# TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Julio - Diciembre 2022 Vol. 5/ Núm. 2 ISSN: En trámite

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

**Volumen 5, Número 2, Julio - Diciembre 2022**

# JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA

**VOLUMEN 5, NÚMERO 2, JULIO - DICIEMBRE 2022** **ISSN: En trámite**

Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Interior Internado Palmira s/n
C. P. 62490
Cuernavaca, Morelos, México.
https://jcyta.cenidet.tecnm.mx/
http://cenidet.tecnm.mx/

Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada, Volumen 5, Núm. 2, Julio - diciembre 2022, es una publicación semestral, publicada y editada por el Tecnológico Nacional de México dependiente de la Secretaría de Educación Pública, a través del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Avenida Universidad No. 1200, 5to. Piso, Colonia Xoco, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, Ciudad de México, México, Tel. + (52) 5536002500. Ext. 65064, d_vinculacion05@tecnm.mx, Editora Responsable M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2019-0222612512500-2013, ISSN: En trámite, ambos son otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino, docente del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Colonia Palmira, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 62490, Tel. +(52) 777 3627770, fecha de término de última actualización, 26 de Diciembre de 2022.

Su objetivo principal es difundir resultados de proyectos de investigación de estudiantes de posgrado, investigadores y profesores de diferentes instituciones educativas y de investigación del país y del extranjero de las áreas de Ciencias de la Ingeniería, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Computación, principalmente.

Para su publicación los artículos son sometidos a arbitraje, su contenido es de la exclusiva responsabilidad de los autores y no representan necesariamente el punto de vista de la Institución. Las publicaciones de los artículos son sometidas a revisión por un comité de arbitraje y el contenido es responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda prohibida la reproducción parcial o total de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto encargado, salvo que sea citada la fuente de origen.

# DIRECTORIO

Mtro. Ramón Jiménez López
Director General del Tecnológico Nacional de México (TecNM)

Dr. Arturo Ernesto Mares Gardea
Directora del TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET)

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Subdirector Académico del TecNM/CENIDET

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Subdirectora de Planeación y Vinculación del TecNM/CENIDET

Dr. Juan Reyes Reyes
Jefe del Departamento de Gestión Tecnológica y Vinculación del TecNM/CENIDET

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Jefa del Departamento de Desarrollo Académico e Idiomas

Dr. Juan Gabriel González Serna
Jefe del Departamento de Ciencias Computacionales

Dr. Hugo Estrada Esquivel
Jefe del Departamento de Ingeniería Electrónica

Dr. Mario Alejandro Gómez Jiménez
Jefe del Departamento de Ingeniería Mecánica

Portada: Imagen recabada y tratada de la Figura 1 Estructura de los principales flavonoides del artículo titulado *Extracción e identificación de flavonoides y terpenoides de Estafiate,* del área de Ciencias de la Ingeniería.

# EDITORIAL

Difundir investigaciones inéditas relacionadas con las diferentes áreas de la ingeniería en Ciencias Computacionales, Ciencias de la Ingeniería, Ingeniería Electrónica e Ingeniería Mecánica, es uno de los propósitos de la revista académica del Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET).

En este octavo número, Volumen 5, Número 2 Julio-Diciembre de 2023 de la Revista Académica del CENIDET, Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada, se recibieron 71 trabajos, los cuales fueron revisados por un Comité de Arbitraje integrado por especialistas del TecNM/CENIDET y de revisores expertos externos adscritos a los Tecnológicos de Apizaco, de Nuevo León, de Zacatecas, de Tlalnepantla, de Chihuahua, así como de las Universidades Autónomas de Guadalajara, Guanajuato, Papaloapan, estado de Hidalgo, entre otras Instancias Educativas y de Investigación del país. Los revisores seleccionaron 61 trabajos, por presentar en su escritura el suficiente rigor científico, aportar soluciones de diversas problemáticas, entre ellas las sociales; desarrollarse bajo una metodología acorde a las especificaciones de la revista, además de mostrar veracidad en los resultados de investigación.

Los trabajos aprobados se presentaron de manera presencial y virtual en la 9ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada de manera presencial y virtual ante un Comité del 16 al 18 de noviembre de 2022. El Comité Técnico de esta edición estuvo integrado por la Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles, quien fue también la Coordinadora General de la 9ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada y por los doctores Juan Gabriel González Serna y María Yasmín Hernández Pérez; los tres editores generales de los artículos

Cada una de las áreas tuvo la comprometida participación de editores asociados; en el área de Ciencias de Computación participaron Dante Mujica Vargas y Juan Carlos Rojas Pérez; en Ingeniería Electrónica Carlos Daniel García Beltrán y Ricardo Fabricio Escobar Jiménez; en Ingeniería Mecánica Arturo Abúndez Pliego y en Ciencias de la Ingeniería Gloria Lilia Osorio Gordillo y Rodolfo Amalio Vargas Méndez. El TecNM/CENIDET agradece el trabajo de cada uno de los revisores la Revista de la Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada y de los autores de los artículos; ambas participaciones muestran la calidad del contenido de la revista científica, académica constituyendo en garante la ética del autor que publica y del revisor que valida.

El tiempo de dedicación a esta función es exigente al recibir los textos, revisarlos, seleccionar los artículos a través del proceso de arbitraje y publicarlos; es una labor loable proyectada en esta publicación.

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Editora
Revista Académica Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada
del TecNM/CENIDET

# Comité de Arbitraje TecNM/CENIDET

## CIENCIAS COMPUTACIONALES

Dr. Nimrod González Franco
Dra. Alicia Martínez Rebollar
Dr. Javier Ortíz Hernández
Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles
Dra. Olivia Graciela Fragoso Díaz
Dra. Andrea Magadan Salazar
Dr. René Santaolaya Salgado
Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez
Dra. María Yazmín Hernández Pérez
Dr. Dante Mújica Vargas
Dr. Juan Carlos Rojas Pérez
Dr. Hugo Estrada Esquivel
Dr. Joaquín Pérez Ortega
Dr. Manuel Cándido Juárez Pacheco
M.C. José Luis Ramírez Alcantara
M.C. Julia Guadalupe Juárez Hernán
M.C. Guadalupe Candia Zavaleta
M.C. José Antonio Sandoval Acosta
Dr. Vitervo López Caballero
M.C. Socrátes Benítez Domínguez
M.C. Nélida Barón Pérez

## INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Dr. Abraham Claudio Sanchez
Dr. Carlos Astorga Zaragoza
Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Dr. Enrique Quintero Marmol
Dr. José Francisco Gómez Aguilar
Dr. Gerardo V. Guerrero-Ramírez
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Dr. Isaac Canela Sánchez
Dr. Jesús Mina Antonio
Dra. Ma. Guadalupe López López
Dr. Manuel Adam Medina
Dr. Mario Ponce Silva
Dr. Miguel-Ángel Franco Nava
Dra. Susana De León Aldaco
Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez

## CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Dr. Andres Blanco Ortega
M.C. Nayeli del Milagro Hernández Barba
Dr. Enrique Quintero-Mármol Márquez
Dra. Ma. Guadalupe López López
Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Dr. Juan Reyes Reyes
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Lic. Daniela Hernández Castañeda
Dra. Sara Lilia Moya Acosta
Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez

## INGENIERÍA MECÁNICA

Dr. Arturo Abúndez Pliego
M.C. Luis Alberto Baltazar Tadeo
Dr. Andrés Blanco Ortega
Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda
Dra. Yvonne Chávez Chena
Dr. Jorge Colín Ocampo
Dr. José Jassón Flores Prieto
Dr. Vicente Guerrero Ramírez
Dra. Sara Lilia Moya Acosta
M.C. Kevin Edson Petatán Bahena
Dr. Efraín Simá Moo

# Comité de Arbitraje Externo

## INGENIERÍA MECÁNICA

Dra. Karla María Aguilar Castro Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Dr. Manuel Arias Montiel Universidad Tecnológica de la Mixteca
Dr. Jorge Bedolla Hernández TecNM/IT Apizaco
Dr. Quirino Estrada-Barbosa Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Dr. Irving Osiris Hernández López Universidad de Sonora
Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros UNAM/IER
Dr. José Martínez Trinidad IPN/ESIME
Dra. Adriana H. Vilchis González Universidad Autónoma del Estado de México

## CIENCIAS COMPUTACIONALES

Dra. Julia Yazmín Arana Llanes Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Dr. Fernando Pech May Instituto Tecnológico Superior de los Ríos
Dr Jorge Ochoa Somuano Universidad del Mar
Dra. Mireya Tovar Vidal Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Dra. Sheydi Anel Zamudio López Instituto Tecnológico de Nuevo León
Dra. Juana Canul Reich Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Dr. Jaime Ivan López Veyna Instituto Tecnológico de Zacatecas
Dra. Adriana Mexicano Santoyo TecNM/Campus Cd. Victoria
Dra Sergio Fabian Ruíz Universidad del Papaloapan
Dr. Miguel Angel Hidalgo Reyes Catedrático CONACyT
Dr. Carlos Joel Rivero-Moreno UAM Cuajimalpa
Dra. Hilda Castillo Zacatelco Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Dra. María de los Angeles Cosío León Universidad Politécnica de Pachuca
Dra. María Clara Gómez Álvarez Universidad de Medellín
Dra. Elsa Ortega de Ávila Instituto Tecnológico de Zacatecas
Dra. Nelva Nely Almanza Ortega Instituto Tecnológico de Tlalnepantla

## INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Dra. Adriana Del Carmen Téllez Anguiano TecNM/IT Morelia
Dra. Betty Yolanda López Zapata UP Chiapas
Dr. José Alfredo Hernández Pérez UAEM/CIICAP
Dr. Ricardo Lozoya Ponce TecNM/IT Chihuahua
Dra. Maria Eusebia Guerrero Ramírez TecNM/IT Hermosillo
Dr. José Hugo Arellano Pérez CENAM
Dr. Jose Pastor Rodriguez Jarquin TecNM/IT Orizaba
Dr. Juan Aqui Tapia OSRAM, Mexico
Dra. Peggy Alvarez Gutiérrez TecNM / Tuxtla Gutiérrrez
Dr. Gabriel Calzada Lara COLPOS/ San Luis Potosí
Dr. Gerardo Ortiz Torres Universidad de Guadalajara
Dr. Felipe De Jesús Torres Del Carmen Universidad de Guanajuato
Dr. Cornelio Morales Morales TecNM/ IT Chilpancingo

# JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA


## Consejo editorial de la publicación

**M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino**
Editora

**Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza**
Coeditor

**Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez**
**Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo**
**Dr. Manuel Adam Medina**
Editores Asociados

**Mtro. Víctor Josué Ruiz Martinez**
Sitio Web

**Fernanda Jared Gálvez Flores**
Diseño de Portada

**Janithzou Santamaría Riquelme**
**Dana Santamaría Riquelme**
Diseño Editorial

## Comité Técnico de los Articulos de la 9a Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada

**Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles**
**Dr. Juan Gabriel González Serna**
**Dra. María Yasmín Hernández Pérez**
Editores de los Articulos

**Dr. Dante Mujica Vargas**
**Dr. Juan Carlos Rojas Pérez**
Editores Asociados
Ciencias Computacionales

**Dr. Carlos Daniel García Beltrán**
**Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez**
Editores Asociados
Ingeniería Electrónica

**Dr. Arturo Abúndez Pliego**
Editores Asociados
Ingeniería Mecánica

**Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez.**
**Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo**
Editores Asociados
Ciencias de la Ingeniería

**Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles**
Administrador de la plataforma Easychair

**Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles**
Página Web de la conferencia 9aJCyTA

# CIENCIAS COMPUTACIONALES

•Arquitectura para el análisis y evaluación de actividad de comprensión lectora en computadora aplicando técnicas de seguimiento ocular basadas en visión artificial .....13

•Caracterización de los tipos de Fragmentación en Sistemas Gestores de Bases de Datos Relacionales .....19

• Análisis histórico de servicios de salud a población que carece de empleo formal .....26

• Procesado de imágenes para la obtención de la posición de líneas de pasillo en corredores industriales .....32

• Aprendizaje Emocional en la Gamificación .....38

• Arquitectura de software para utilizar realidad aumentada con control gestual de manos en apoyo al aprendizaje de la lectoescritura .....44

• Análisis de la caracterización de estilo de conducción en la prevención de accidentes por consumo de alcohol .....50

• Utilizacion de tecnicas heurIsticas basadas en el enfoque evolutivo para la optimizacion de acomodo de cajas de diferentes tamaño en un espacio tridimensional limitado (problema bin-packing) .....53

• Utilizando el IoT Para calcular la evapotranspiración de referencia en agricultura protegida .....59

• Reglas de asociación en variables relevantes en diferentes evaluaciones en exámenes de matemáticas. .....65

• Percepción remota por medio de UAV en tiempo real: El escenario actual de la literatura .....71

• Sistema de control para la generación de estímulos automáticos en terapias multisensoriales para personas con Síndrome Down .....76

• Sistema de control para la generación de estímulos automáticos en terapias multisensoriales para personas con Síndrome Down .....82

• Experimento para capturar datos fisiologicos e interpretar estados cognitivos en evaluaciones UX .....89

• Extensión del metamodelo de almacén de datos común CWM mediante puntos de vista que representen preferencias de usuarios .....95

• Propuesta de un Patrón de Seguridad para Arquitecturas de Microservicios .....101

• Refactorización de Módulos Colaborativos con Carencia de Abstracción .....108

• Generador Automático de Código Mixto Para Interoperar Lenguajes Fortran-C++ para Acceder a Base de Datos Relacionales desde Fortran .....114

• Arquitectura para Acceso a Datos Abiertos Públicos Mediante Software Intermediario y Asistente Virtual .....120

• Implementación del Método Basado en Umbrales en Arduino 33 BLE para la Detección de Caídas en Adultos Mayores .....125

• Estimacion de biomasa microalgal con procesamiento de imagenes digitales .....131

• Comparativa de Algoritmos de Súper Resolución en Imágenes de Videovigilancia .....136

• Transformación de objetos de aprendizaje en servicios Web de aprendizaje .....141

• Modelo de Usabilidad para Recursos de Aprendizaje Digitales .....147

• DevOps desde la academia y la industria: una revisión sistemática de la literatura .....154

• Breve revisión de la literatura en aprendizaje automático aplicado al análisis de las estructuras de diferentes anticuerpos .....161

## INGENIERIA ELECTRONICA

• Detección y extracción de características de señales de ECG basadas en transformadas de ondas discretas .....168

• Sintonización Espectral a Partir de Radiación UV en un Derivado de Imidazol Como Convertidor de Longitud de Onda .....174

• Estrategias de Consenso en Microrredes de CD .....178

• Speed and position control of a robotic arm with application to a GMAW welding process .....184

• Instrumentación industrial aplicada a sistemas de supervisión de intercambiadores de calor en procesos de pasteurización de jugos .....190

