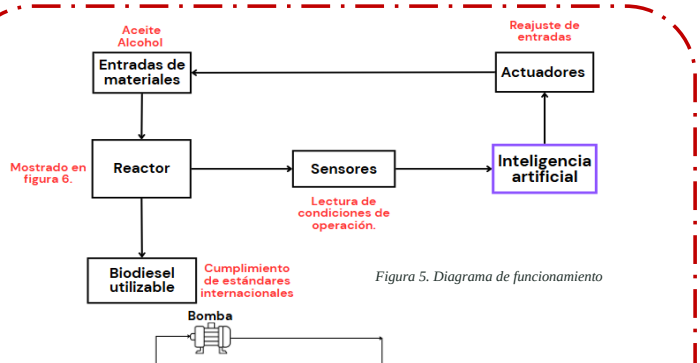


Figura 5. Diagrama de funcionamiento

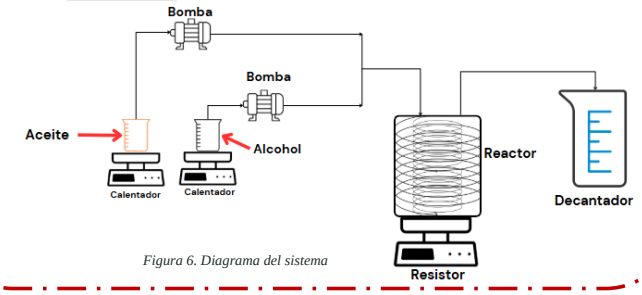


Figura 6. Diagrama del sistema

Aplicaciones e impacto en la vida cotidiana / entorno

Usar inteligencia artificial en la producción de biodiésel ofrece grandes beneficios tanto para el medio ambiente como para la industria. Contribuye a reducir los gases contaminantes y la huella de carbono, al tiempo que amplía las posibilidades de uso del biodiésel. En el ámbito industrial, permite un mejor aprovechamiento de los materiales y asegura que el producto cumpla con los requisitos necesarios para su utilización. Además, ajusta automáticamente condiciones operativas como la temperatura o la mezcla de ingredientes, lo que hace el proceso más eficiente en términos de costos al reducir la generación de productos indeseados. Todo esto impulsa el uso de energías más limpias y sostenibles [1, 4].

Conclusión

La inteligencia artificial se ha convertido en una herramienta clave para optimizar la producción de biodiésel, al permitir ajustes automáticos durante el proceso. Gracias a su capacidad para adaptar las condiciones de operación en tiempo real, se obtiene un biodiésel de mayor calidad, con menos desperdicio y un menor impacto ambiental. Esto no solo mejora la rentabilidad del proceso, sino que también fomenta su uso en la vida cotidiana, apoyando la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

Referencias "Para saber más"

- [1] Pardal, A. C. D. V. (2012). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis.
- [2] García-Muentes, S. A., Lafargue-Pérez, F., Labrada-Vázquez, B., Díaz-Velázquez, M., & Sánchez del Campo-Lafita, A. E. (2018). Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la Jatropha curcas L. en la provincia de Manabí, Ecuador. Revista Cubana de Química, 30(1), 142-158.
- [3] Larranaga, P., Inza, I., & Moujahid, A. (1997). Tema 8. redes neuronales. Redes Neuronales, U. del P. Vasco, 12, 17.
- [4] Ali, M. M., Gheni, S. A., Ahmed, S. M., Hmood, H. M., Hassan, A. A., Mohammed, H. R., ... & Karakullukcu, N. T. (2023). Catalytic production of biodiesel from waste cooking oil in a two-phase oscillatory baffled reactor: Deactivation kinetics and ANN modeling study. Energy Conversion and Management: X, 19, 100383.
- [5]Moradi, G. R., Dehghani, S., Khosravian, F., & Arjmandzadeh, A. (2013). The optimized operational conditions for biodiesel production from soybean oil and application of artificial neural networks for estimation of the biodiesel yield. Renewable energy, 50, 915-920.

ISBN: En trámite

CONTROL DE VELOCIDAD EN VEHÍCULOS PARA CAMINOS IRREGULARES

M.C. Florencio Miguel Xicotencatl Paleta*, Dr. Jarniel García Morales*, Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez*, Dr. Erik Rosado Tamariz*
*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Tecnológico Nacional de México

Introducción

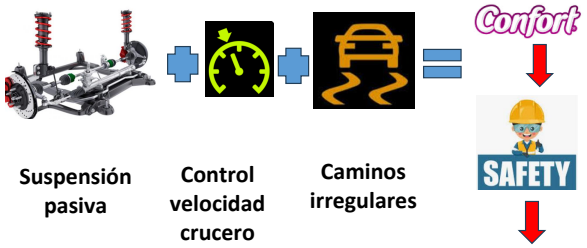


Control de velocidad
Es un asistente de manejo que puede acelerar o desacelerar automáticamente.



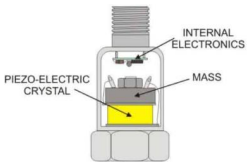
En condiciones de camino irregulares, el control de velocidad crucero se desactiva.

Antecedentes

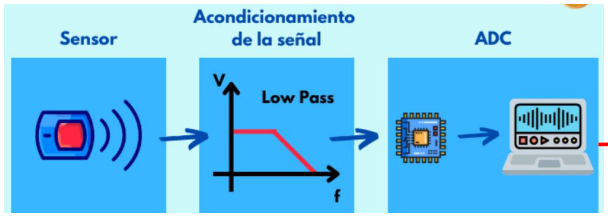


Suspensión pasiva | **Control velocidad crucero** | **Caminos irregulares**

Sistema de Monitoreo



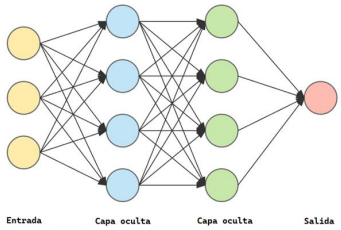
Sensor
- Acelerómetro Piezoeléctrico
- Montado en la Suspensión Pasiva



Acondicionamiento
- Entrada: carga eléctrica
- Salida: voltaje o corriente

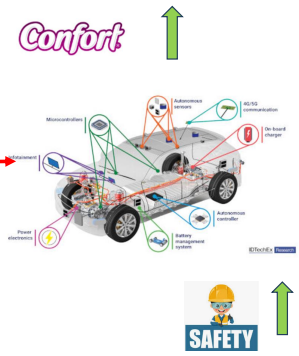
Convertidor analógico –digital (ADC)
- Entrada: señal eléctrica
- Salida: información digital

Modelo Inteligente



Control Inteligente
- Redes Neuronales, imita al cerebro
- Catálogo de datos

Resultado



La combinación de sensores de monitoreo, aprendizaje automático y modelos predictivos permitirá una conducción más eficiente y segura, optimizando el rendimiento de vehículos autónomos y comerciales en entornos de terreno desafiante

"¿sabías que...?"