• Estimacion de variables de estado de una suspension semi-activa con amortiguador magnetoreologico utilizando el enfoque intervalar .....196

•Diseño de Incertidumbre y estudio del caos en un modelo del crecimiento de tumores cancerígenos de orden entero .....202

• Control de velocidad de un motor de CD .....208

• Consumo eléctrico del sistema de enfriamiento en un fotobiorreactor a partir de la implementación de estrategias de control basadas en el uso de convertidores electrónicos de potencia .....211

• Instrumentación industrial aplicada a sistemas de supervisión de intercambiadores de calor en la producción de polietileno .....217

• Comparacion de algoritmos para la sincronizacion de sistemas caoticos inciertos .....222

• Evaluación experimental de las variables con mayor impacto en el proceso de producción de bioetanol de segunda generación .....228

• Analisis y diseño de un filtro LCL para inversor conectado a la red .....234

• Estrategia de Deteccion y Localizacion de Fallas en convertidores tipo Boost Basado en Espacio de Paridad .....240

• Revisión de Alternativas para la Simplificación de Microinversores Aislados para Aplicaciones Fotovoltaicas .....246

## CIENCIAS DE LA INGENIERIA

• Extracción e identificación de flavonoides y terpenoides de Estafiate (Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana) .....253

• Automatización de un proceso de decorado por tampografía .....258

• Implementation of a fuzzy system in fpga for the detection of moving objects .....264

• Aspectos biotecnológicos en el crecimiento inicial de pinus oaxacana mirov en la región mixteca de oaxaca .....270

• Control de Actuadores para un Sistema de Rehabilitacion de Movimiento .....277

• Platos biodegradables base biológica como alternativa sostenible para recipientes de un solo uso .....283

• Estudio de la Influencia de Barreras Externas en la Ventilación Natural de Invernadero Tipo Gótico mediante CFD .....288

• Modelo Dinámico de Crecimiento de dos Especies en Amensalismo para Representar el Comportamiento de un Fenómeno Económico .....293

## INGENIERIA MECANICA

• Evaluación térmica de una ventana de vidrios múltiples caso de estudio: clima Aw, Mérida, Yucatán 2022 .....300

• Prototipado virtual y co-simulación ADAMS-MATLAB de un cobot UR10 para la implementación de una estrategia de control de posición basada en PID .....306

• Underactuated Robotic Finger Mechanism for Cylindrical Grasping Using Flexible Links .....313

• Análisis comparativo en la medición de aceleración en chumacera .....318

• Análisis cinemático de posición discreto para robots y manipuladores paralelos tipo Delta .....323

• Estudio del efecto de la concentración de nanopartículas de óxido-metálicos sobre la transferencia de calor por convección natural en un nanofluido .....329

• Controlador Robusto GPI para un Actuador Elástico en Serie .....335

• Desarrollo de un mecanismo optomecánico para la medición de desplazamiento lineal mediante pérdida de intensidad por curvatura .....341

• Estudio Paramétrico del Área De Vidriado de Un Edificio No Residencial En Un Clima Semicálido .....347

• Absorción de energía de perfiles elípticos bi-tubulares reforzados sometidos a flexión .....353

• Estudio numérico y experimental de ventilación cruzada en una habitación de una casa del Estado de Morelos .....358

# CIENCIAS COMPUTACIONALES

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

 ISSN en trámite

# Arquitectura para el análisis y evaluación de actividad de comprensión lectora en computadora aplicando técnicas de seguimiento ocular basadas en visión artificial

***Miguel Ángel Ramírez Flores, *María Antonieta Abud Figueroa,**
****Mario Andrés Paredes Valverde, *Ignacio López Martínez, *Ulises Juárez Martínez**

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba, División de Investigación y Estudios de Posgrado, Veracruz. México. (M21011181, maria.af, ulises.jm, ignacio.lm) @orizaba.tecnm.mx, **Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Teziutlán, Puebla, México (mario.pv@teziutlan.tecnm.mx)*

**Resumen**: La comprensión lectora y el bajo rendimiento académico desde hace tiempo son de los principales problemas que enfrentan los estudiantes de México de diversos niveles educativos, lo que a su vez afecta el aprendizaje en muchas áreas. En los últimos resultados publicados por el Programa para la Evaluación Internacional de Alumnos (PISA) del año 2018, solo el 1 % de los estudiantes a nivel nacional mostró habilidades avanzadas en lectura, con un 55 % permaneciendo en el nivel promedio y el resto sin alcanzar el nivel mínimo. Con los resultados por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), México sigue ubicándose debajo del promedio. Este artículo presenta la arquitectura de software para un sistema que permita evaluar la comprensión lectora de un estudiante de secundaria al realizar una lectura frente a una computadora mientras se obtienen sus movimientos oculares con una cámara Web convencional, para finalmente aplicar una serie de preguntas sobre el texto que realizó y comparar la relación de sus resultados obtenidos con su actividad ocular durante la lectura.

*Palabras clave: Visión artificial, Comprensión lectora, Seguimiento ocular, Rendimiento académico.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El bajo rendimiento escolar es uno de los principales problemas que sufren miles de estudiantes de todos los niveles educativos, se relaciona con múltiples factores como falta de motivación, ansiedad, estrés, depresión, entre muchos otros. Pero también está relacionado con la forma y técnicas utilizadas en el aprendizaje. Uno de los factores relacionados a un bajo rendimiento escolar que afecta en el aprendizaje de los estudiantes es la falta de comprensión lectora, puesto que se sabe que una gran parte de los estudiantes no entiende lo que lee. La comprensión lectora es una de las destrezas lingüísticas que permite decodificar e interpretar textos escritos. Para ello, es necesario que la persona involucre su experiencia y conocimientos previos, ya que leer no se reduce solo a decodificar el texto, sino que lo más importante es comprender la información contenida.

En la actualidad, muchas actividades humanas se apoyan en la tecnología y la educación es una de ellas, con el aprendizaje en línea y presencia, se confía en los recursos tecnológicos para mejorar el rendimiento de los estudiantes y aliviar los problemas de comprensión de lectura. En este sentido, una de las áreas de creciente interés de la tecnología educativa es el análisis de la mirada mientras se realiza una lectura digital. Sin embargo, pocos estudios han intentado mejorar la enseñanza asistida por computadora para ayudar a mitigar los problemas académicos que afectan a los estudiantes utilizando el registro de la actividad ocular durante una lectura de comprensión. En el presente trabajo se presenta una arquitectura de software para aplicar técnicas de seguimiento ocular basadas en visión artificial para evaluar el grado de atención y aprovechamiento en una actividad de comprensión lectora, mediante la implementación de una interfaz de programación de aplicaciones (*API*) para la obtención y visualización de la actividad ocular en el proceso de aprendizaje de alumnos de secundaria.

Este documento está organizado de la siguiente manera: la sección de trabajos relacionados, donde se hace una revisión de investigaciones y publicaciones relacionadas. La sección 3 presenta el diseño arquitectónico de software y sus componentes principales para el análisis y evaluación de actividad de comprensión lectora en computadora aplicando técnicas de seguimiento ocular basadas en visión artificial, por último se describen las conclusiones y trabajos a futuro.

## 2. TRABAJOS RELACIONADOS

A continuación, se presentan los trabajos de investigación más relacionados con el tema propuesto en este artículo.

 ISSN en trámite

En Chang et al. (2018) se realizó un comparativo entre un sistema de lectura interactivo controlado por los ojos y un sistema de lectura interactivo controlado por el ratón de computadora para analizar la comprensión de un grupo de estudiantes durante una lectura digital, utilizando ambos sistemas. Concluyendo que el grupo que utilizó el sistema controlado por los ojos obtuvo mejores resultados en comprensión lectora, a comparación del grupo que utilizó el sistema controlado por el ratón.

El trabajo de Zhang et al. (2018) presentó un sistema llamado VLEYE® basado en herramientas de seguimiento ocular, los cuales permitieron recopilar las áreas dinámicas de interés (AOI) del usuario, para ayudar de manera eficiente a los docentes en sus métodos de enseñanza en comprender mejor los procesos cognitivos del alumno con estímulos dinámicos y la ayuda de su registro ocular.

En el trabajo de Alhasan et al. (2018) se presentó el desarrollo un experimento de seguimiento ocular para analizar el patrón de comportamiento de un alumno y obtener su estilo de aprendizaje como un aspecto de personalización en un sistema educativo electrónico. Utilizando el dispositivo EEG Emotive Epoc® para obtener datos más precisos que comprobaron que los estilos de aprendizaje verbal y visual reflejan preferencias reales en un entorno de aprendizaje electrónico como los demuestra el modelo de aprendizaje de Silverman.

Los autores Nugrahaningsih et al. (2021) profundizaron la posibilidad de distinguir entre los estilos de aprendizaje Visual y Verbal a partir de los datos obtenidos de la mirada. Los resultados obtenidos mostraron una relación significativa entre los datos de la mirada y los estilos de aprendizaje Visual/Verbal. Este estudio proporcionó una contribución útil a la investigación de estilos de aprendizaje utilizando tecnología de seguimiento ocular.

Al Madi & Khan. (2018) describen un modelo de relación entre la actividad ocular de un usuario y su comprensión durante una lectura, para predecir la representación se utilizó una red semántica construida a partir de datos obtenidos. Concluyendo que el procesamiento cognitivo y lingüístico influye en el movimiento de los ojos durante la lectura, permitiendo extender los modelos de lectura existentes basados en teorías cognitivas del movimiento ocular y la comprensión.

En Chivu et al. (2018) se analizaron dos plataformas de aprendizaje electrónico, con el fin de identificar las opiniones de los estudiantes para una mejor absorción de información utilizando una herramienta para la medición de posición ocular. Donde se obtuvieron perspectivas relevantes sobre el posicionamiento de los elementos visuales dentro de las plataformas de aprendizaje electrónico para un rediseño más amigable e intuitivo, basados en los elementos y áreas de interés donde los usuarios prestaron una mayor atención.

En Kohutek et al. (2019) se encontró que cursos electrónicos actualmente en uso no cumplen con los principios de creación de los mismos, lo que reduce significativamente su eficacia, para la identificación de deficiencias, se desarrolló un experimento empleando tecnología de seguimiento ocular para identificar áreas clave en las que es necesario enriquecer los cursos electrónicos con elementos multimedia interactivos, notas explicativas, entre otras.

En Ivanovíc et al. (2017) se examinó un entorno de aprendizaje electrónico donde las tecnologías de seguimiento ocular lograron observar el comportamiento del usuario para adaptar la presentación del contenido en tiempo real e identificar un método mediante el cual los datos den respuesta psicopatológica en tiempo real y logren recopilarse, analizarse e implementarse sin comprometer la experiencia de aprendizaje.

En Zhou et al. (2018) se realizó un experimento que manipuló la ortografía y la fonología de una palabra clave en el idioma chino dentro de una oración y se observó el comportamiento de los lectores. El estudio obtuvo que el tiempo de fijación durante la manipulación del texto no afectaba la velocidad de lectura. Se encontró que el proceso de comprensión tomó menos conteos retrospectivos y un tiempo de lectura más corto en el caso de la manipulación de la fonología que en el caso de la manipulación de la ortografía.

En Lin et al. (2018) se propuso y evaluó un enfoque automático que incorpora el método de agrupamiento *K-means* para el análisis de los movimientos oculares. Se involucró a 64 estudiantes que leyeron un texto de divulgación científica mientras registraban sus movimientos oculares. El estudio contribuyó al campo de la enseñanza al proporcionar una introducción del análisis de aprendizaje automático en lugar de los enfoques convencionales de análisis en comportamientos durante la lectura y estilos cognitivos.

En Bottos et al. (2018) se describe la generación de algoritmos para unir los datos oculares del Gazepoint GP3® y los patrones de la mirada durante una lectura de comprensión. Lo que permitió funcionalidades como la evaluación de la comprensión, la detección del nivel de interés y el desplazamiento automático. Logrando una mejora del 27 % en la precisión de la detección con respecto al seguimiento utilizando únicamente el rastreador ocular.

En el trabajo de Li et al. (2018) se investigó que a través del movimiento ocular de un usuario al leer es posible predecir el nivel de comprensión lectora y utilizar los datos obtenidos en sistemas inteligentes de aprendizaje electrónico que se adapten de manera automática. Logrando identificar cuando los lectores experimentan dificultades para comprender su material de lectura.

La Tabla 1 presenta un resumen de los artículos revisados, indicando el problema que atacaron, su contribución y la tecnología empleada.

 ISSN en trámite

**Tabla 1. Tabla comparativa de trabajos relacionados**

| Artículo | Problema | Contribución | Tecnología |
|---|---|---|---|
| (Al Madi et al., 2018) | Falta de un modelo de relación entre el movimiento de los ojos y la comprensión durante la lectura para predecir una representación semántica construida durante la lectura a partir de datos del movimiento ocular | Modelo de relación del movimiento de los ojos y la comprensión durante la lectura para predecir la representación semántica construida durante la lectura a partir de datos del movimiento ocular | Una pantalla de computadora, un rastreador ocular y una red semántica |
| (Zhou et al., 2018) | Falta de un método de compresión para la mejora de la lectura silenciosa | Enfoque de aprendizaje para la utilización de la lectura silenciosa con la utilización de información fonológica | Rastreador ocular Eyelink 1000 plus System ® |
| (Bottos et al., 2018) | Falta de formas de alta precisión para rastrear la línea que lee una persona a través de seguimiento ocular | Modelo de precisión de la detección de líneas a través de un rastreador ocular | Rastreador ocular Gazepoint GP3® |
| (Lin et al., 2018) | Falta de un método de agrupamiento para el análisis del movimiento ocular durante la lectura | Análisis de aprendizaje automático desde la perspectiva de la educación de precisión en lugar de los enfoques convencionales de análisis en comportamientos de lectura y estilos cognitivos | Rastreador ocular binocular y Rastreador Tobii EyeX ® |
| (Li et al., 2018) | Escasa información de la relación entre el movimiento del ojo y la lectura | Modelo de identificación de los diferentes niveles de comprensión del usuario a través del reconocimiento ocular | Rastreador ocular Tobii X1 Light ® |

Después de analizar los artículos relacionados, se concluye que, si bien en los trabajos mencionados se realizaron análisis y experimentos comprobando la existencia de una relación entre la actividad ocular de un usuario y su comprensión durante un proceso de aprendizaje de estudiantes de diversos niveles y que los datos obtenidos de la actividad ocular de los estudiantes pueden ser utilizados para la mejora constante de contenidos educativos, sin embargo los trabajos antes mencionados hacen usos de dispositivos de seguimiento ocular complejos para la obtención de los datos oculares con un costo elevado para ser implementado en instituciones educativas. Por ello se considera que es necesario el desarrollo de un software que permita la captura, análisis y evaluación de la actividad ocular de un estudiante de nivel secundaria en la materia de español durante una lectura de comprensión digital, haciendo uso de una cámara Web convencional.

## 3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

En esta sección, se presenta una arquitectura general para desarrollo de un sistema de software que aplique técnicas de seguimiento ocular a través de visión por computadora para analizar y evaluar los niveles de atención, así como, el rendimiento de un estudiante de secundaria en una actividad de comprensión lectora.

La arquitectura del sistema indica la estructura, funcionamiento e interacción entre las partes de software que componen el sistema, a grandes rasgos, es un nivel de diseño que se enfoca en aspectos más allá de las técnicas y herramientas, presentando una estructura global del sistema.

El sistema consta de 3 módulos importantes (Fig. 1).

 ISSN en trámite

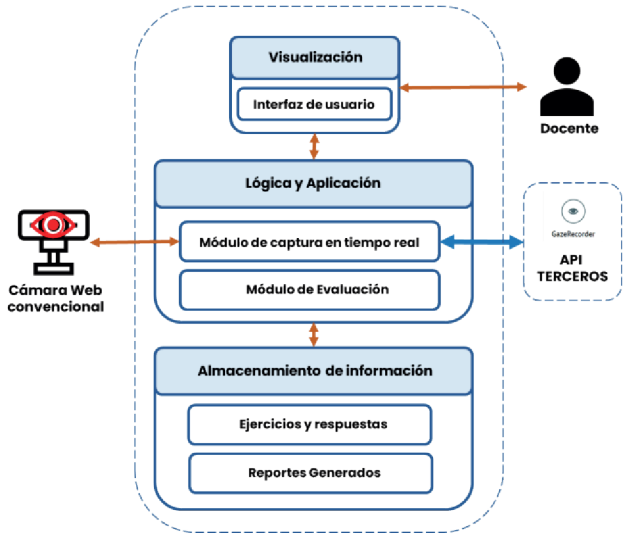



Fig. 1. Diseño arquitectónico del sistema

El software propuesto se divide en módulos los cuales permitirán la captura, análisis y evaluación de la actividad ocular de un usuario durante una lectura de comprensión, como se muestran en la Figura 1, obteniendo así una estructura preliminar que permita aplicar con una cámara Web convencional técnicas de seguimiento de ojos basadas en visión artificial para evaluar el comportamiento y aprovechamiento de un usuario a través de la mirada mientras realiza una lectura en computadora. Se realizó una comparativa de las herramientas de desarrollo de software y se determinó utilizar el lenguaje de programación JavaScript para las funcionalidades del sistema y la implementación de la *API* GazeCloudAPI® para el módulo de captura en tiempo real, la cual permite obtener y visualizar la actividad ocular de un usuario. Ambas tecnologías permiten el desarrollo escalable de las demás funcionalidades, una mejor precisión en la posición ocular y la implementación más ágil del sistema.

La arquitectura del sistema toma lugar con la capa de lógica y aplicación donde se localizan los dos módulos más importantes: El módulo de captura en tiempo real, el cual será el medio para la obtención del registro ocular de un usuario durante el proceso de una lectura de comprensión, haciendo uso de la *API* GazeCloudAPI®, para la extracción de la actividad ocular del usuario, obteniendo la posición en pantalla donde se ubica su mirada y los movimientos de fijación a través de un mapa de calor.

El módulo de evaluación consta de textos de comprensión los cuales contienen una longitud correspondientes al rango de palabras por minuto que debería leer un usuario, acorde al nivel de educación secundaria, para que posteriormente el alumno sea evaluado mediante una serie de preguntas y respuestas sobre la lectura realizada, permitiendo analizar la relación de la actividad ocular y su comprensión lectora.

Posteriormente, la capa de almacenamiento de información, permitirá almacenar los datos obtenidos de cada alumno evaluado, así como una imagen resultante de su actividad ocular y porcentaje de comprensión, entre otros datos.

Finalmente, todos los resultados serán presentados en la capa de visualización donde el usuario de rol docente podrá consultar los datos obtenidos de los estudiantes en cualquier momento para realizar acciones en la mejora del aprovechamiento de cada usuario, incluyendo nuevos análisis de manera personalizada para cada uno de los evaluados.

Para la implementación de la arquitectura se propone un flujo de trabajo que considere:

1. **Seguimiento**: Se implementan técnicas de seguimiento ocular para la captura y análisis de la información del usuario durante la lectura a través de visión por computadora a partir de una Cámara Web externa o incorporada en un equipo de cómputo, utilizando la API GazeCloudAPI®, la cual contiene un sistema de calibración automática para obtener y visualizar mediante un mapa de calor la actividad ocular de un usuario durante un lapso de tiempo. La Figura 2 muestra la extracción de la actividad ocular del usuario durante una lectura de comprensión.

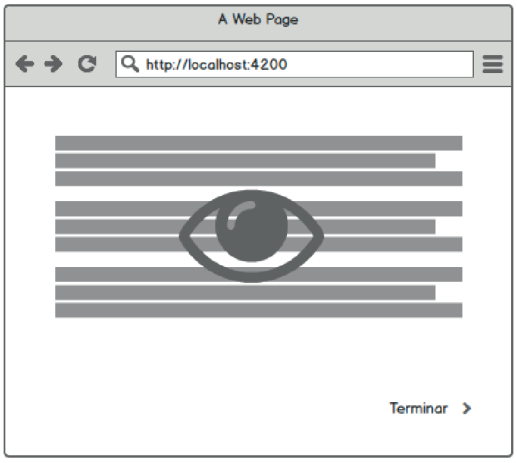



Fig. 2. Extracción de actividad ocular

2. **Evaluación**: A través de una serie de preguntas de comprensión, se evaluará a los usuarios con respecto a la lectura realizada durante el módulo de captura en tiempo real, la cual permitirá el análisis y comparativo entre la actividad ocular del usuario registrada, el tiempo de velocidad lectora y el número de respuestas correctas obtenidas. Como se muestra en la Figura 3.

 ISSN en trámite

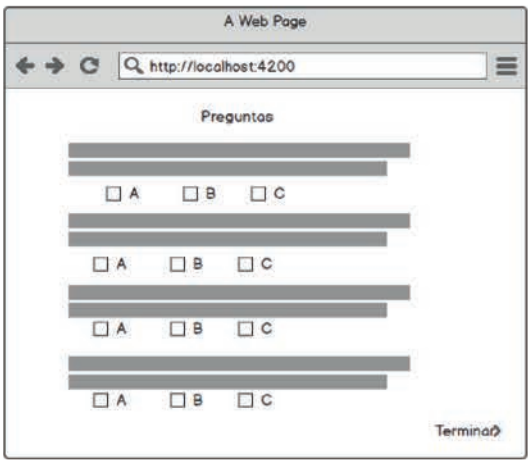



Fig. 3 . Evaluación de lectura de comprensión

3. **Análisis:** Una vez concluida la extracción de la actividad ocular y finalizado la evaluación de comprensión se prosigue con el análisis entre la actividad ocular y su comprensión poniendo un énfasis en las palabras que desconoce el alumno. En la Figura 4 muestra el marcado de las palabras desconocidas por el alumno presentes en la lectura de comprensión.

Fig. 4. Palabras desconocidas del estudiante

## 4. CONCLUSIONES

El bajo rendimiento escolar es uno de los principales problemas que sufren niños y jóvenes estudiantes, a causa de múltiples factores, sin embargo la falta de comprensión lectora es el problema sobresaliente y una de las causas relacionada a un bajo rendimiento escolar. Por lo que se busca desarrollar una arquitectura de software que permita obtener un sistema para evaluar el nivel de atención y comprensión lectora con ayuda de herramientas tecnológicas disponibles en la actualidad.

Se obtuvo que son pocos los estudios reportados en los cuales se busca mejorar el aprovechamiento de un estudiante durante una lectura de comprensión en computadora en relación de su actividad ocular y su nivel de comprensión, para mitigar problemas académicos que afectan a los estudiantes como es el bajo rendimiento escolar. Sin embargo, los dispositivos para la obtención de la actividad ocular de un usuario existentes en el mercado, tienen un costo muy elevado, lo que hace impensable la utilización de estas herramientas en algunos centros educativos. El trabajo propuesto tiene como objetivo la presentación del diseño arquitectónico para el desarrollo de un sistema que permita identificar problemas de comprensión y atención, mediante la actividad ocular de un estudiante durante el proceso de una lectura digital de nivel secundaria, con el objetivo de generar datos relevantes, que permitan tanto al profesor y alumnos a identificar dificultades de comprensión y atención durante el proceso de aprendizaje, haciendo uso de cámaras Web convencionales. El sistema propuesto servirá como una herramienta docente para identificar el nivel de comprensión de cada estudiante, permitiendo generar nuevas estrategias personalizadas para cada estudiante.

Como trabajo a futuro se pretende desarrollar todo lo expuesto en este trabajo, comprobando su efectividad en una grupo de alumnos de nivel secundaria en la materia de español, para contribuir en la educación de niños y jóvenes a identificar problemas de comprensión lectora y así evitar problemas de bajo rendimiento escolar

**Agradecimientos**: Este trabajo de investigación fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) y la Secretaría de Educación Pública (SEP) de México. De igual manera se agradece al Tecnológico Nacional de México (TecNM) Campus Orizaba por el apoyo para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

Al Madi, N. and Khan, J. (2018). Constructing Semantic Networks of Comprehension from Eye-Movement During Reading. *2018 IEEE 12th International Conference on Semantic Computing (ICSC)*. doi:10.1109/icsc.2018.00016.

Alhasan, K., Chen, L. and Chen, F. (2018). An Experimental Study of Learning Behaviour in an ELearning Environment. *2018 IEEE 20th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 16th International Conference on Smart City; IEEE 4th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)*. doi:10.1109/hpcc/smartcity/dss.2018.00231.

Bottos, S. and Balasingam, B. (2020). Tracking the Progression of Reading Using Eye-Gaze Point Measurements and

ISSN en trámite

Hidden Markov Models. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, pp.7857–7868. doi:10.1109/tim.2020.2983525.

Chang, C.-S., Chen, C.-M. and Lin, Y.-C. (2018). A Visual Interactive Reading System Based on Eye Tracking Technology to Improve Digital Reading Performance. *2018 7th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI)*. doi:10.1109/iiai-aai.2018.00043.

Chivu, R. G., Turlacu, L. M., Stoica, I., & Radu, A. V. (2018). Identifying the effectiveness of e-learning platforms among students using Eye-Tracking technology. https://doi.org/10.4995/head18.2018.8046

Zhou, D., Huang, J. and Dang, J. (2018). Investigation of the Comprehension Process during Silent Reading based on Eye Movements. *2018 11th International Symposium on Chinese Spoken Language Processing (ISCSLP)*. doi:10.1109/iscslp.2018.8706573.

Ivanović, M., Klašnja-Milićević, A., Ivković, J., and Porta, M. (2017). Integration of eye tracking technologies and methods in an e-learning system. *8th Balkan Conference in Informatics. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery (BCI '17)*. doi: 10.1145/3136273.3136278.

Kohutek, M., Turcani, M. and Magdin, M. (2019). Improving student reading comprehension of learning materials using the analysis of Eye-Tracking data. *2019 17th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*. doi:10.1109/iceta48886.2019.9040102.

Li, J., Ngai, G., Leong, H.V. and Chan, S.C.F. (2016). Your Eye Tells How Well You Comprehend. *2016 IEEE 40th Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*. doi:10.1109/compsac.2016.220.

Lin, W., Kotakehara, Y., Hirota, Y., Murakami, M., Kakusho, K. and Yueh, H.-P. (2021). Modeling Reading Behaviors: An Automatic Approach to Eye Movement Analytics. *IEEE Access*, pp.63580–63590. doi:10.1109/access.2021.3074913.

Nugrahaningsih, N., Porta, M. Milicevic, A. (2021) 'Assessing learning styles through eye tracking for e-learning applications', *Computer Science and Information Systems*, 18, pp 35–35. doi: 10.2298/CSIS201201035N.

Zhang, X., Yuan, S.-M., Chen, M.-D. and Liu, X. (2018). A Complete System for Analysis of Video Lecture Based on Eye Tracking. *IEEE Access*, pp.49056–49066. doi:10.1109/access.2018.2865754.

 ISSN en trámite

# Caracterización de los tipos de Fragmentación en Sistemas Gestores de Bases de Datos Relacionales

**Suriel Quevedo-Ortiz*, Isaac Machorro-Cano*, Lisbeth Rodríguez-Mazahua**, Felipe Castro-Medina**, Mónica Guadalupe Segura-Ozuna*, Ariel López-Rodríguez***

**Universidad del Papaloapan, Tuxtepec, Oaxaca, México*
*(e-mail: surielQO99@gmail.com, imachorro@unpa.edu.mx, msegura@unpa.edu.mx, alopez@unpa.edu.mx)*
***Tecnológico Nacional de México/I.T. Orizaba, Orizaba, Veracruz, México*
*(e-mail: lrodriguezm@ito-depi.edu.mx, dci.fcastro@ito-depi.edu.mx)*

**Resumen:** En la actualidad, existen diversos sistemas gestores de bases de datos los cuales compiten por tener el sistema que ofrezca el mejor rendimiento en las operaciones de lectura y escritura de datos. Una forma en la que estos sistemas logran escalar una base de datos es mediante métodos de fragmentación o partición de datos. La idea básica de este concepto es dividir una tabla original en tablas más pequeñas llamadas fragmentos. Aunque actualmente los sistemas gestores de bases de datos no relacionales se empezaron a hacer populares, este trabajo se centra en los sistemas gestores de bases de datos relaciones y la caracterización de los métodos de fragmentación o partición de tablas que estos ofrecen, comparando los tiempos de respuesta en operaciones de lectura y escritura con las bases de datos estándar TPC-H y TPC-E.

*Palabras clave:* Caracterización, fragmentación horizontal, SGBD Relacional, TPC-H, TPC-E.

## 1. INTRODUCCIÓN

La fragmentación o partición es una técnica de diseño de bases de datos (BD) que consiste en dividir una tabla (original) en tablas más pequeñas (llamadas fragmentos), con el objetivo de reducir el tiempo de respuesta de las consultas. Dependiendo de los elementos (tuplas o atributos) de la tabla original que se incluyan en los fragmentos, la fragmentación es de dos tipos: horizontal, si los fragmentos contienen subconjuntos de tuplas, o vertical, si tienen subconjuntos de atributos. La mayoría de los Sistemas Gestores de Bases de Datos (SGBD) relacionales soportan distintos tipos de partición.

Ante este contexto, en este trabajo, se analizaron distintos SGBD relacionales para conocer las características que ofrecen y posteriormente, seleccionar dos para realizar una serie de pruebas de rendimiento. Para lograr lo anterior, se utilizó la base de datos estándar TPC-H y TPC-E. Esto permitió mediante distintas operaciones de lectura y escritura de datos (CRUD), obtener un estudio descriptivo para conocer las ventajas de los dos gestores con respecto a los tipos de partición que proporcionan.