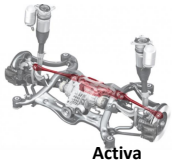
Niveles de autonomía para vehículos según la asociación de Ingenieros Automotrices (SAE)

- **Nivel 0**: Sin Asistencia
- **Nivel 1**: Asistencia al conductor en control de velocidad o dirección.
- **Nivel 2**: Autonomía parcial en control de aceleración, frenado y dirección.
- **Nivel 3**: Autonomía condicional, se automatiza algunas funciones.
- **Nivel 4:** Alta autonomía, se automatiza la mayoría de las funciones.
- **Nivel 5**: Autonomía completa, sin intervención humana

Tipos de suspensión de un vehículo



Pasiva
- Resorte y amortiguador
- Sin control electrónico



Activa
- Actuador
- Con control electrónico



Semi -activa
- Amortiguador ajustable

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana

Este sistema permitirá resolver tareas de conducción autónoma de Nivel 1, con aplicaciones en vehículos de trabajo, todo terreno y comerciales, optimizando el confort y la seguridad en la conducción sobre terrenos irregulares. Reduciendo costos de mantenimiento, menor impacto ambiental y facilitación de la integración de tecnologías inteligentes en el mercado automotriz.

"Para saber más"

Víadero Monasterio, Fernando. Diseño de sistemas de automatización de la conducción basados en control robusto para la mejora de la seguridad y el confort en vehículos automóviles, 2023-06, https://e-archivo.uc3m.es/entities/publication/6b714007-bdee-4b23-b3e1-c59e029d6330

Argente-Mena, Javier, Santos, Matilde, Sierra García, Jesús Enrique. Diseño de un control de velocidad mediante redes neuronales y algoritmos genéticos para vehículos autónomos, 2023, https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/33562

Sistema de fumigación para un dron de bajo costo

Isay Obet Huicochea Rios*, Jarniel García Morales**, Manuel Adam Medina **, Marisol Cervantes Bobadilla **
* Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).
** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

Introducción

El mapeo de terreno, la fumigación de cultivos, el plantado de cultivos, el monitoreo de cultivos, el riego de cultivos, la identificación de plagas y la polinización artificial son algunas de las tareas en las que se emplean drones.



¿Qué compañías fabrican drones de fumigación?
DJI, **XAG** y **Yamaha** desarrollan tecnología vehículos aéreos para fumigar terrenos.
¿Cómo se pilotean estos sistemas?
Con mandos inalámbricos, manejados por un operador especializado.

¿Es posible fumigar un campo de cultivo con un dron evitando el uso de un operador y un control remoto?

Drones de fumigación y sus partes


XAG P100 Pro

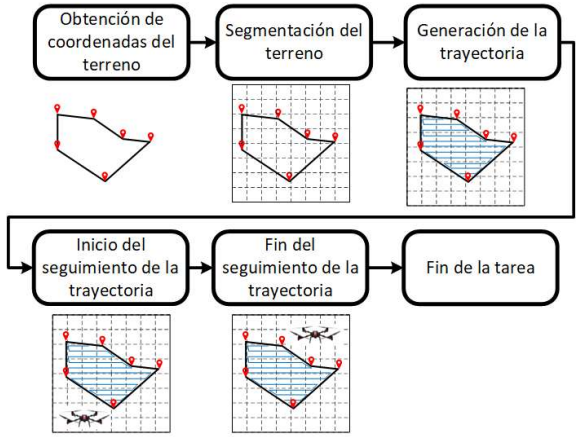

DJI Agras T40


YAMAHA Rmax



Partes de un dron de fumigación (XAG P100 Pro)

Proceso de fumigación de un terreno



Objetivo e impacto

Objetivo: Proponer un sistema de fumigación utilizando un dron, el cual sea controlado por una técnica que consiste en entrenar una red neuronal artificial y encontrar los parámetros de entrada necesarios para obtener una salida predefinida (red neuronal artificial inversa). Se busca que el sistema sea práctico, funcional y consistente.

Impacto en el entorno: Automatizar la fumigación con drones controlados por redes neuronales reduce el riesgo humano, optimiza el uso de recursos agrícolas y facilita el acceso a tecnología en comunidades rurales.

Durante el desarrollo del sistema, se consideran las siguientes **variables** clave para optimizar el proceso de fumigación:

- Velocidad del dron, para garantizar cobertura homogénea sin desperdicio.
- Flujo del fumigante, controlado automáticamente en función del avance.
- Costo del químico, para ajustar la cantidad usada según el área.
- Trayectoria optimizada, reduciendo solapamientos y evitando zonas ya cubiertas.



Conclusión o mensaje final

Con la finalidad de implementar este tipo de tecnologías y estas lleguen a los campesinos mexicanos de recursos limitados, es necesario facilitar su manejo. Por lo tanto, se propone aplicar la inteligencia artificial con la finalidad de eliminar el control remoto y aumentar la autonomía del sistema.



Para saber más

1. Delavarpour, N., Koparan, C., Zhang, Y., Steele, D. D., Betitame, K., Bajwa, S. G., & Sun, X. (2023). A review of the current unmanned aerial vehicle sprayer applications in precision agriculture. Journal of the ASABE, 66(3), 703-721.
2. Ozkan, E. (2024). Drones for Spraying Pesticides—Opportunities and Challenges. The Ohio State University: Columbus, OH, USA, 1-16.
3. Martínez-Valenzuela, C., Waliszewski, S. M., Amador-Muñoz, O., Meza, E., Calderón-Segura, M. E., Zenteno, E., ... & Longoria-Espinoza, R. (2017). Aerial pesticide application causes DNA damage in pilots from Sinaloa, Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 2412-2420.

PELÍCULAS A PARTIR DE BIOPOLÍMEROS/EXTRACTOS NATURALES

Avril López Zepeda, Arely Monserrat Rangel Pacheco, Ma. Elena Calixto Olalde, Divanery Rodríguez Gómez

Departamento de ingeniería en materiales. Departamento de Ingeniería Bioquímica.

Tecnológico Nacional de México/ITES en Irapuato. Carretera Irapuato-Silao Km 12.5, El Copal, Irapuato; Gto 36821.

elena.co@irapuato.tecnm.m; divanery.rg@irapuato.tecnm.mx

Introducción

El desarrollo de las biopelículas se enfoca en su preparación y formulación donde se observa la factibilidad de la integración de los componentes, así como las propiedades que aportan teóricamente los biopolímeros y el aceite esencial de lavanda en la película. Estas biopelículas pretenden ser una aplicación potencial para la regeneración celular, con las que se puedan proporcionar un ambiente adecuado para el crecimiento y la proliferación de células.

Por lo que, en esta investigación se busca establecer la formulación más adecuada que cumpla con las condiciones que se requieren en el área de la salud.

Metodología

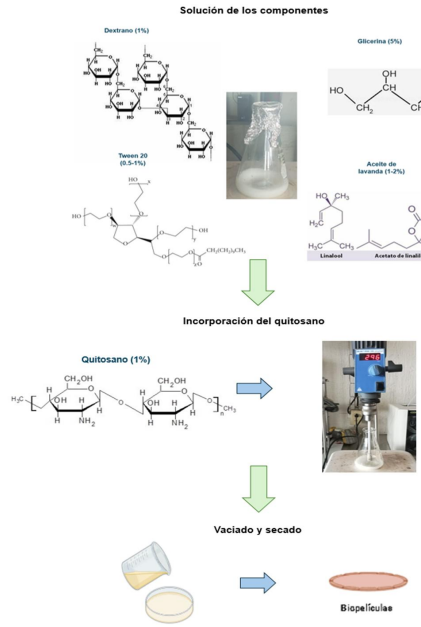


Fig. 1 Proceso de las biopelículas

Avances del proceso



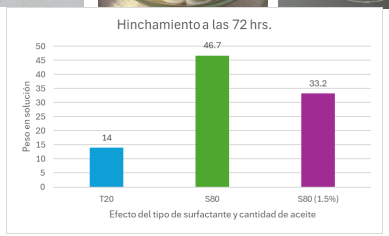


Fig. 2 Etapas del desarrollo de las biopelículas

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

Los biopolímeros han tenido a lo largo del tiempo un impacto significativo, ya que, poseen una diversidad de aplicación, como es el caso del área médica donde actualmente se usan polímeros biodegradables y biocompatibles con el cuerpo humano. Así mismo el quitosano es un biopolímero catiónico lineal derivado de la desacetilación de la quitina, que posee una estructura química favorable para diferentes usos como la elaboración de hidrogeles, sistema de administración de fármacos, apósitos para heridas, recubrimiento para materiales biomédicos, etc.



Fig. 3 Adherencia en la biopelícula

A lo cual con estas biopelículas se busca que al tener una adecuada formulación puedan ofrecer una solución accesible para tratar heridas o quemaduras actuando como un apósito y ayudando a acelerar la cicatrización e incluso reducir el riesgo de infecciones.

Contenido principal

El uso de los biopolímeros para la elaboración de las biopelículas aporta significativamente el comportamiento de estas, por lo que, los componentes que se emplearon en el desarrollo buscan que formen una sola fase en la cual se pueda observar adherencia, flexibilidad, permeabilidad y compatibilidad en la piel.

Por lo tanto, para la elaboración de las biopelículas se incorporaron varios componentes siendo estos el dextrano, el quitosano y aceite de lavanda con los que se creara una película estable y resistente enfocado al uso que se le planea dar, en la que se implementó un diseño de experimentos 2^3 factorial para llevar un control de las variables como el tipo de surfactante y la cantidad de aceite e identificar la formulación más factible. Y comprobar teóricamente que composición se adecua mejor para la creación de la biopelícula.

Conclusión

Las biopelículas en la actualidad buscan revolucionar en el área médica al promover la regeneración celular de la piel de manera superficial, manteniendo la salud y función de la barrera cutánea. Estas membranas buscan cumplir con requisitos esenciales enfocado en los apósitos, como la biocompatibilidad, flexibilidad, biodegradabilidad y adherencia, garantizando un posible tratamiento para los pacientes con alguna herida superficial sin causar efectos adversos. Por lo tanto, mediante las distintas formulaciones, se planea demostrar encontrar la mejor formulación que de pauta a la elaboración de pruebas adicionales, como permeabilidad, citotoxicidad e intemperismo acelerado, para evaluar la eficacia y ofrecer una solución efectiva e impulsando nuevas alternativas en los tratamientos convencionales.

Referencias "Para saber más"

- Calixto-Olalde, M. E., GARCÍA-CONTRERAS, R., ZAMORANO-HERNÁNDEZ, J., & LOUVIER-HERNÁNDEZ, J. F. (2019). Plasticized Chitosan/aloe biofilms for cell regeneration. ECORFAN J. Taiwan, 3(5), 13-20.
- Gómez, L., Estrada, S., Vargas, C., González, A., & Olivas, I. (2016). Apósitos de polímeros naturales para regeneración de piel. *Scielo: Revista mexicana de ingeniería biomédica*, 15.
- CORO*, J. (27 de abril de 1997). El Dextrano como Soporte para la Administración Controlada de Fármacos. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), 6.
- Romero–Serrano, A., & Pereira, J. (2020). Estado del arte: Quitosano, un biomaterial versátil. Estado del Arte desde su obtención a sus múltiples aplicaciones. https://www.redalyc.org/journal/707/70764230002/html/
- Young, R. T. (Diciembre 2, 2013). Essential Oil Safety: A Guide for Health Care Professionals. Elsevier Health Sciences, 800 pag.

Matemáticas al servicio de la salud: Control de enfermedades infecciosas.

M.C. Semadar Bojórquez Sánchez*, Dra. M. Lourdes Gutiérrez Xicotencatl**, Dra. D. Azucena Salazar Piña***, Dr. Manuel Adam Medina*
* TecNM cenidet. ** Instituto Nacional de Salud Pública. *** UAEM, Facultad de nutrición.

Introducción

Desde su origen en el siglo XVIII, cuando Bernoulli desarrolló el primer modelo matemático epidemiológico para la viruela, los modelos matemáticos han sido ampliamente utilizados para describir y analizar la estructura de redes complejas en diversas disciplinas, como la epidemiología, la dinámica social, las redes de señalización y la neurociencia.

En particular, en el ámbito epidemiológico, estos modelos han demostrado ser herramientas poderosas para evaluar procesos complejos, como la dinámica de las infecciones dentro de una población. Además, se consideran un **recurso valioso y rentable** para identificar **estrategias óptimas de control en la propagación de enfermedades infecciosas**.

Panorama general

Los modelos tipo **SIR** (Susceptibles, Infectados, Recuperados) son la **categoría de modelos más utilizada**, ya que permiten obtener conceptos clave como el **número promedio de individuos infectados** por cada persona contagiosa (R_0) y la **población crítica que debe vacunarse** para erradicar un brote infeccioso (p_c). Estos modelos han sido fundamentales en la lucha contra enfermedades infecciosas agudas como el *sarampión*, las *paperas*, la *rubéola* y la *viruela*, así como en la implementación de medidas de contención durante la emergencia sanitaria del *COVID-19*.

Recientemente, se ha comenzado a explorar el uso de estos modelos en combinación con estrategias de control para abordar enfermedades infecciosas crónicas, como el *VPH* y el *VIH*.

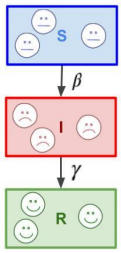
El modelo SIR y su aplicación

$$N = S(t) + I(t) + R(t)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\beta S(t) I(t)$$

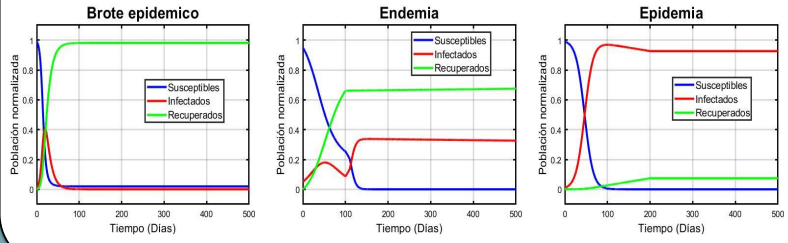
$$\frac{dI}{dt} = \beta S(t) I(t) - \gamma I(t)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I(t)$$