Este artículo se organiza de la siguiente manera: la sección 2 presenta los trabajos relacionados con los SGBD y los tipos de fragmentación; la sección 3 presenta un análisis de los SGBD y sus métodos de fragmentación, así como la metodología de investigación utilizada para comparar los SGBD; en la sección 4 se presentan los resultados de los tiempos de respuesta obtenidos de la base de datos TPC-H y TPC-E original contra la fragmentada, así como una discusión sobre los resultados obtenidos; finalmente la sección 5 presenta las conclusiones de la investigación y el trabajo a futuro.

## 2. TRABAJOS RELACIONADOS

La fragmentación o partición de tablas en bases de datos, es una técnica ampliamente utilizada en la actualidad, principalmente por aquellas grandes industrias que se dedican a la recopilación de datos, ya sea en forma de texto o de archivos multimedia. A continuación, se presenta una revisión de los trabajos relacionados con los SGBD, particularmente en relación con la aplicación de técnicas de fragmentación y partición.

Qin et al. (2016) propusieron una solución de carga rápida y sin pérdida de datos, basada en herramientas de código abierto como Kafka (plataforma de transmisión de eventos distribuidos desarrollada por Apache), HDFS (*Hadoop Distributed File System*) y el SGBD Spark SQL. En consecuencia, diseñaron e implementaron un método de partición basado en la fibra de entidades, así como un algoritmo de carga en paralelo. Por otra parte, Kumar (2016) presentó estimaciones de rendimiento de las técnicas de recuperación de datos más utilizadas, como las particiones de MySQL, el particionamiento y agrupamiento del SGBD Hive y el *framework* Apache Pig. Además, Sukhija et al. (2017) presentaron una herramienta de alto nivel implementada

 ISSN en trámite

en Java y SQL para el particionamiento automático de los SGBD relacionales de código abierto, utilizando esquemas de partición Hash, Key y Range. Del mismo modo, Amirthalingam y Rais (2018) propusieron un nuevo medio para automatizar el particionamiento en el SGBD Hive.

Suh et al. (2018) desarrollaron un asistente para los administradores de bases de datos (DBAs), que facilita la partición multinivel calculando un esquema de partición para una carga de trabajo concreta. También, Maabreh (2018) evaluó las técnicas de partición de datos para mejorar el rendimiento de las consultas en grandes conjuntos de datos (Big Data). Otra herramienta para las bases de datos fue diseñada y desarrollada por Miller et al. (2018), llamada ParDP, que es capaz de particionar en paralelo BD relacionales, con el objetivo de mejorar el rendimiento y la escalabilidad. Además, Costa et al. (2019) evaluaron el impacto de la partición de datos y el *bucketing* (técnica de organización de datos, que divide grandes conjuntos de datos en partes más manejables conocidas como *buckets*/cubos) en sistemas basados en Hive, utilizando distintas estrategias de organización de datos.

Por otra parte, Benkrid et al. (2020) presentaron nuevas técnicas inspiradas en la Inteligencia Artificial para contribuir en el diseño físico automatizado de una BD. Para ello, se introdujo un *framework* basado en un planificador proactivo habilitado por algoritmos de optimización genética, utilizado para particionar dinámicamente un *Big DW* (*Data Warehouse*) que se ejecutó en un clúster paralelo. Adicionalmente, Mahmud et al. (2020) presentaron un estudio exhaustivo de los métodos de particionamiento y muestreo de datos en relación con el procesamiento y el análisis de Big Data. Además, Sridevi y Sharma (2020) realizaron un estudio acerca de la partición de BD y su finalidad. Del mismo modo, se destacaron algunos de los sitios Web y aplicaciones de redes sociales más populares que utilizan una gran BD. Por otro lado, Šalgová y Matiaško (2020) analizaron el particionamiento en relación con las diversas técnicas, métodos y beneficios que aporta. Del mismo modo, los autores implementaron la técnica de partición Range y List. Además, Šalgová y Matiaško (2021) presentaron el efecto del particionamiento y la indexación en el tiempo de acceso a los datos que compararon en siete escenarios diferentes con diferentes combinaciones de particiones creadas sobre tablas e índices.

Un análisis comparativo de los trabajos relacionados indicó que las técnicas de partición horizontal son las más frecuentes, siendo el método Range el más usado, seguido del Hash, List y Key. Además, la mayoría trabajó únicamente con un SGBD. Por su parte, en este trabajo se realizaron diversas pruebas con dos de los SGBD más populares de acuerdo con (*DB-Engines Ranking*, 2021) y se implementaron todos los métodos de partición que estos ofrecen. Así mismo, se utilizaron las BD estándar TPC-H y TPC-E, las cuales no fueron consideradas en los trabajos relacionados.

## 3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La metodología utilizada consistió de tres etapas: análisis, selección e implementación. A continuación, se describen las actividades realizadas en estas etapas.

### *3.1 Análisis*

En esta etapa se analizaron los conceptos más importantes en la elaboración de este trabajo, como la fragmentación o partición definidas anteriormente, así como el *benchmark* TPC-H (Serlin et al., 2021), que consta de ocho tablas y 22 consultas *ad hoc* (consultas sobre la marcha) orientadas al negocio y modificaciones de datos concurrentes, y TPC-E (Serlin et al., 2015), que consta de 33 tablas para el procesamiento de transacciones en línea. TPC-H y TPC-E son especificaciones estándar desarrolladas por TPC (*Transaction Processing Performance Council*, Consejo de Rendimiento del Procesamiento de Transacciones) y sirven como punto de referencia en apoyo a la toma de decisiones. Además, este análisis permitió comprender principalmente el funcionamiento de los distintos tipos de partición existentes y que basados en esta teoría los SGBD implementan distintas técnicas para llevar a cabo dicha fragmentación en las bases de datos.

### *3.2 Selección*

Por otra parte, en esta etapa se analizaron los cinco SGBD relacionales más populares: Oracle (*Oracle Database 21c*, 2021), MySQL (*MySQL 8.0 Reference Manual*, 2021), Microsoft SQL Server (*SQL Server technical documentation*, 2021), PostgreSQL (*PostgreSQL 14.1 Documentation*, 2021) e IBM Db2 (*IBM Db2 documentation*, 2021) de acuerdo con (*DB-Engines Ranking*, 2021).

Como resultado del análisis de los SGBD relacionales, se lograron identificar dos SGBD en donde se implementaron los tipos de partición en la base de datos TPC-H y TPC-E. Primeramente, se tiene a MySQL, el cual es de código abierto y solamente se encuentra por debajo de Oracle en cuanto a los esquemas de partición que soporta. Además, también está PostgreSQL, el cual también es de código abierto y con mayor popularidad en los últimos años de acuerdo con (DB-Engines Ranking, 2021). PostgreSQL admite los esquemas de partición horizontal como el Range, Hash y List, mientras que MySQL, además de los tres anteriores, incluye también el particionamiento Key.

### 3.3 Implementación

Generación y llenado de la BD TPC-H

Se generó en primera instancia, el esquema que conformó la BD original y posteriormente se crearon las tablas. El *script* que genera las tablas NATION, REGION, PART, SUPPLIER, PARTSUPP, CUSTOMER, ORDERS y LINEITEM de la BD TPC-H, los proporciona el propio *benchmark* y no se realizó

 ISSN en trámite

ninguna modificación en el caso de MySQL como se muestra en (Fig. 3.1). Por su parte, en PostgreSQL primero es necesario definir el esquema de partición a realizar en las tablas seleccionadas ya que no es posible modificarlas después, por lo que se creó un *script* por cada tipo de partición definiendo en cada uno las tablas a particionar. El *script* se ejecutó haciendo uso del comando "source" o "\." en MySQL, como se describe en la (Fig. 3.2) y en PostgreSQL se realizó con el comando "\i".

```
CREATE TABLE NATION  ( N_NATIONKEY  INTEGER NOT NULL,
                       N_NAME       CHAR(25) NOT NULL,
                       N_REGIONKEY  INTEGER NOT NULL,
                       N_COMMENT    VARCHAR(152));

CREATE TABLE REGION  ( R_REGIONKEY  INTEGER NOT NULL,
                       R_NAME       CHAR(25) NOT NULL,
                       R_COMMENT    VARCHAR(152));

CREATE TABLE PART  ( P_PARTKEY     INTEGER NOT NULL,
                     P_NAME        VARCHAR(55) NOT NULL,
                     P_MFGR        CHAR(25) NOT NULL,
                     P_BRAND       CHAR(10) NOT NULL,
                     P_TYPE        VARCHAR(25) NOT NULL,
                     P_SIZE        INTEGER NOT NULL,
                     P_CONTAINER   CHAR(10) NOT NULL,
                     P_RETAILPRICE DECIMAL(15,2) NOT NULL,
                     P_COMMENT     VARCHAR(23) NOT NULL );
```

Fig. 3.1. Fragmento del *script* que crea las tablas de la BD TPC-H con MySQL

```
mysql> source D:\Documentos\Tesis\TPC-H\MySQL\dss.ddl
Query OK, 0 rows affected (0.10 sec)

Query OK, 0 rows affected (0.15 sec)

Query OK, 0 rows affected (0.22 sec)

Query OK, 0 rows affected (0.55 sec)

Query OK, 0 rows affected (0.08 sec)

Query OK, 0 rows affected (0.06 sec)

Query OK, 0 rows affected (0.06 sec)

Query OK, 0 rows affected (0.06 sec)
```

Fig. 3.2. Creación de tablas en la BD TPC-H en MySQL

En seguida, se agregaron las relaciones que también las proporciona el *benchmark*, al cual tampoco se le hizo modificación alguna, como se presenta en la (Fig. 3.3).

```
-- For table REGION

ALTER TABLE REGION
ADD PRIMARY KEY (R_REGIONKEY);


-- For table NATION

ALTER TABLE NATION
ADD PRIMARY KEY (N_NATIONKEY);

ALTER TABLE NATION
ADD CONSTRAINT NATION_FK1 FOREIGN KEY (n_regionkey)
REFERENCES REGION (r_regionkey);
```

Fig. 3.3. Fragmento del *script* que crea las relaciones de la BD TPC-H con MySQL

Posteriormente, se procedió a realizar el llenado de la BD original haciendo uso del comando "LOAD DATA INFILE" en MySQL y en PostgreSQL se realizó con el comando "copy". En este caso, se desarrolló un pequeño *script* como se muestra en la (Fig. 3.4), que automatiza el proceso de llenado de las tablas.

```
LOAD DATA INFILE 'C:\\tpch\\region.tbl' INTO TABLE region FIELDS TERMINATED BY '|';
LOAD DATA INFILE 'C:\\tpch\\nation.tbl' INTO TABLE nation FIELDS TERMINATED BY '|';
LOAD DATA INFILE 'C:\\tpch\\customer.tbl' INTO TABLE customer FIELDS TERMINATED BY '|';
LOAD DATA INFILE 'C:\\tpch\\orders.tbl' INTO TABLE orders FIELDS TERMINATED BY '|';
LOAD DATA INFILE 'C:\\tpch\\supplier.tbl' INTO TABLE supplier FIELDS TERMINATED BY '|';
LOAD DATA INFILE 'C:\\tpch\\part.tbl' INTO TABLE part FIELDS TERMINATED BY '|';
LOAD DATA INFILE 'C:\\tpch\\partsupp.tbl' INTO TABLE partsupp FIELDS TERMINATED BY '|';
LOAD DATA INFILE 'C:\\tpch\\lineitem.tbl' INTO TABLE lineitem FIELDS TERMINATED BY '|';
```

Fig. 3.4. *Script* que carga las tuplas en la BD TPC-H con MySQL

Una vez generada la BD original, se creó un esquema por cada tipo de partición a implementar y en cada esquema se copió la BD original. Esto se logró haciendo uso del comando "mysqldumb" y "mysql", como se observa en (Fig. 3.5). Con mysqldumb se lee la BD original y haciendo uso de pipeline (tubería que permite obtener la salida de un programa directamente en otro), se manda el resultado a la BD que recibe los datos con el comando mysql. Este proceso se realizó para cada una de las BD en donde se implementaron los distintos tipos de particionamiento mencionados anteriormente.

```
C:\Users\suri_>mysqldump -u root -p5643 tpch | mysql -u root
-p5643 tpch_range
mysqldump: [Warning] Using a password on the command line int
erface can be insecure.
mysql: [Warning] Using a password on the command line interfa
ce can be insecure.

C:\Users\suri_>
```

Fig. 3.5. Copiado de la BD original TPC-H a la fragmentada con MySQL

Particionamiento de la BD TPC-H

Teniendo las bases de datos creadas, se pasó al desarrollo de cada tipo de particionamiento que admite MySQL (Range, List, Hash y Key), así como los admitidos por PostgreSQL (Range, List y Hash). Además, el particionamiento Range, Hash y Key, se realizó sobre las tablas más pobladas: PART, PARTSUPP, CUSTOMER, ORDERS y LINEITEM, a excepción del particionamiento List, el cual solamente se realizó sobre las últimas tres anteriores, debido a que fueron las más adecuadas para este tipo de particionamiento.

Por otro lado, es importante mencionar que en MySQL se encontró con el problema de que el particionamiento de tablas no se realiza sobre índices que son llave foránea, por lo tanto, se desarrolló el *script* que elimina las llaves foráneas de las tablas a las cuales se realizó el particionamiento y esto se aplicó en cada BD antes de ser particionada. Además, para el caso del particionamiento List, fue necesario eliminar también las llaves

 ISSN en trámite

primarias. Por su parte, en PostgreSQL únicamente se eliminaron las llaves primarias y foráneas con el particionamieto List.