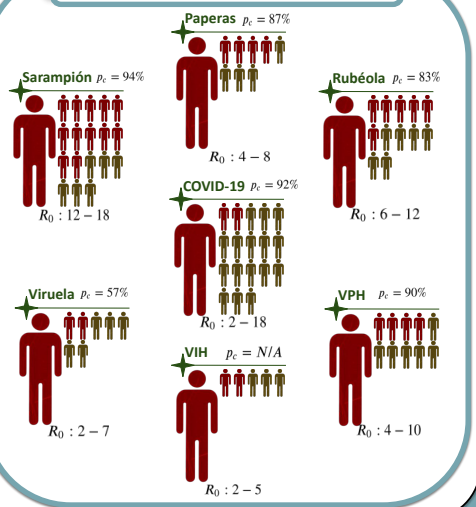


$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma}$$

$$p_c = 1 - \frac{\gamma}{\beta} = 1 - \frac{1}{R_0}$$



Siete enfermedades infecciosas modeladas



Importancia y utilidad de los modelos

El modelado matemático de las enfermedades infecciosas permite:

1. Describir las **características relevantes** de una endemia y una epidemia.
2. **Predecir** las consecuencias de **cambios** específicos en la dinámica de transmisión.
3. **Analizar** la propagación de la enfermedad en una población bajo **distintos escenarios**.
4. **Identificar propiedades y patrones** de los brotes que pueden no ser evidentes de inmediato.

Proporcionando **aproximaciones** que describen el comportamiento de la dinámica de la transmisión del patógeno, pero no lo representan por completo.

Repercusiones en la vida cotidiana

Del **análisis de los modelos se generan recomendaciones para los organismos de salud pública**. En México se han tomado las siguientes políticas:

- La vacuna triple vírica (SRP), que protege contra el *sarampión*, la *rubéola* y las *paperas*, busca una cobertura mínima recomendada del 90%.
- Durante la pandemia de *COVID-19*, los modelos indicaron que la vacunación no sería suficiente para contener el virus, por lo que se propusieron medidas adicionales como el aislamiento y el uso de cubrebocas.
- Para combatir el *VPH*, se estableció el objetivo de vacunar al 90% de las mujeres; sin embargo, la infección sigue siendo frecuente, por lo que la investigación continúa para optimizar las estrategias de prevención y control.

Conclusión

El interés en desarrollar **estrategias de control** para reducir las infecciones de un patógeno surge de casos como el del *VPH*, donde, a pesar de contar con un programa de vacunación, la enfermedad sigue siendo un problema de salud pública. Esto motiva la búsqueda de estrategias óptimas de vacunación que permitan un control más efectivo para **prevenir** su **propagación**.

En este contexto, se plantea **mejorar las campañas de vacunación** mediante el modelado matemático de la transmisión del VPH y la **optimización de estrategias de vacunación** a través de la aplicación de **control óptimo** a estos modelos.

Referencias *"Para saber más"*

Moore, S., Hill, E. M., Tildesley, M. J., Dyson, L., & Keeling, M. J. (2021). Vaccination and non-pharmaceutical interventions for COVID-19: a mathematical modelling study. The lancet infectious diseases, 21(6), 793-802. DOI: https://doi.org/10.1016/S1473-3099(21)00143-2

Béraud, G. (2018). Mathematical models and vaccination strategies. vaccine, 36(36), 5366-5372. https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2017.10.014

Grima, C., & Borja, E. F. (2017). Las matemáticas vigilan tu salud: modelos sobre epidemias y vacunas (Vol. 2). Next Door.

Montesinos-López, O. A., & Hernández-Suárez, C. M. (2007). Modelos matemáticos para enfermedades infecciosas. Salud pública de México, 49(3), 218-226.

MONITOREO DE CONDICIONES AMBIENTALES EN LA GERMINACIÓN DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum*) MEDIANTE IoT

Vázquez Evaristo, Miriam*, Ramírez Vicente, Gabriel Ángel*, Montiel Rosales, Aarón*†, Montalvo Romero, Nayeli**

* Tecnológico Nacional de México/ITS de Teziutlán
** Tecnológico Nacional de México/ITS de Misantla
† **Corresponsal:** ar.chimedes@hotmail.com

Introducción

La agricultura enfrenta constantes desafíos en la búsqueda de prácticas más eficientes y sostenibles. Ante esta situación, el **Internet de las Cosas** (IoT) ha emergido como una herramienta clave que contribuye a conectar procesos físicos a internet. La integración del IoT en la agricultura, en forma de "**Agricultura de Precisión**", permite **monitorear factores ambientales** y con ello poder **gestionar los recursos**, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental y la mejora de la productividad.

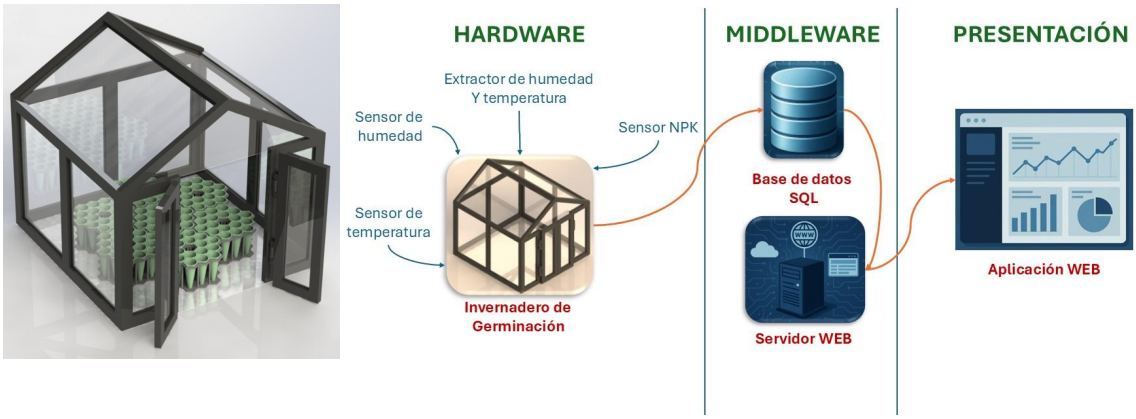
El presente estudio aborda el diseño de un **dispositivo de ambiente controlado** que se conforma de un sistema de monitoreo IoT para la fase de **germinación de semillas de jitomate** (*Solanum lycopersicum*); la cual, es una etapa crítica para garantizar el desarrollo saludable de las plantas y, en última instancia, el éxito de la producción.

Contenido Principal

El desarrollo de un sistema IoT para el **monitoreo de parámetros ambientales** conlleva varias etapas en las cuales se realiza el diseño de los componentes de la arquitectura de un sistema IoT, el cual, se compone por la **estructura del sistema de procesamiento de datos**, la **incorporación de sensores y actuadores**, la tecnología de **comunicación para la transmisión de datos** y la **interfaz de usuario** para la visualización de la información.

Siendo este caso de aplicación el monitoreo del proceso de germinación de semillas de jitomate. Para este caso, se monitorean parámetros críticos, tales como la temperatura y la humedad dentro del dispositivo; así como, características importantes del suelo: nitrógeno (N), fosforo (P) y potasio (K), presentes en la tierra de cultivo.

Figuras



Aplicaciones o Impacto en el Entorno

Uno de los **ingredientes característicos** de la **gastronomía mexicana**, es el jitomate (*Solanum lycopersicum*). Según el SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera), durante el año 2022 en Puebla se cosecharon **154,082 toneladas** de esta hortaliza; lo que, lo posiciona a nivel nacional en octavo lugar. Esta hortaliza, en la región de Teziutlán ocupa el penúltimo lugar a nivel estatal con tan solo 772.54 toneladas, esta zona se caracteriza por un clima frio; en donde, los cultivos se realizan preponderantemente en invernadero, por lo que la producción de este fruto puede ser incrementada mediante germinación, desde invernaderos. El **proceso de germinación**, considera diversos parámetros que deben ser **monitoreados** para logar que el **producto agrícola** se logre en **tiempo y forma**. La germinación es crítica, debido a que de esto depende el buen desarrollo de la hortaliza; por ello, el conocer el comportamiento de sus valores en tiempo real se torna necesario.

Conclusión

La incorporación de tecnologías en los procesos agrícolas puede mejorar el uso de los recursos económicos y naturales, de manera que se favorece el desarrollo agrícola y el desarrollo económico de los productores, situación que impacta en el entorno económico y social de los productores y de las partes interesadas. Entonces, la Agricultura de Precisión, desde la IoT, permite monitorear el estado de los parámetros agrícolas en tiempo real, siendo esta un herramienta de apoyo para los agricultores.

Referencias "Para saber más"

- SIAP. (2021). Avance de Siembras y Cosechas, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Resumen por estado. Recuperado el 15 de junio de 2024, de http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do
- J. M. Pita Villamil y F. Pérez García. (2001). Germinación de Semillas, Madrid: Biología Vegetal, E.U. *Ingeniería Técnica Agrícola*, UPM 28040 Madrid.
- Llaneza González, P. (2018). Seguridad y responsabilidad en la Internet de las cosas (IoT) (1a. ed.). *Wolters Kluwer*.
- K. Shafique, B. A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi and M. Mustaqim. 2020. Internet of Things (IoT) for Next-Generation Smart Systems: A Review of Current Challenges, Future Trends and Prospects for Emerging 5G-IoT Scenarios, in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23022-23040, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970118.

ISBN: En trámite

Automatización de un sistema de CO_2

Barojas-Vázquez, José Alonso*, Malagón-González, Fernando*, Navarrete-Hernández, Gabriel Antonio*, Grande-Ramírez, José Roberto*
* Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz

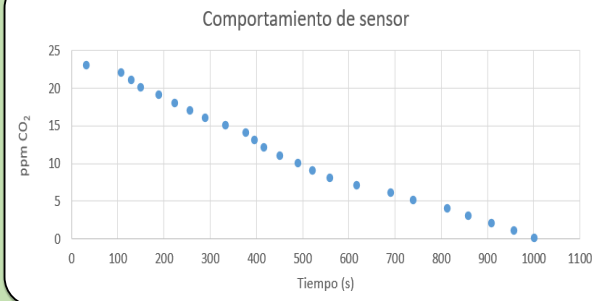
Introducción

La automatización en la agricultura está revolucionando la producción de alimentos. Sistemas modernos permiten controlar variables clave como la concentración de dióxido de carbono (CO_2) y oxígeno, optimizando el crecimiento de cultivos y mejorando la eficiencia de recursos. Por ejemplo, el uso de sensores y controladores automáticos en invernaderos permite mantener niveles óptimos de CO_2, acelerando el desarrollo de plantas como lechuga y tomate. Además, tecnologías como Arduino, LabVIEW y algoritmos genéticos se aplican para optimizar la producción de microalgas y biodiésel, mejorando la sostenibilidad (Toledo, 2001; Guzmán et al., 2020).La automatización no solo reduce el margen de error humano, sino que también hace más eficiente el uso de agua, energía y agro insumos, impactando positivamente en la producción agrícola y el medio ambiente. ¿Sabías que mantener altos niveles de CO_2 puede aumentar la productividad de un cultivo hasta en un 30%? Este tipo de datos destacan la importancia de automatizar procesos agrícolas para un futuro más sostenible.

Contenido principal

La automatización agrícola es una tecnología que permite controlar de manera automática las condiciones de cultivo, como la cantidad de dióxido de carbono (CO_2), la temperatura o la humedad, para mejorar el crecimiento de las plantas. Su importancia radica en que ayuda a producir más alimentos de manera eficiente, reduciendo el consumo de agua y energía, y disminuyendo el margen de error humano. Para lograr esto, se utilizan sensores que miden variables como la temperatura y la cantidad de CO_2 en el aire. Estos datos son procesados por controladores automáticos, como un PLC o una placa Arduino, que realizan los ajustes necesarios para mantener condiciones ideales. Además, mediante pantallas o interfaces gráficas, los agricultores pueden visualizar en tiempo real lo que ocurre en el cultivo.

Gráfica



Imágenes

El sistema de concentración de dióxido utiliza un diagrama neumático para facilitar las conexiones del sistema. Del tal forma se tienen los tres contenedores con diferentes cargas PPM de CO_2 y se agregan a un contenedor de oxigeno para estabilizar el sistema. Se cuenta con electroválvulas de inyección de aire, CO_2, oxigeno y finalmente las que van a los biorreactores. Hay que mencionar que se hicieron pruebas de los sensores para verificar la linealidad de estos.

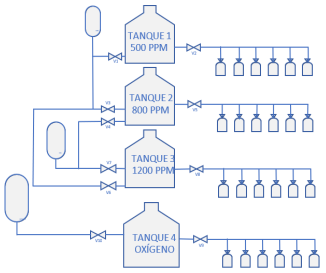


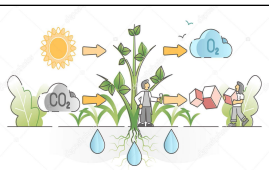
Figura 1 Diagrama de conexiones

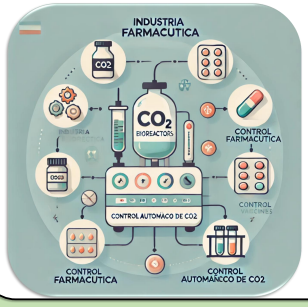
¿Sabías que CO_2 no solo es un gas de efecto invernadero, sino también un factor clave para el crecimiento celular en biorreactores?

En procesos industriales, controlar el CO_2 de manera automática permite que microorganismos y células crezcan en condiciones óptimas, lo que es esencial para producir alimentos, medicamentos y biocombustibles.

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

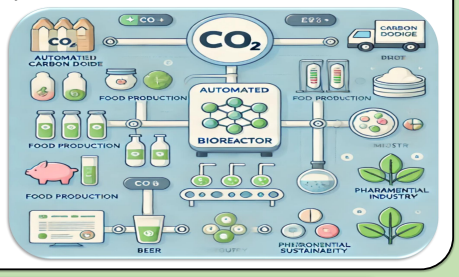
En la industria farmacéutica
El cultivo de microorganismos y células en biorreactores controlados permite fabricar medicamentos, vacunas y suplementos. Gracias a la automatización del CO_2, se mantiene un ambiente óptimo para la producción, lo que ayuda a que estos productos lleguen de manera más segura y rápida a los pacientes.