En las (Fig. 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9), se muestra un ejemplo de cada tipo de particionamiento implementado con MySQL. Posteriormente, se ejecutó cada *script* en su respectiva BD.

```
-- For table PART(200000)
-- Se realizaron 10 particiones con 20000 tuplas cada una
ALTER TABLE PART PARTITION BY RANGE (P_PARTKEY) (
        PARTITION P1 VALUES LESS THAN (20001),
    PARTITION P2 VALUES LESS THAN (40001),
    PARTITION P3 VALUES LESS THAN (60001),
    PARTITION P4 VALUES LESS THAN (80001),
    PARTITION P5 VALUES LESS THAN (100001),
    PARTITION P6 VALUES LESS THAN (120001),
    PARTITION P7 VALUES LESS THAN (140001),
    PARTITION P8 VALUES LESS THAN (160001),
    PARTITION P9 VALUES LESS THAN (180001),
    PARTITION P10 VALUES LESS THAN MAXVALUE
);
```

Fig. 3.6. Ejemplo de particionamiento Range en la BD TPC-H con MySQL

```
-- For table PART(200000)
ALTER TABLE PART PARTITION BY HASH (P_PARTKEY) PARTITIONS 10;

-- For table PARTSUPP(800000)
ALTER TABLE PARTSUPP PARTITION BY HASH (PS_PARTKEY) PARTITIONS 8;

-- For table CUSTOMER(150000)
ALTER TABLE CUSTOMER PARTITION BY HASH (C_CUSTKEY) PARTITIONS 5;

-- For table ORDERS(1500000)
ALTER TABLE ORDERS PARTITION BY HASH (O_ORDERKEY) PARTITIONS 6;

-- For table LINEITEM(6000000)
ALTER TABLE LINEITEM PARTITION BY HASH (L_ORDERKEY) PARTITIONS 12;
```

Fig. 3.7. Ejemplo de particionamiento Hash en la BD TPC-H con MySQL

```
-- For table PART(200000)
ALTER TABLE PART PARTITION BY KEY (P_PARTKEY) PARTITIONS 10;

-- For table PARTSUPP(800000)
ALTER TABLE PARTSUPP PARTITION BY KEY (PS_PARTKEY) PARTITIONS 8;

-- For table CUSTOMER(150000)
ALTER TABLE CUSTOMER PARTITION BY KEY (C_CUSTKEY) PARTITIONS 5;

-- For table ORDERS(1500000)
ALTER TABLE ORDERS PARTITION BY KEY (O_ORDERKEY) PARTITIONS 6;

-- For table LINEITEM(6000000)
ALTER TABLE LINEITEM PARTITION BY KEY (L_ORDERKEY) PARTITIONS 12;
```

Fig. 3.8. Ejemplo de particionamiento Key en la BD TPC-H con MySQL

```
-- For table CUSTOMER(150000)
-- Se crearon particiones por region:
-- África (C1) - América (C2) - Asia (C3) - Europa (C4) - Medio Oriente (C5)
ALTER TABLE CUSTOMER PARTITION BY LIST (C_NATIONKEY) (
        PARTITION C1 VALUES IN (0,5,14,15,16),
    PARTITION C2 VALUES IN (1,2,3,17,24),
    PARTITION C3 VALUES IN (8,9,12,18,21),
    PARTITION C4 VALUES IN (6,7,19,22,23),
    PARTITION C5 VALUES IN (4,10,11,13,20)
);
```

Fig. 3.9. Ejemplo de particionamiento List en la BD TPC-H con MySQL

Generación y llenado de la BD TPC-E

Con TPC-E, se siguió una dinámica similar a lo realizado con TPC-H, tomando en cuenta algunos puntos a diferenciar. Para la creación de la BD TPC-E con PostgreSQL, se utilizó el archivo proporcionado por (Medina, 2019) que genera las tablas de TPC-E, este se modificó en dos archivos uno para generar las tablas y otro que agrega las relaciones. Además, se realizaron las modificaciones pertinentes, tales como el cambio de tipo de dato de las variables a las admitidas con PostgreSQL, y se modificó la sintaxis para agregar los índices de las tablas. Además, en PostgreSQL primero se llenaron las tablas, después se particionaron y por último se agregaron las relaciones. En MySQL, bastó con ejecutar el volcado de la BD proporcionado por (Medina, 2019).

Particionamiento de la BD TPC-E

Por su parte, para la BD TPC-E, el particionamiento Range, Hash y Key, se realizó sobre las tablas TRADE, SETTLEMENT, TRADE_HISTORY y HOLDING_HISTORY a excepción del particionamiento List, el cual únicamente se realizó sobre las últimas dos anteriores. Además, se eliminaron las llaves foráneas y primarias de la misma forma que en TPC-H. En las (Fig. 3.10, 3.11 y 3.12), se muestra un ejemplo de cada tipo de particionamiento implementado con PostgreSQL.

```
-- For table TRADE (1728000)
CREATE TABLE T1 PARTITION OF TRADE FOR VALUES FROM (MINVALUE) TO (200000000174528);
CREATE TABLE T2 PARTITION OF TRADE FOR VALUES FROM (200000000174528) TO (200000000349056);
CREATE TABLE T3 PARTITION OF TRADE FOR VALUES FROM (200000000349056) TO (200000000523584);
CREATE TABLE T4 PARTITION OF TRADE FOR VALUES FROM (200000000523584) TO (200000000698112);
CREATE TABLE T5 PARTITION OF TRADE FOR VALUES FROM (200000000698112) TO (200000000872640);
CREATE TABLE T6 PARTITION OF TRADE FOR VALUES FROM (200000000872640) TO (200000001047168);
CREATE TABLE T7 PARTITION OF TRADE FOR VALUES FROM (200000001047168) TO (200000001221696);
CREATE TABLE T8 PARTITION OF TRADE FOR VALUES FROM (200000001221696) TO (200000001396224);
CREATE TABLE T9 PARTITION OF TRADE FOR VALUES FROM (200000001396224) TO (200000001570752);
CREATE TABLE T10 PARTITION OF TRADE FOR VALUES FROM (200000001570752) TO (MAXVALUE);
```

Fig. 3.10. Ejemplo de particionamiento Range en la BD TPC-E con PostgreSQL

```
-- For table HOLDING_HISTORY (2247265)
CREATE TABLE HH1 PARTITION OF HOLDING_HISTORY FOR VALUES IN (-800,-700,-600);
CREATE TABLE HH2 PARTITION OF HOLDING_HISTORY FOR VALUES IN (-500,-400,-300);
CREATE TABLE HH3 PARTITION OF HOLDING_HISTORY FOR VALUES IN (-200,-100,0);
CREATE TABLE HH4 PARTITION OF HOLDING_HISTORY FOR VALUES IN (100,200,300);
CREATE TABLE HH5 PARTITION OF HOLDING_HISTORY FOR VALUES IN (400,500,600);
CREATE TABLE HH6 PARTITION OF HOLDING_HISTORY FOR VALUES IN (700,800);
```

Fig. 3.11. Ejemplo de particionamiento List en la BD TPC-E con PostgreSQL

```
-- For table TRADE_HISTORY (4148112)
CREATE TABLE TH1 PARTITION OF TRADE_HISTORY FOR VALUES WITH (MODULUS 10, REMAINDER 0);
CREATE TABLE TH2 PARTITION OF TRADE_HISTORY FOR VALUES WITH (MODULUS 10, REMAINDER 1);
CREATE TABLE TH3 PARTITION OF TRADE_HISTORY FOR VALUES WITH (MODULUS 10, REMAINDER 2);
CREATE TABLE TH4 PARTITION OF TRADE_HISTORY FOR VALUES WITH (MODULUS 10, REMAINDER 3);
CREATE TABLE TH5 PARTITION OF TRADE_HISTORY FOR VALUES WITH (MODULUS 10, REMAINDER 4);
CREATE TABLE TH6 PARTITION OF TRADE_HISTORY FOR VALUES WITH (MODULUS 10, REMAINDER 5);
CREATE TABLE TH7 PARTITION OF TRADE_HISTORY FOR VALUES WITH (MODULUS 10, REMAINDER 6);
CREATE TABLE TH8 PARTITION OF TRADE_HISTORY FOR VALUES WITH (MODULUS 10, REMAINDER 7);
CREATE TABLE TH9 PARTITION OF TRADE_HISTORY FOR VALUES WITH (MODULUS 10, REMAINDER 8);
CREATE TABLE TH10 PARTITION OF TRADE_HISTORY FOR VALUES WITH (MODULUS 10, REMAINDER 9);
```

Fig. 3.12. Ejemplo de particionamiento Hash en la BD TPC-E con PostgreSQL

 ISSN en trámite

Además, para la evaluación de TPC-H y TPC-E, se desarrolló un pequeño código en Java con NetBeans IDE el cual se conecta a los distintos SGBD con el fin de automatizar la ejecución de las 22 consultas que el *benchmark* TPC-H proporciona y las ocho consultas elaboradas para TPC-E y así obtener los tiempos de respuesta para cada consulta. Si desea conocer las consultas de TPC-H, se encuentran en (Serlin et al., 2021).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del experimento se obtuvieron utilizando una computadora de escritorio con Procesador AMD Ryzen™ 3 3200G with Radeon™ Vega 8 Graphics, frecuencia base 3.6GHz. Almacenamiento SSD M.2 NVME 512GB + HDD 500GB. Memoria RAM DDR4 8GB, velocidad 3000MHz. Sistema Operativo Windows 11 de 64 bits

La Tabla 4.1 muestra las consultas elaboradas para la BD TPC-E. Por otro lado, dado que el *benchmark* TPC-E realiza consultas de escritura de datos, para el caso de las operaciones de inserción se manipuló con código el identificador (*id*) de las tuplas a insertar, de tal forma que esa misma tupla insertada fue la misma que se eliminó al ejecutar la operación de eliminación.

**Table 4.1. Consultas de lectura y escritura para la BD TPC-E**

| No. de consulta | Descripción |
|---|---|
| 1 | INSERT INTO trade VALUES (id, '2005-01-11', 'CMPT', 'TLB', '1', 'AGNPRA', 800.0, 20.55, 4.3000002741E10, 'Jose Citino', 20.51, 5.0, 59.07, 1996.5, '0'); |
| 2 | INSERT INTO settlement VALUES (id, 'Cash Account', '2005-01-18', -2117.75); |
| 3 | SELECT TH_DTS FROM trade_history WHERE TH_DTS BETWEEN '2005-01-03' AND '2005-01-05'; |
| 4 | SELECT * FROM trade_history WHERE TH_ST_ID!='SBMT' AND TH_ST_ID!='PNDG'; |
| 5 | UPDATE holding_history SET HH_BEFORE_QTY=HH_BEFORE_QTY WHERE HH_H_T_ID>=200000001641638; |
| 6 | UPDATE holding_history SET HH_AFTER_QTY=HH_AFTER_QTY WHERE HH_H_T_ID<=200000000075031; |
| 7 | DELETE FROM settlement where SE_T_ID=id; |
| 8 | DELETE FROM trade where T_ID=id; |

Las Tablas 4.2 y 4.3 muestran los tiempos de respuesta (en formato de segundos) de las consultas de solo lectura en TPC-H. Cada consulta se ejecutó un total de cinco veces, a excepción de la consulta 17 y 20 con PostgreSQL, las cuales tardaron un tiempo considerable en la ejecución y por tal motivo solo se ejecutaron una vez.

**Table 4.2. Comparación de tiempos de respuesta en la BD TPC-H con MySQL**

| No. de consulta | Sin partición | Range | List | Hash | Key |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **17.17** | 18.22 | 21.36 | 17.82 | 17.40 |
| 2 | **0.40** | 4.56 | 0.42 | 7.51 | 0.53 |
| 3 | 82.12 | 63.26 | **40.07** | 94.11 | 85.73 |
| 4 | **4.47** | 5.49 | 16.12 | 7.60 | 7.31 |
| 5 | 33.01 | 50.49 | **14.62** | 84.42 | 74.04 |
| 6 | 4.00 | 4.37 | **1.37** | 7.35 | 4.28 |
| 7 | 26.06 | **19.90** | 22.96 | 33.60 | 29.69 |
| 8 | 115.90 | **93.86** | 8,321.72 | 148.55 | 132.14 |
| 9 | 144.83 | 270.94 | **65.84** | 494.56 | 132.16 |
| 10 | 27.86 | 181.41 | **15.22** | 274.26 | 267.42 |
| 11 | 7.88 | **5.12** | 6.91 | 7.23 | 7.08 |
| 12 | **5.88** | 6.25 | 10.80 | 8.68 | 7.52 |
| 13 | 258.38 | **160.30** | 225.53 | 266.84 | 228.90 |
| 14 | 12.98 | 815.57 | **5.23** | 1,162.47 | 1,074.17 |
| 15 | 8.55 | 9.16 | **2.97** | 11.92 | 11.62 |
| 16 | 5.89 | **3.42** | 5.53 | 4.83 | 4.75 |
| 17 | **2.11** | 2.28 | 2.45 | 2.67 | 2.65 |
| 18 | **5.52** | 162.97 | 363.99 | 243.97 | 235.68 |
| 19 | 3.03 | **2.71** | 3.09 | 4.02 | 3.78 |
| 20 | 12.89 | 65.19 | **2.33** | 83.08 | 79.23 |
| 21 | **15.92** | 17.93 | 34.28 | 19.95 | 19.19 |
| 22 | 0.72 | **0.68** | 2.14 | 1.01 | 0.88 |

Como se observa en la Tabla 4.2, el particionamiento Range logró mejorar los tiempos de respuesta para siete de las consultas TPC-H, siendo las consultas 7, 8, 11, 13, 16, 19 y 22 aquellas que lograron dicha mejora. Por su parte, el particionamiento List también logró una mejora en el tiempo de respuesta de las consultas 3, 5, 6, 9, 10, 14, 15 y 20, obteniendo así una mejora en 15 de las 22 consultas, es decir, se obtuvo una mejora total del 68.18% en las BD fragmentadas con respecto a la BD original.

Por otra parte, para el caso de PostgreSQL (Tabla 4.3), el particionamiento Range logró mejorar los tiempos de respuesta para tres de las consultas de TPC-H, siendo las consultas 6, 16 y 22 aquellas que lograron dicha mejora. Además, el particionamiento List logró una mejora en el tiempo de respuesta de las consultas 8, 11, 14, 15 y 19. Así mismo, el particionamiento Hash logró una mejora en el tiempo de respuesta de las consultas 12, 13, 20 y 21, obteniendo así una mejora en 12 de las 22 consultas, es decir, se obtuvo una mejora total del 54.55% en las BD fragmentadas con respecto a la BD original.

De forma similar, las Tablas 4.4 y 4.5 muestran los tiempos de respuesta de las consultas de lectura y escritura de datos en TPC-E Además, en este caso las consultas se ejecutaron 100 veces cada una, gracias al corto tiempo que tardaron en ejecutarse.