En la sostenibilidad y el medio ambiente
Este tipo de automatización también se aplica en la producción de biocombustibles o en procesos de tratamiento de aguas residuales. Ajustar el CO_2 de manera precisa mejora la eficiencia de microorganismos que degradan contaminantes o producen energía limpia, beneficiando al medio ambiente y reduciendo la huella de carbono.
Ejemplo real: En una planta de tratamiento de aguas, el uso de biorreactores automatizados permite reducir la contaminación de ríos y lagos, garantizando un entorno más saludable para las comunidades.

En la producción de alimentos y bebidas
Los biorreactores automatizados son clave en la producción de alimentos fermentados (como yogur, cerveza o pan) y otros productos biotecnológicos. Controlar de manera automática los niveles de CO_2 garantiza procesos más eficientes, seguros y de mejor calidad.



Conclusión

La automatización agrícola transforma la manera en que se cultivan los alimentos, optimizando recursos y mejorando la calidad de los cultivos.
Con sistemas inteligentes, se puede garantizar un futuro más sostenible, eficiente y respetuoso con el medio ambiente. ¡Es hora de llevar la agricultura al siguiente nivel!

Referencias "Para saber más"

Bailey, J. E., & Ollis, D. F. (2018). Biochemical Engineering Fundamentals (3rd ed.). McGraw-Hill Education.

Shuler, M. L., & Kargi, F. (2022). Bioprocess Engineering: Basic Concepts (3rd ed.). Prentice Hall.

Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M., & Wiebe, M. G. (2017). Single cell protein—state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. Frontiers in Microbiology, 8, 2009.

DESARROLLO DE UN SISTEMA MRO ADMINISTRADO MEDIANTE SAP EN ÁREA DE SOLDADURA FIJA PARA EMPRESA WITZENMANN MÉXICO

Sánchez – Ramírez, Félix Antonio, Cárdenas – Manríquez, Marcela, Villegas – Saucillo, J. Jesús
Maestría en Innovación Aplicada (MIA),
Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Celaya, Antonio García Cubas Pte. 600, 38020, Celaya; Guanajuato, México.

Introducción

El **software SAP,** un sistema **ERP "Enterprise Resource Planning"** ha sido ampliamente utilizado durante años para gestionar diversas operaciones internas en las empresas. Está compuesto por módulos, cada uno dedicado a la gestión en distintas áreas, como ordenes de producción, gestión de almacenes, consulta de planos, facturación, compra de materiales, entre otros.

La gestión de materiales, tanto directos como indirectos para la operación de producción, administrada mediante este software tiene resultados significativos al permitir una mejor planificación de las requisiciones de material, así como los niveles de inventario. Esto se traduce en ahorros considerables al reducir el exceso de valor de inventario y minimizar el riesgo de tener falta de material.

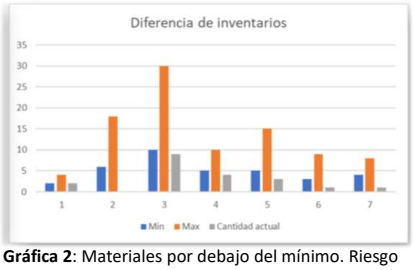
Contenido principal

Para poder gestionar materiales mediante **software SAP,** es necesario contar con el **módulo MM "Material Master"**, el cual permite crear los números de parte que se administrarán en el sistema. Con este modulo es posible dar de alta materiales con toda la información necesaria para la administración: Ubicación de almacenamiento, categoría, precio, tipo de demanda, proveedor, especificaciones y/o planos, inventario, requisición, facturas, entre otros. Esta gestión, acompañada de una estrategia basada en herramientas estadísticas, permite tener un control óptimo de los recursos, aumentando la eficiencia del sistema de administración de materiales.

Imágenes y gráficas



Gráfica 1: Materiales con exceso de inventario. Valor de inventario alto.



Gráfica 2: Materiales por debajo del mínimo. Riesgo de afectar la producción por falta de material



Imagen 1: Sistema Kanban para identificar materiales.

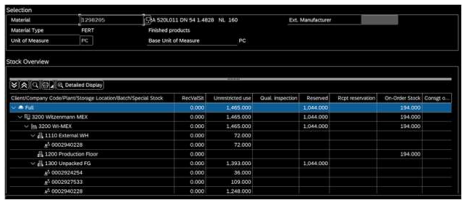
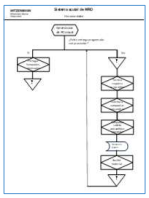
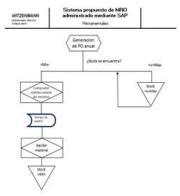


Imagen 2: Desglose de inventario en SAP



Antes



Después

Imagen 3: Mejora en el flujo de requisición de material

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

SAP es un **software** ampliamente utilizado por diferentes industrias, con resultados comprobados a lo largo de años que lleva en el mercado. Su facilidad de adaptarse a diversos entornos de trabajo, líneas de negocios y para interconectar diferentes áreas de una empresa, ha hecho que se consolide como uno de los **ERP** mas confiables y utilizados en la actualidad. Diversos estudios y casos han documentan los beneficios de integrar este software en sistemas de gestión en empresas.

Conclusión o mensaje final

La implementación del **software SAP,** acompañada de buenas practicas internas de gestión, representa un beneficio importante para cualquier empresa en crecimiento, especialmente ante la complejidad que esto operativa que esto implica.

Si bien su integración puede suponer un reto, debido a la necesidad de capacitación para comprender el entorno del programa y configurar adecuadamente el **modulo MM "Material Master"**. Las ventajas que ofrece han sido ampliamente documentadas en estudios y casos de aplicación.

Además, es posible incluir herramientas tecnológicas para facilitar la actualización de la información dentro del sistema.

Referencias "Para saber más"

Durazo Méndez , J. H. (2019). *ESTRATEGIAS DE COMPRAS PARA REDUCIR EL SOBRE INVENTARIO DE REFACCIONES Y MEJORAR EL FLUJO DE DINERO EN LEONI WIRING SYSTEMS EN HERMOSILLO".* INSTITUTO TECNOLOGICO DE HERMOSILLO.

Joven, D. P. (2018). *Mejora en la Administración de inventarios en un almacén de repuestos a través del módulo MM en SAP.* Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería .

Lovera, M. L. (2022). *UTILIZACIÓN DEL SISTEMA SAP PARA LA MEJORA EN LA GESTIÓN DE INVENTARIOS DE LA EMPRESA ELECTROANDINA INDUSTRIAL S.A.C.* FACULTAD DE CIENCIAS DE GESTIÓN.

Martin del Campo Verdin, C. A. (2016). *Diseño y desarrollo de un sistema de gestión de inventarios con integración a SAP Business One.* Universidad Jesuita de Guadalajara.

ISBN: En trámite

AUTOMATIZACIÓN DE ESTUDIO DE TIEMPOS EN LA INDUSTRIA 4.0: INGRACIÓN DE VISIÓN ARTIFICIAL Y KNN

Marcela Palacios Ortega, Armando Mares Castro, Valentín Calzada Ledezma, José Ramón Gómez Armenta
Departamento de Ing. Industrial / Ing. en Informática - Tecnológico Nacional de México –ITS de Purísima del Rincón.