 ISSN en trámite

**Table 4.3. Comparación de tiempos de respuesta en la BD TPC-H con PostgreSQL**

| No. de consulta | Sin partición | Range | List | Hash |
|---|---|---|---|---|
| 1 | **3.36** | 3.41 | 3.46 | 3.42 |
| 2 | **0.47** | 0.48 | 0.51 | 0.49 |
| 3 | **0.73** | 3.82 | 1281.55 | 4.06 |
| 4 | **0.42** | 2.1 | 2.16 | 2.03 |
| 5 | **0.48** | 3.37 | 3.53 | 3.44 |
| 6 | 0.61 | **0.54** | 0.59 | 0.61 |
| 7 | **0.68** | 4.69 | 4.38 | 4.25 |
| 8 | 1.03 | 2.01 | **0.95** | 2.03 |
| 9 | **2.21** | 41.53 | 2.61 | 42.01 |
| 10 | **0.98** | 2.8 | 1.08 | 2.39 |
| 11 | 0.25 | 0.3 | **0.24** | 0.31 |
| 12 | 0.9 | 0.85 | 0.89 | **0.83** |
| 13 | 1.16 | 1.04 | 1.08 | **1.03** |
| 14 | 0.62 | 0.63 | **0.56** | 0.62 |
| 15 | 1.3 | 1.15 | **1.1** | 1.15 |
| 16 | 0.65 | **0.62** | 0.64 | 0.69 |
| 17 | **5116.84** | 5256.93 | 5520.46 | 5196.59 |
| 18 | **3.69** | 9.72 | 48.58 | 9.77 |
| 19 | 0.88 | 0.85 | **0.76** | 0.84 |
| 20 | 30839.13 | 31456.2 | 33980.43 | **30745.53** |
| 21 | 0.98 | 0.96 | 4.22 | **0.95** |
| 22 | 0.68 | **0.63** | 0.67 | 0.64 |

**Table 4.4. Comparación de tiempos de respuesta en la BD TPC-E con MySQL**

| No. de consulta | Sin partición | Range | List | Hash | Key |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.00087 | 0.00103 | 0.00106 | 0.00091 | **0.00086** |
| 2 | **0.00031** | 0.00046 | 0.00046 | 0.00048 | 0.00046 |
| 3 | **2.86611** | 3.03084 | 5.49348 | 3.00366 | 3.07758 |
| 4 | **3.07730** | 3.32959 | 5.86820 | 3.31341 | 3.34779 |
| 5 | 0.09506 | **0.09412** | 2.92519 | 0.10711 | 0.10437 |
| 6 | 0.23180 | **0.22921** | 3.18076 | 0.24685 | 0.24427 |
| 7 | 0.00054 | 0.00040 | 0.00040 | **0.00029** | 0.00043 |
| 8 | 0.00065 | 0.00054 | 0.00046 | **0.00044** | 0.00051 |

**Table 4.5. Comparación de tiempos de respuesta en la BD TPC-E con PostgreSQL**

| No. de consulta | Sin partición | Range | List | Hash |
|---|---|---|---|---|
| 1 | **0.00111** | 0.00121 | 0.001424 | 0.002188 |
| 2 | **0.00052** | 0.00099 | 0.001077 | 0.001184 |
| 3 | **0.24385** | 0.55093 | 0.338835 | 0.549119 |
| 4 | **1.68750** | 1.84401 | 2.189544 | 1.850861 |
| 5 | 0.77639 | 0.84029 | **0.428474** | 0.766166 |
| 6 | 2.76766 | 2.15018 | **1.754820** | 2.305706 |
| 7 | 0.00045 | 0.00041 | **0.000399** | 0.000444 |
| 8 | 0.00076 | 0.00147 | **0.000700** | 0.001378 |

Como se observa en la Tabla 4.4, para el caso de MySQL, el particionamiento Range logró mejorar los tiempos de respuesta para dos de las consultas de TPC-E, siendo las consultas 5 y 6 aquellas que lograron dicha mejora. Por su parte, el particionamiento Hash logró una mejora en el tiempo de respuesta de las consultas 7 y 8. Además, el particionamiento Key también logró una mejora en el tiempo de respuesta de la consulta uno, obteniendo así una mejora en 5 de las 8 consultas, es decir, se obtuvo una mejora total del 65% en las BD fragmentadas con respecto a la BD original.

Siguiendo con PostgreSQL (Tabla 4.5), es posible apreciar que el particionamiento List obtuvo una mejora en las consultas 5, 6, 7 y 8, lo que indica que se obtuvo una mejora de rendimiento total en las BD fragmentadas de sólo un 50%.

## 5. CONCLUSIONES

Los métodos de particionamiento son técnicas muy útiles que permiten escalar en gran medida cuando las bases de datos empiezan a crecer de forma considerable, no obstante, con base en los experimentos realizados en este trabajo, se observó que es importante analizar bien el tipo de consultas a realizar, así como los atributos a considerar en la BD. Por otra parte, en cuanto a los resultados obtenidos se observó que MySQL fue el que logró mejores resultados, no obstante, es necesario recalcar que cada SGBD tiene sus ventajas y desventajas, aunque para el caso de la fragmentación de tablas, MySQL es el que toma la ventaja ofreciendo una mejor implementación de métodos de particionamiento, sin mencionar que cuenta con una cantidad extensa de métodos de particionamiento. Además, en MySQL también es posible realizar subparticiones, haciendo óptima la BD si la fragmentación se implementa de forma adecuada.

La principal contribución de este artículo es un análisis comparativo entre los gestores MySQL y PostgreSQL considerando los distintos tipos de partición en las bases de datos TPC-H y TPC-E. Este análisis permitió encontrar aspectos relevantes para el proyecto titulado "Desarrollo de Nuevos Métodos de Fragmentación Dinámica para Bases de Datos Multimedia".

Finalmente, con base en los métodos de partición desarrollados en este trabajo, como trabajo a futuro se pretende llevar a cabo las mismas pruebas en un entorno de desarrollo diferente, teniendo un sistema operativo Linux como anfitrión y un clúster como máquina de pruebas, con el objetivo de comparar los tiempos de respuesta en distintos sistemas operativos y sustentar aún más los resultados obtenidos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Secretaría de Educación Pública (SEP) por el soporte financiero a través del Fondo Sectorial de Investigación para la Educación, así como al Instituto Tecnológico de Orizaba (ITO) y a la Universidad del Papaloapan (UNPA) por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto.

Esta investigación contribuyó al proyecto titulado "Desarrollo de Nuevos Métodos de Fragmentación Dinámica para Bases de

 ISSN en trámite

Datos Multimedia" apoyado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación, con clave A1-S-51808.

REFERENCIAS

Amirthalingam, T., & Rais, H. M. (2018). Automated Table Partitioner (ATAP) in Apache Hive. 2018 4th International Conference on Computer and Information Sciences (ICCOINS). DOI: https://doi.org/10.1109/iccoins.2018.8510580

Benkrid, S., Mestoui, Y., Bellatreche, L., & Ordonez, C. (2020). A Genetic Optimization Physical Planner for Big Data Warehouses. 2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). DOI: https://doi.org/10.1109/bigdata50022.2020.9378196

Costa, E., Costa, C., & Santos, M. Y. (2019). Evaluating partitioning and bucketing strategies for Hive-based Big Data Warehousing systems. Journal of Big Data, 6(1). DOI: https://doi.org/10.1186/s40537-019-0196-1

DB-Engines Ranking. (2021). DB-Engines. https://db-engines.com/en/ranking

IBM Db2 documentation. (2021). IBM. https://www.ibm.com/docs/en/db2

Kumar, A. S. (2016). Performance analysis of MySQL partition, hive partition-bucketing and Apache Pig. 2016 1st India International Conference on Information Processing (IICIP). DOI: https://doi.org/10.1109/iicip.2016.7975328

Maabreh, S. K. (2018). Optimizing Database Query Performance Using Table Partitioning Techniques. 2018 International Arab Conference on Information Technology (ACIT). DOI: https://doi.org/10.1109/acit.2018.8672584

Mahmud, M. S., Huang, J. Z., Salloum, S., Emara, T. Z., & Sadatdiynov, K. (2020). A survey of data partitioning and sampling methods to support big data analysis. Big Data Mining and Analytics, 3(2), 85–101. DOI: https://doi.org/10.26599/bdma.2019.9020015

Medina, F. (2019). *Aplicación de métodos de fragmentación y replicación de datos en la nube* [Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Orizaba]. Repositorio TecNM Campus Orizaba. http://repositorios.orizaba.tecnm.mx:8080/xmlui/handle/123456789/399

Miller, Z., Sukhija, N., Arora, R., & Gessinger, A. (2018). Towards a Parallel User Tool (ParDP) for Automatic Data Partitioning of Relational Databases. Proceedings of the Practice and Experience on Advanced Research Computing - PEARC '18. DOI: https://doi.org/10.1145/3219104.3229255

MySQL 8.0 Reference Manual. (2021). MySQL. https://dev.mysql.com/doc/refman/8.0/en/

Oracle Database 21c. (2021). Oracle. https://docs.oracle.com/en/database/oracle/oracle-database/21/index.html

PostgreSQL 14.1 Documentation. (2021). The PostgreSQL Global Development Group. https://www.postgresql.org/docs/current/index.html

Qin, X., Chen, Y., Jin, G., Liu, Y., Cong, Y., & Du, X. (2016). Entity Fiber Based Partitioning, No Loss Staging and Fast Loading of Log Data. 2016 17th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT). DOI: https://doi.org/10.1109/pdcat.2016.052

Šalgová, V., & Matiaško, K. (2020). Reducing Data Access Time using Table Partitioning Techniques. 18th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA), 2020, pp. 564-569. DOI: https://doi.org/10.1109/ICETA51985.2020.9379231

Šalgová, V., & Matiaško, K. (2021). The Effect of Partitioning and Indexing on Data Access Time," 2021 29th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), 2021, pp. 301-306. DOI: https://doi.org/10.23919/FRUCT52173.2021.9435500

Serlin, O., Sawyer, T., & Gray, J. (2015). *TPC-E*. https://www.tpc.org/tpce/

Serlin, O., Sawyer, T., & Gray, J. (2021). *TPC-H*. https://www.tpc.org/tpch/

SQL Server technical documentation. (2021). Microsoft. https://docs.microsoft.com/en-us/sql/sql-server/?view=sql-server-ver15

Sridevi, S.V.G., & Sharma, Y.K. (2020). An Approximative Study of Database Partitioning with Respect to Popular Social Networking Websites and Applications. In: Smys S., Bestak R., Rocha Á. (eds) Inventive Computation Technologies. ICICIT 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 98. Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33846-6_94

Suh, YK., Crolotte, A., & Kostamaa, P. (2018). MLPPI Wizard: An Automated Multi-level Partitioning Tool on Analytical Workloads. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 12(4), 1693-1713. DOI: https://doi.org/10.3837/tiis.2018.04.016

Sukhija, N., Miller, Z., & Arora, R. (2017). A High-Level Tool for Enhancing the Performance and Scalability of Open-Source Relational Databases. Proceedings of the 9th International Conference on Management of Digital EcoSystems - MEDES '17. DOI: https://doi.org/10.1145/3167020.3167031

 ISSN en trámite

# Análisis histórico de servicios de salud a población que carece de empleo formal

**Dr. Gilberto L. Martínez Luna* Dr. Adolfo Guzmán Arenas****
**Ing. Luis A. Cruzado Peña*****

** Centro de Investigación en Computación del I.P.N. (CIC-IPN), CDMX, C. P. 07738 MÉXICO (Tel: 5563418281; correo: lluna@cic.ipn.mx).*
*** Centro de Investigación en Computación del I.P.N. (CIC-IPN), CDMX, C. P. 07738 MÉXICO (Tel: 5511410050; correo: a.guzmanarenas@gmail.com).*
**** Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del I.P.N(ESIME-IPN), CDMX, C. P. 07738 MÉXICO (Tel: 5517447127; correo: luiscruzado@esimez.mx).*

**Resumen:** La dependencia de gobierno que da servicios de salud gratuitos a personas que carecen de una fuente de trabajo fija, han publicado el histórico nacional de los servicios requeridos en un lapso de 18 años. La herramienta de Análisis Histórico de Servicios de Salud permite la visualización de estos datos catalogados por la Clasificación Internacional de Enfermedades en su décima versión. Las visualizaciones muestran los principales servicios médicos con mayor número de egresos otorgados a nivel nacional por género en los que por género masculino se encuentran traumatismos, envenenamientos, sistema digestivo, sistema genitourinario y neoplasias, mientras que género femenino se encuentran las categorías de sistema digestivo, neoplasias y sistema genitourinario. También muestran las categorías principales causantes de defunciones en rangos de edades, un rango de muestra es en personas mayores a 66 años donde las principales categorías son el sistema circulatorio, el sistema respiratorio y el sistema digestivo. Se visualizan los principales servicios otorgados a varios estados de México y se observa que siguen un patrón de servicios otorgados a nivel nacional.

***Palabras clave**:* Servicios de Salud, Base de Datos, Ciencia de Datos, Visualización, Preprocesamiento de Datos, Análisis histórico.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de salud en el mundo tienen gran importancia por el momento que vivimos y el servicio que prestan a la población mundial (Schuchat, A. y Rothwell, C., 2017)., (OCDE, 2016), (Ocaña-Riola, 2016), (Health at a Glance 2017: OECD Indicators, 2017), (Organización Mundial de la Salud, 2017), (World Health Organization, 2018), (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, 2018), (Secretaría de Salud, 2016). y (PIIMSS, 2016). El sistema de salud de México está compuesto por dos sectores: público y privado (ver Figura 1). La institución dedicada de brindar servicios de sanidad a quienes carecen de seguridad social laboral es la Secretaría de Salud, cuyo porcentaje de atención asciende al 26.2% de la población tan solo en el 2020 (INEGI, 2022). Con la demanda de su servicio, la Secretaría de Salud almacena información de cada paciente, que ingresa y egresa del servicio de salud, la entidad pública que se encarga de estos datos es la Dirección General de Información de Salud, nos permite obtener los datos abiertos de egresos hospitalarios a través de su portal, gracias a la Ley de Transparencia, y Acceso a la Información Pública (Dof.gob.mx, 2017).

### 1.1 OBJETIVO

A través de la visualización de datos de egresos hospitalarios de los servicios de salud es posible localizar tendencias o patrones de comportamiento en la historia de los servicios a enfermedades en pacientes que no tienen trabajo formal.

Estos resultados pueden ayudar al sector salud a poder visualizar las principales enfermedades que se dan por estado y a nivel nacional con el fin de estar preparados para estas enfermedades.

## 2. ESTADO DEL ARTE

Herramientas con objetivos similares a ANSESA son a) El proyecto por el momento apoyado por CONACYT es (Conacyt, 2022), el cual marca como objetivo la construcción de un Sistema de Análisis y Visualización de Información en Salud (SAVIS), que estará constituido por un repositorio que integra los datos de los diferentes subsistemas de información en salud; b) La página (Sistema de Información de la Secretaría de Salud, 2022) apoyada por la Dirección General de Información en Salud, también usa los datos de la Secretaria de Salud para realizar visualizaciones de la información libre de la misma entidad, sin embargo, no utiliza esta información bajo un criterio médico con el CIE-10; y c) El Instituto de Métricas y evaluación de la Salud es un centro de investigación de salud global independiente de la Universidad de Washington (Institute for Health Metrics and Evaluation, 2019), contiene varios sistemas

 ISSN en trámite

de análisis enfocados a la salud, pero con un enfoque de salud global y enfermedades puntuales.

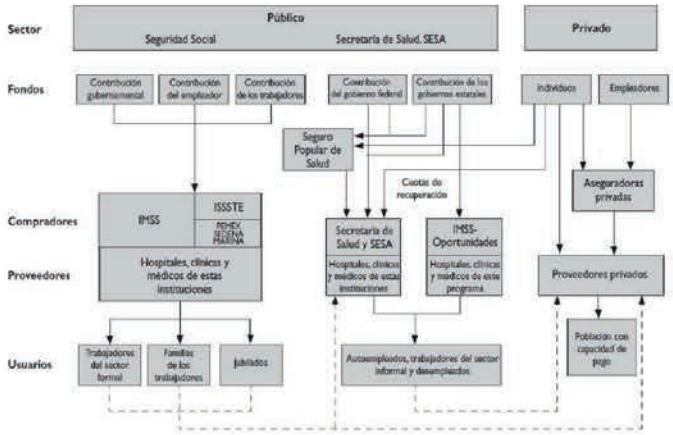



Fig. 1. El sistema de salud en México (Gómez D., 2011).

## 3. UN ANÁLISIS CON ANSESA

En nuestras narrativas siguientes, será similar que se mencione un servicio médico a un servicio a una enfermedad, dado que un servicio médico puede no ser un paciente del estado en que se haya ubicada la clínica.

### *3.1 Datos a visualizar*

Los datos procesados se obtuvieron de la Dirección General de Información en Salud de datos abiertos en la categoría de egresos hospitalarios (Salud.gob.mx, 2013), desde el año 2000 al 2017. La tabla 1 muestra cómo se esquematizó el contenido de 2000 a 2017, información que esta integrad en ANSESA (Derechos de autor en el I.P.N. 03-2019-121310021500-01) desarrollada en Centro de Investigación de Computación del Instituto Politécnico Nacional con el acceso http://148.204.64.166/lcdyts/Servicios/.

**Tabla 1. Contenido general de la base de datos**

| | |
|---|---|
| No. de estados | 32 |
| No. de años | 18 |
| No. de motivos de egreso | 8 |
| No. de enfermedades | 21 |
| No. de géneros | 2 |
| No. de edades | 130 |
| No. de registros totales | 41 847 637 |

El número de enfermedades se basa en el total de enfermedades en el primer nivel de la CIE-10 (Who.int, 2019).

Con estos datos se pueden observar las tendencias en las categorías de las enfermedades a través de los años, aplicando distintos filtros ya sea por edad, por sexo y por estado, así como desarrollar comparativos de las tendencias entre estados o categorías.

### *3.2 Herramientas utilizadas*

MYSQL Workbench Community Etition software de código abierto administra la base de datos. Así como el manejo y procesamiento de datos se utilizaron Python 3 y la librería de Pandas que permite manejar la carga de datos de manera sistemática. Por último, la herramienta utilizada para la visualización de la información fue Tableau, que permite diseñar tableros de visualización, así como la aplicación de filtros para encontrar información y patrones de interés para el usuario.

### *3.3 Análisis en ANSESA por Categorías o Servicios Médicos*

Analizaremos varias gráficas que podrían ser de interés para el usuario y que muestran un uso específico y contribución que dan las visualizaciones de los datos, usando la herramienta ANSESA.

Las gráficas por analizar serán las siguientes:

3.4 Servicios a enfermedades a nivel nacional.
3.5 Servicios a enfermedades por estado.
3.6 Principales enfermedades causantes de muerte por rangos de edad a nivel nacional.

### *3.4 Análisis en ANSESA por Categorías o Servicios Médicos a nivel nacional*

En el caso de los servicios a enfermedades a nivel nacional y por estado no se toman en cuenta el servicio a "Embarazo, puerto y puerperio". Esto debido a que solo es una condición que se da en el sexo femenino y no permite hacer análisis equitativo entre géneros, ver tabla 2.

**Tabla 2. Servicios por año en la Secretaria de Salud, pacientes sin empleo formal, * con registros sin categoría**

| Año | Registros | Embarazos | Año | Registros | Embarazos |
|---|---|---|---|---|---|
| 2000 | 1,416,783 | 660,669 | 2010 | 2,634,339 | 1,241,187 |
| 2001 | 1,526,021 | 695,152 | 2011 | 2,774,950 | 1,284,403 |
| 2002 | 1,639,142 | 741,559 | 2012 | 2,880,363 | 1,296,974 |
| 2003 | 1,707,969 | 780,451 | 2013 | 2,880,394 | 1,277,341 |
| 2004 | 1,757,585 | 800,307 | 2014 | 2,865,657 | 1,275,547 |
| 2005 | 1,981,020 | 902,312 | 2015 | 2,868,016 | 1,249,138 |
| 2006 | 2,100,091 | 952,854 | 2016 | 2,857,742 | 1,208,435 |
| 2007 | 2,312,008 | 1,028,405 | 2017 | 2,603,254 | 1,100,366 |
| 2008 | 2,463,976 | 1,131,270 | | | |
| 2009 | 2,598,310 | 1,223,164 | Total: | 42,246,669* | |

ISSN en trámite

A continuación, se muestra la fig. 2 de los servicios médicos a través de los años a nivel nacional tomada desde ANSESA, la cual nos muestra cuáles principales servicios se mantienen constantes desde el 2000 al 2017 (sin importar el género). Se puede observar que mostramos tres, los cuales son:

1. Sistema digestivo.
2. Traumatismos, envenenamiento y algunas otras consecuencias de causas externas.
3. Sistema genitourinario.

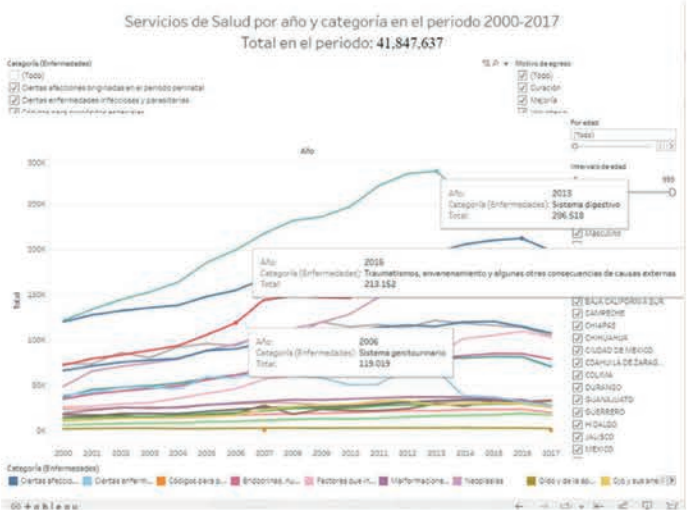



Fig. 2. Servicios médicos a nivel nacional ambos géneros

Ahora, se muestra la en la fig. 3 y 4, los servicios a través del tiempo a nivel nacional por género, en donde la fig. 3 muestra los tres principales servicios médicos del género masculino con mayor número de egresos. Las cuales son:

1. Traumatismos, envenenamiento y algunas otras consecuencias de causas externas.
2. Sistema digestivo.
3. Sistema genitourinario.
4. Neoplasias

Mientras que en la fig. 4, que muestra los tres servicios médicos del género femenino son:

1. Sistema digestivo.
2. Neoplasias.
3. Sistema genitourinario.

Estas visualizaciones permiten conocer qué principales servicios, por género, así como por nivel nacional, afectan a la población sin seguridad laboral.

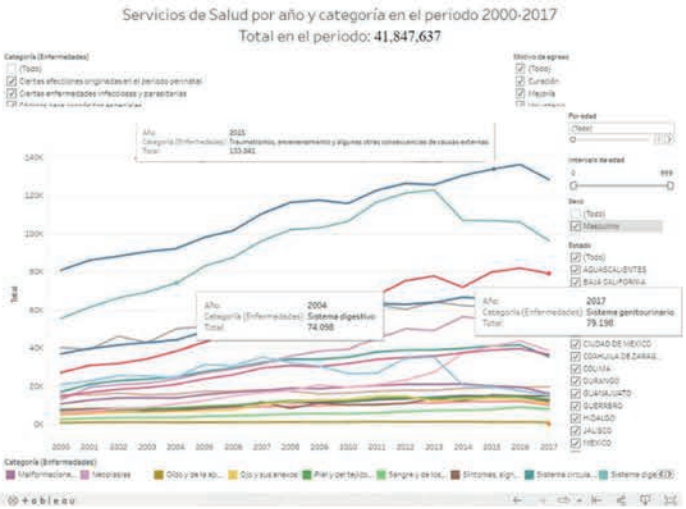



Fig. 3. Servicios médicos a nivel nacional género masculino

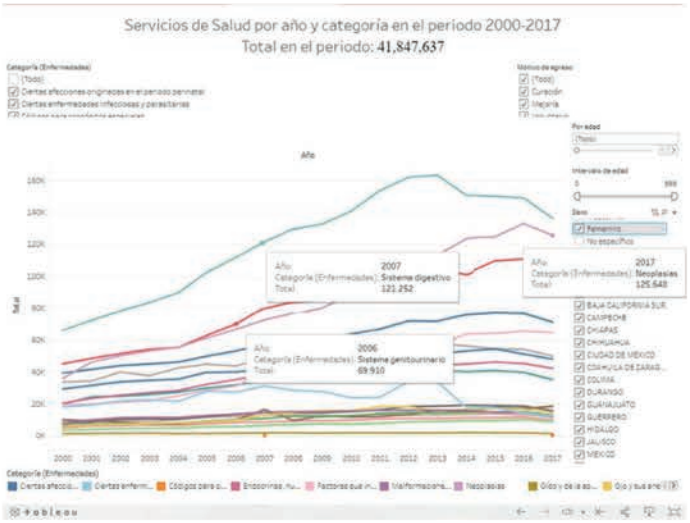



Fig. 4. Servicios médicos a nivel nacional género femenino

*3.5 Análisis en ANSESA por Categorías o Servicios Médicos a nivel estado*

Para el siguiente análisis se aplicó un filtro de estado. Se selecciono los tres estados con mayor número de egresos y los tres estados con menor número de egresos, este proceso de selección lo muestra la fig. 5, donde se obtuvo el promedio de todos los años por estado para poder realizar el ordenamiento de estos.

Mediante la elección de estos estados, se realizó la visualización de dos de los estados con mayor número de egresos que se muestran en la fig. 6 y la fig. 7, en la fig. 6, se puede visualizar que en la Ciudad de México el principal servicio de enfermedad que tiene mayor número de casos, es la neoplasia, una enfermedad que se encuentra a nivel nacional mostrado en la fig.2, también se visualiza que en segundo lugar se encuentra el servicio de sistema digestivo y en tercer lugar traumatismos,

ISSN en trámite

envenenamientos, que a nivel nacional se encuentran de igual manera.

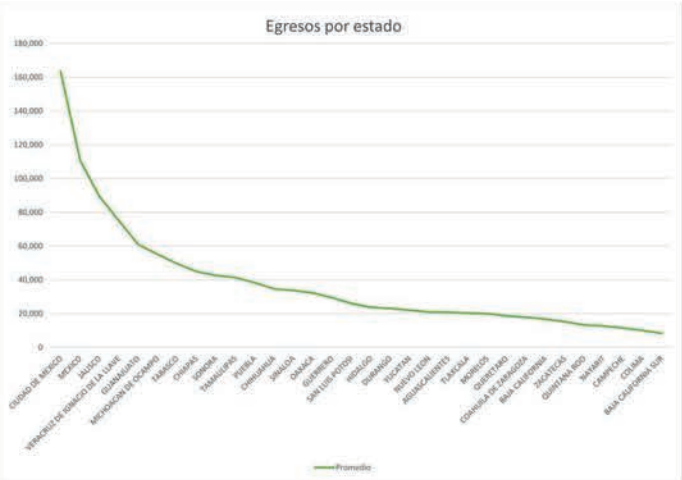



*Fig. 5. Promedio de egresos por estado*

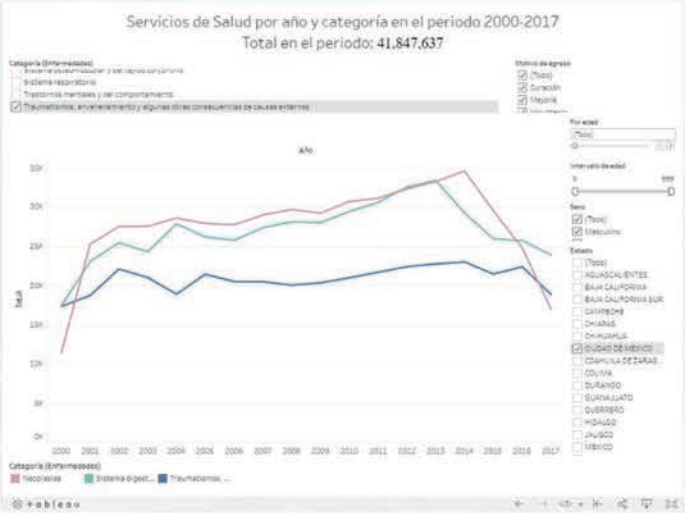



Fig. 6. Servicios a ambos géneros de Ciudad de México

En la fig. 7 se muestra el estado de Veracruz que de igual manera que en la fig. 6 muestran mismos servicios médicos que a nivel nacional. Si bien Veracruz, tiene más servicios del sistema digestivo, es interesante visualizar que los estados con mayor número de egresos tienen como servicios médicos principales los mismos que en la fig. 2 a nivel nacional.

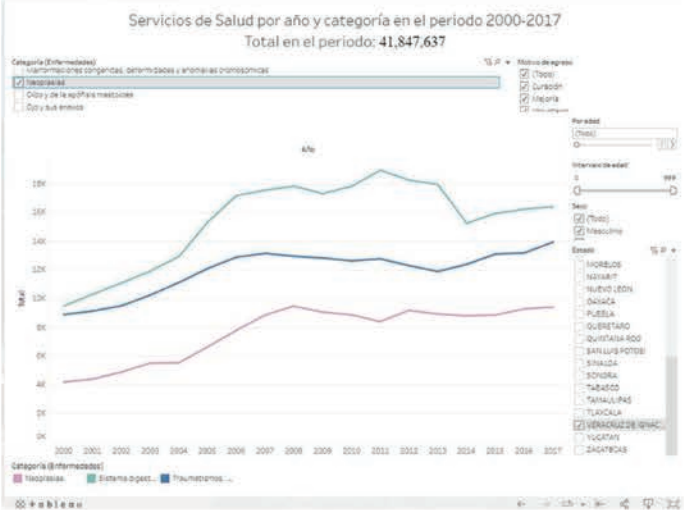



Fig. 7. Servicios médicos a ambos géneros de Veracruz

En las fig. 8 y 9 se muestran las visualizaciones de los estados de Campeche y Colima que contienen menor número de egresos hospitalarios. Por lo que se puede visualizar que los principales servicios que están en estos dos estados siguen siendo los mismos que se encuentran en la fig. 1 a nivel nacional. Y en los dos estados se encuentran los servicios del sistema digestivo como primer lugar, en segundo lugar, traumatismos y envenenamientos, y en tercer lugar el sistema genitourinario. Por lo tanto, se puede decir que los servicios médicos tanto en estados con mayor número de egresos hospitalarios es similar al de estos con menor número de egresos hospitalarios.