Introducción

Este artículo presenta un sistema automatizado diseñado para clasificar movimientos MTM-2 (Sistema de tiempos predeterminados) utilizando visión por computadora y aprendizaje automático, abordando las limitaciones de los métodos tradicionales basados en la observación humana. La metodología desarrollada consta de siete etapas: análisis teórico de movimientos MTM-2, realización de fichas técnicas, captura de video estandarizado, extracción de características, creación de un dataset, entrenamiento de un modelo KNN y evaluación. Con una precisión del 100% en la clasificación de tres movimientos básicos sobre 315 muestras, el sistema demostró fiabilidad frente a asimetrías posturales y variaciones de velocidad. Aunque el sistema mostró sensibilidad a condiciones de iluminación y requerimientos de recalibración en operarios con antropometrías extremas, este estudio representa un avance hacia la digitalización de la toma de tiempos convencional ya que además de su bajo costo, ha contribuido a reducir los tiempos de análisis en un 92% respecto a los métodos manuales.

Objetivos

Objetivo General: Desarrollar un sistema automatizado basado en visión por computadora y aprendizaje automático que permita la clasificación de movimientos, con el propósito de optimizar la estimación de tiempos estándares.

Objetivos específicos:

- Analizar técnicas de tiempos predeterminados.
- Aplicar técnicas de visión artificial y utilizar el algoritmo de aprendizaje supervisado KNN para la clasificación de movimientos.
- Establecer indicadores de precisión en la clasificación

MTM-2 (Methods-Time Measurement-2) es una versión simplificada del sistema MTM original (MTM-1), desarrollada para analizar tareas manuales repetitivas con mayor rapidez sin perder precisión en la estimación del tiempo estándar y sin usar cronómetro.

Imágenes y gráficas



Fig. 1 Metodología propuesta.

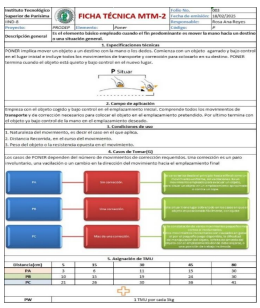


Fig. 2. Ficha Técnica Movimiento "Poner" MTM-2

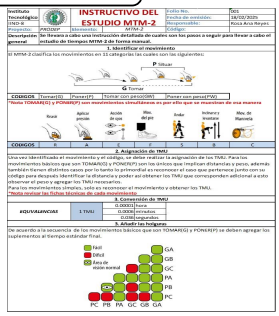


Fig. 3 Esquema de lazo cerrado propuesto para el sistema

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

La digitalización de procesos, especialmente aquellos que son repetitivos, costosos y que consumen mucho tiempo, representa actualmente una gran oportunidad para las empresas que buscan optimizarlos. Mediante el uso de inteligencia artificial y otras tecnologías propias de la Industria 4.0, estos procesos pueden hacerse más eficientes, fáciles de replicar y representan un mejor uso de los recursos en el ámbito de la ingeniería de métodos y tiempos, se utiliza la librería MediaPipe de Google basada en Python para la clasificación e identificación de puntos además del algoritmo KNN de Python.



Fig. 4. Estación de trabajo

Se diseñó una estación con elementos ergonómicos para la realización de los videos (Fig. 4).

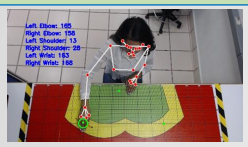


Fig. 5 Extracción de características

Se reconocieron y clasificaron los movimientos a partir de una posición neutral para los elementos básicos de tomar y poner con respecto a la articulación, codo derecho, codo izquierdo, hombro izquierdo, hombro derecho, muñeca izquierda y muñeca derecha.

```
Código KNN en Python:
from sklearn.neighbors import KNeighborsClassifier
model = KNeighborsClassifier(
    n_neighbors=3,      # Hiperparámetro optimizado
    weights='distance', # Ponderación por proximidad
    metric='euclidean', # Distancia Euclidiana
    algorithm='kd_tree' # Optimización de búsqueda
```

Real \ Predicho	Alcanzar	Colocar	Inicio
Alcanzar	86	0	0
Colocar	0	200	0
Inicio	0	0	29

Tabla 1 Matriz de confusión detallada

Clase	Precisión	Recall	F1-Score	Muestras
Alcanzar	1.00	1.00	1.00	86
Colocar	1.00	1.00	1.00	200
Inicio	1.00	1.00	1.00	29

Tabla 2 Reporte de clasificación por clase

Conclusión o mensaje final

El estudio demostró la viabilidad de utilizar visión por computadora y KNN para automatizar la clasificación de movimientos MTM-2 con un 100% de precisión en condiciones controladas. Estos resultados superan los obtenidos en estudios similares que emplearon realidad virtual (Gorobets et al., 2024) o sensores portátiles (Plantard et al., 2014), donde la precisión osciló entre 85-94%. La extracción de características fue efectiva debido a que los ángulos articulares (hombro, codo, muñeca) resultaron ser predictores adecuados para distinguir entre movimientos básicos como Alcanzar, Colocar y poner.

Referencias "Para saber más"

- Adelsberger, R., Kunz, A., Gorobets, V., Billeter, R., & Adelsberger, R. (2024). Automatic transcription of the Methods-Time Measurement MTM-1 motions in VR. *Human Interaction and Emerging Technologies (IHIET-AI 2024): Artificial Intelligence and Future Applications*, *120*, 250–259. https://doi.org/10.54941/AHFE1004575
- Gorobets, V., Andreopoulos, E., & Kunz, A. (2024). Automatic transcription of the basic MTM-2 motions in virtual reality. In *Progress in IS* (Part F3229, pp. 263–266). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60313-6_19
- Gorobets, V., Holzwarth, V., Hirt, C., Jufer, N., & Kunz, A. (2021). A VR-based approach in conducting MTM for manual workplaces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *117*(7–8), 2501–2510. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07260-7
- Plantard, P., Auvinet, E., & Multon, F. (2014). Reliability of Kinect measurements for assessing the movement of operators in ergonomic studies. https://doi.org/10.34894/VQ1DJA
- Wang, S., He, S., & Zhu, H. (2012). Similarity measurement and feature selection using genetic algorithm. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 7368, Part 2, pp. 20–29). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31362-2_3
- Wellstead, P. E. (1979). *Introduction to physical system modelling* (Vol. 4). Academic Press.

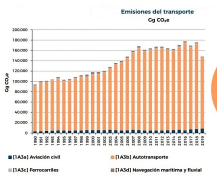
Vehículos eléctricos: *Su impacto en la movilidad sostenible y los desafíos en el almacenamiento y manejo de energía*

Moisés Rendón Valdéz, Abraham Claudio Sánchez, Jarniel García Morales
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

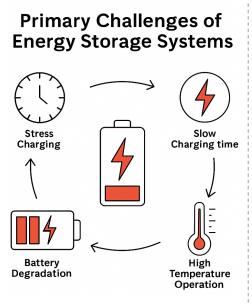
Introducción

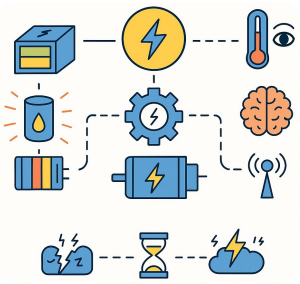
La necesidad de transporte es una realidad ineludible en la actualidad, por lo que optar por soluciones sustentables se vuelve cada vez más importante. Sin embargo, estas alternativas enfrentan ciertos desafíos en distintos ámbitos, especialmente en sus sistemas de almacenamiento de energía, los cuales sufren un estrés constante que afecta su desempeño.

Circunstancias





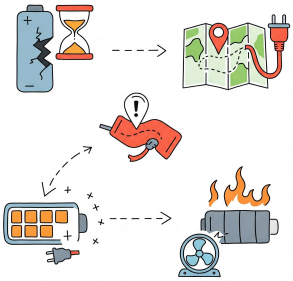




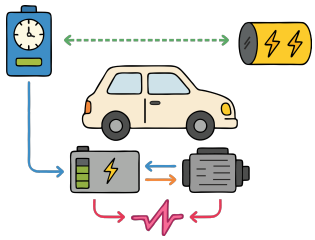
Para saber más

- Xiong, R., et al. (2022). "Key technologies for electric vehicles." Green Energy and Intelligent Transportation 1(2): 100041.
- Habib, A. A., et al. (2023). "Lithium-Ion Battery Management System for Electric Vehicles: Constraints, Challenges, and Recommendations." Batteries.
- Dong, Z., et al. (2022). "A Survey of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems: Concept, Topology, Control and Application." Symmetry 14: 1085.
- Chan, C. K., et al. (2023). "Optimizing Thermal Management System in Electric Vehicle Battery Packs for Sustainable Transportation." Sustainability.

Contenido principal



Los sistemas híbridos de almacenamiento de energía y las estrategias de manejo energético son clave para reducir la degradación de las baterías y, por tanto, mejorar el rendimiento de los vehículos eléctricos. Aun así, la elección entre diversas alternativas de almacenamiento de energía no es una tarea simple, pues el sistema híbrido combina sus características para compensar sus debilidades individuales (como el calor generado o los tiempos de carga), con lo que una decisión descuidada puede mermar o empeorar su desempeño.



"Un sistema de almacenamiento de energía dimensionado adecuadamente, es candidato perfecto para la optimización de sus procesos".

¿Sabías que…?

El tamaño del vehículo eléctrico influye directamente en la implementación y complejidad de los sistemas de almacenamiento y manejo de energía. Factores como el espacio disponible o el costo total del vehículo determinan qué tan viable es una solución determinada.



Conclusión o mensaje final

Es indispensable desarrollar formas más eficientes de almacenar y utilizar la energía, pues la demanda muestra una tendencia creciente. No obstante, más allá del desarrollo de nueva tecnología, es nuestra responsabilidad como usuarios actuar de forma consciente, ya que nuestras decisiones impactarán de maneras que aún no podemos dimensionar al haber dejado de lado la posibilidad de un futuro mejor.

México Sostenible: El Rol de los Aerogeneradores en la Transición Energética

José Toledo Wong*, Susana De León Aldaco*, Mónica Borunda Pacheco*, Jesús Aguayo Alquicira*, Elías Ramos Hernández*, Alan Jair Gamboa Escobar**

* TECNM / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).
Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490. Cuernavaca, Morelos, México.
** Instituto Politécnico Nacional ESIME Unidad Azcapotzalco, CDMX, México.

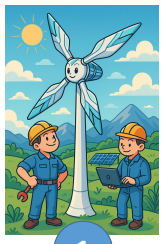
Introducción

México se encuentra en una etapa clave de su **transición** hacia un modelo energético más **limpio y sostenible**. En este proceso, los **aerogeneradores** son dispositivos que convierten la energía del viento en electricidad y juegan un papel fundamental en la transición energética.

Su implementación ayuda a disminuir la **dependencia de los combustibles fósiles**, bajar las emisiones de contaminantes y utilizar los amplios recursos eólicos de México, principalmente en áreas como el Istmo de Tehuantepec, debido a que esta región posee condiciones ideales para la generación de **energía eólica**.

Contenido principal

Funcionamiento de un aerogenerador.



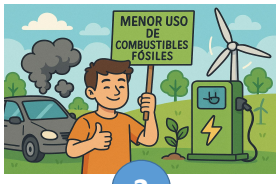
1

Usar el viento para generar energía.



2

Menor uso de combustibles fósiles.



3

❖ Vientos constantes y fuertes todo el año.

❖ Geografía favorable: corredor natural de aire.

Zona geográfica



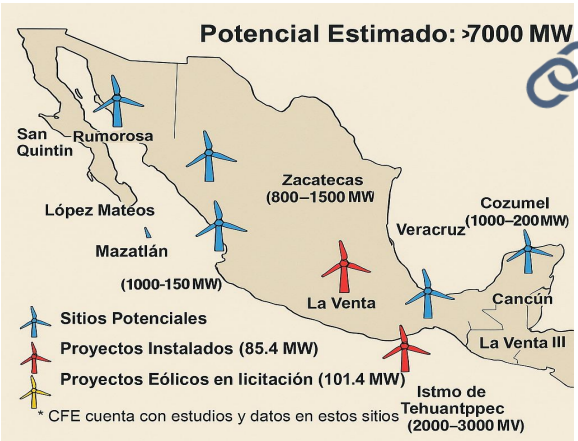
4

Acciones necesarias de la comunidad.



5

Distribución de parques eólicos en México



"¿Sabías que…?"

❖ En 2024, México alcanzó una capacidad instalada de 9.6 GW.

❖ En 2024, México cuenta con 86 parques eólicos activos.

❖ Los aerogeneradores giran lentamente, pero generan mucha energía.

❖ Un aerogenerador aprovecha solo un 40-50% del viento.

Aplicaciones o impacto en la vida cotidiana / entorno

- Disminución de la contaminación en términos de la quema de hidrocarburos.
- Promover el uso de fuentes naturales como el viento.
- Produce electricidad y favorece al reducir el costo energético.
- Da las pautas para ser un México mas autosustentable.

Conclusiones

La energía del viento es fundamental para crear un México más limpio, justo y sostenible. A través del uso de a aerogeneradores, aprovechamos el viento para producir electricidad de manera limpia, disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y cuidar el medio ambiente. El propósito de este trabajo es dar a conocer la importancia de los aerogeneradores en México y, hacer un llamado a la comunidad a utilizar energía renovables. Cada paso es importante. Estar informados, cuidar cómo usamos la energía y respaldar las energías renovables nos acerca a un futuro más prometedor.

¡¡¡Convirtamos el viento en un compañero para cambiar nuestro país.!!!

Referencias "Para saber más"

La energía eólica en México. Una perspectiva social sobre el valor de la tierra, SEGOB. 2020.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31621/eolico.pdf

TheWindPower,
https://www.thewindpower.net/store_country_es.php?id_zone=36

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet®
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

CITCA

4to. Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada

del 21 al 23 de mayo, 2025

Cuernavaca, Morelos

1° Torneo Nacional de Robótica
CENIDET MAYO 2025

RoBOT CITCA