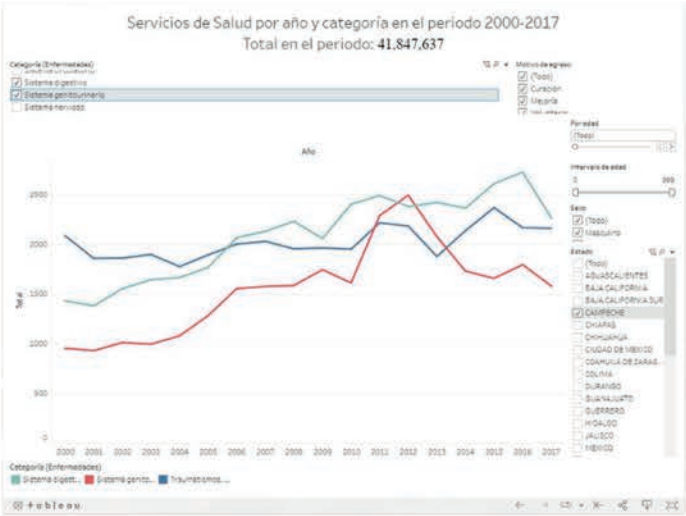



*Fig. 8. Servicios médicos a ambos géneros de Campeche*

ISSN en trámite

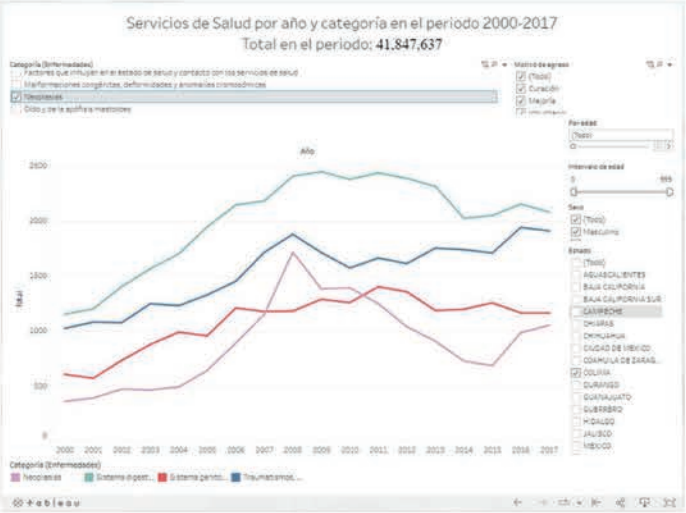



*Fig. 9. Servicios médicos a ambos géneros de Colima*

*3.6 Análisis en ANSESA por Categorías o Servicios Médicos por edad*

C.- En el último análisis se aplicaron dos filtros distintos, uno usando el filtro de motivo de egreso de tipo defunción y el otro filtro que se aplico fue el filtro de rango de edades. Con estos filtros aplicados se visualizan en la fig. 10, 11 y 12 las tres enfermedades que causan la muerte en personas de ambos sexos a nivel nacional entre rangos de edades descritos a continuación.

Fig. 10. Enfermedades que causan la muerte entre edades de 20 a 40 años

De la fig. 10 se pueden observar las siguientes enfermedades de adultos entre 20 a 40 años:

1. Infecciosas y parasitarias.
2. Traumatismos, envenenamiento y algunas otras consecuencias de causas externas.
3. Sistema digestivo.

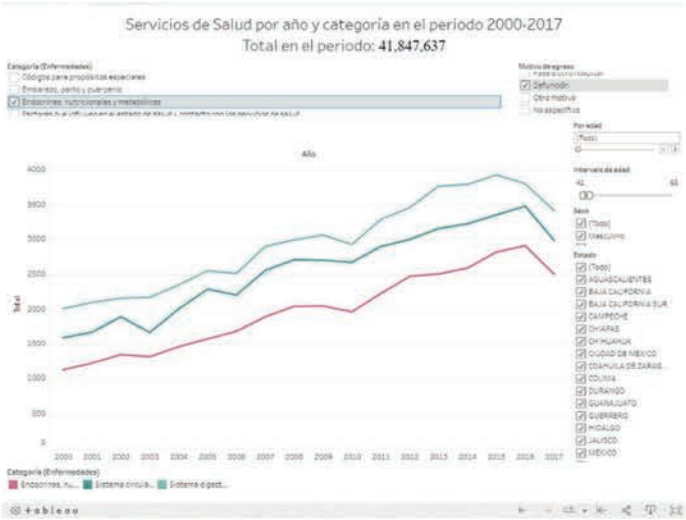



*Fig. 11. Enfermedades que causan la muerte entre edades de 41 a 65 años*

*La fig. 11 se pueden observar las siguientes enfermedades:*

1. Sistema digestivo.
2. Sistema circulatorio.
3. Endocrinas, nutricionales y metabólicas

Estas son las causantes de defunciones entre adultos de 41 a 65 años.

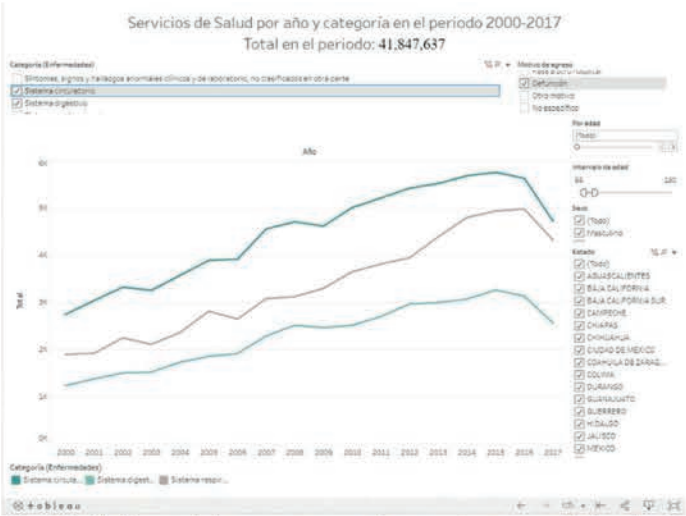



Fig. 12. Enfermedades que causan la muerte entre edades de 66 años en adelante

La fig. 12 muestra las enfermedades causantes de muerte en personas mayores de 66 años, estas enfermedades son las siguientes:

1. Sistema circulatorio.
2. Sistema respiratorio.

 ISSN en trámite

3. Sistema digestivo.

Como se puede observar de las fig. 10, 11 y 12, entre los distintos rangos de edades se observan distintas enfermedades que causan la muerte, esto estas enfermedades se pueden ligar a su vez al ciclo de vida del ser humano que puede ser de interés para el usuario.

## 4. CONCLUSIONES

La visualización temporal de datos en egresos hospitalarios de servicios de salud ayuda a revisar patrones o tendencias en los datos, que el usuario del tema de salud puede utilizar en sus estudios. ANSESA es una herramienta que permite visualizar esta información histórica, además permite aplicar distintos filtros para la visualización temporal desde diferentes perspectivas, que pueden ser interesantes para el usuario.

El análisis realizado muestra información relevante acerca de las diferentes categorías del CIE 10 a nivel nacional por perspectivas como: por el género que es afectado, por estado, por categoría, por resultado del servicio y por determinado año.

Se analizaron las categorías de los servicios médicos en los estados con mayor y menor frecuencia de egresos, observando que siguen un patrón parecido a las principales categorías a nivel nacional.

El análisis de defunciones por rango de edad permitió observar las principales enfermedades que causan la muerte a través del ciclo de vida del ser humano.

## REFERENCIAS

Conacyt. (2022). *Sistema de visualización de los principales problemas de salud – Conacyt*. [En línea] Disponible en: https://conacyt.mx/pronaces/pronaces-salud/ciencia-de-datos-y-salud/sistema-de-visualizacion-de-los-principales-problemas-de-salud. [Acceso el 4 de octubre de 2022].

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, (2018). *Estudio diágnostico del derecho a la salud 2018*, Primera ed., CONEVAL, México.

Dof.gob.mx. (2017). *SG_090516*. [En línea] Disponible en: https://www.dof.gob.mx/avisos/2493/SG_090516/SG_090516.html [Acceso el 7 de octubre de 2022].

Gómez D., O. (2011). *Sistema de salud de México,* Instituto Nacional de Salud Pública, Vol. 53, pp. S221.

Health at a Glance 2017: OECD Indicators. (2017). [En línea] *OECD*. Disponible en: https://www.oecd.org/mexico/Health-at-a-Glance-2017-Key-Findings-MEXICO-in-Spanish.pdf [Acceso el 4 de octubre de 2022].

INEGI (2022). Tabulados Interactivos-Genéricos. [En línea] Inegi.org.mx. Disponible en: https://inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?pxq=Derechohabiencia_Derechohabiencia_01_3e83e8a1-690d-4cfb-8af0-a1e675979b3e [Acceso el 5 de octubre de 2022].

Institute for Health Metrics and Evaluation. (2019). *Institute for Health Metrics and Evaluation*. [En línea] Disponible en: https://www.healthdata.org/ [Acceso el 4 de octubre de 2022].

Ocaña-Riola, R. (2016). *The Use of Statistics in Health Sciences: Situation Analysis and Perspective*, Statistics in Biosciences, Vol. 8, pp. 204-219.

OCDE (2016). *Estudios de la OCDE sobre los Sistemas de Salud:* México, OECD Publishing, París.

Organización Mundial de la Salud. (2017). *Salud en las américas, Resumen: panorama regional y perfiles de país*, 2017 ed., Organización Mundial de la Salud, Washington, D.C.

PIIMSS, (2016). *2016 Plan Nacional de Desarrollo PIIMSS*, Programa Institucional del Instituto Mexicano del Seguro Social 2014-2018, México.

Salud.gob.mx. (2013). *Egresos Hospitalarios*. [En línea] Disponible en: http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/basesdedatos/da_egresoshosp_gobmx.html [Acceso el 6 de octubre de 2022].

Schuchat, A. y Rothwell, C. (2017). *Health, United States with chartbook on long-term trends in health*, Department of Health and Human Services, U.S.

Secretaría de Salud (2016). *Informe sobre la Salud de los Mexicanos 2016, Diagnóstico General del Sistema Nacional de Salud,* Primera ed., Secretaría de Salud, México.

Sistema de Información de la Secretaría de Salud. (2022). *Sistema de Información de la Secretaría de Salud*. [En línea] Disponible en: http://sinaiscap.salud.gob.mx:8080/DGIS/ [Acceso el 4 de octubre de 2022].

Who.int. (2019). *ICD-10 Version:2019*. [En línea] Disponible en: https://icd.who.int/browse10/2019/en [Acceso el 6 de octubre de 2022].

World Health Organization, (2018). *World Health Statistics 2018, World Health Organization*.

 ISSN en trámite

# Procesado de imágenes para la obtención de la posición de líneas de pasillo en corredores industriales.

***Luis Rodrigo Bañuelos Hernández, **Rafael Sandoval Rodríguez, ***Arturo Legarda Sáenz, ****Hernán de la Garza Gutiérrez, *****Arturo Martínez Ayala.**

**Instituto Tecnológico Nacional de México campus Chihuahua II, Chihuahua, Chih. Mex.*
*(Tel: 614-442-5000; e-mail: M14550655@chihuahua2.tecnm.mx).*
***Instituto Tecnológico Nacional de México campus Chihuahua, Chihuahua, Chih. Mex.*
*(Tel: 614-201-2000; e-mail: rafael.sr@chihuahua.tecnm.mx).*
****Instituto Tecnológico Nacional de México campus Chihuahua II, Chihuahua, Chih. Mex.*
*(Tel: 614-442-5000; e-mail arturo.ls@chihuahua2.tecnm.mx).*
*****Instituto Tecnológico Nacional de México campus Chihuahua II, Chihuahua, Chih. Mex.*
*(Tel: 614-442-5000; e-mail: hernan.gg@chihuahua2.tecnm.mx).*
******Instituto Tecnológico Nacional de México campus Chihuahua II, Chihuahua, Chih. Mex.*
*(Tel: 614-442-5000; e-mail: arturo.ma@chihuahua2.tecnm.mx).*

Resumen: Las tecnologías de visión artificial están teniendo un impacto considerable en las actividades económicas, principalmente en la obtención de datos de entorno. En este trabajo se aborda el procesamiento de imágenes para obtener las líneas que delimitan un pasillo en un entorno de producción industrial común. Se prueban algunas técnicas de obtención como parte de la librería *OpenCV*, principalmente las funciones *findContours* y *HoughLines*. Se presentan las diferencias de estas funciones y las imágenes obtenidas con cada una, así como los siguientes pasos en la detección oportuna de las líneas de pasillo. Las pruebas de funcionamiento del algoritmo de detección se realizan en una simulación de piso industrial a escala, obteniendo imágenes con la abstracción del pasillo.

*Keywords:* OpenCV, Hough, Visión artificial, ambiente industrial, vehículo autónomo, robot móvil.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la industria pasa por una etapa de transición; décadas de adaptación e investigación en mejorar procesos de manufactura y fabricación ha dejado a las fábricas con un claro paradigma de trabajo basado en la labor de recurso y capital humano. En los últimos años se ha avanzado en la implementación de agentes robóticos independientes que realizan trabajos repetitivos de una manera mas consistente, eficiente y confiable que sus contrapartes humanas. El siguiente paso en esta nueva revolución industrial radica en la inteligencia de estos agentes autónomos, dando la capacidad a las máquinas de trabajo de poder tomar decisiones acertadas en el momento. El primer paso en esta evolución son los AGV que, por sus siglas en inglés significa "Vehículos guiados automatizados" (Li, 2011).

En el ambiente industrial de manufactura uno de los obstáculos constantes en las líneas de producción es la forma en que las piezas llegan desde los almacenes hasta las estaciones donde son utilizadas. Desde retrasos en la reposición de piezas agotadas hasta confusiones de requisiciones logran retrasar las líneas por minutos, incluso horas.

Una posible solución a esta problemática es implementar vehículos autónomos para transporte de material. Tomando en cuenta que para desarrollar e implementar a estos agentes en ambientes industriales se debe ser lo más flexible y eficiente posible, y una opción para lograr lo anterior es tener un sistema que pueda identificar su ambiente sin utilizar un mapa generado de manera previa (Harapanahalli, 2019). Dentro de los sistemas necesarios para la operación de un vehículo autónomo están los procesos de reconocimiento del entorno (Zhao, 2017). En este trabajo se presenta una propuesta para la identificación de los límites de circulación de un pasillo para vehículos, el desarrollo y pruebas de varias opciones para lograr dicha identificación y los resultados obtenidos al momento.

## 2. DESARROLLO DEL PROYECTO

### *2.1 Imágenes de prueba*

Como primer paso para definir el ambiente de pruebas, se realizaron varias capturas de imágenes de 2 líneas de cinta azul sobre un fondo blanco, capturadas desde un punto fijo con un teléfono móvil con resolución de 640 x 480 pixeles,

ISSN en trámite

simplificando el entorno de pasillo en un corredor industrial como se puede ver en la figura Fig. **1**.

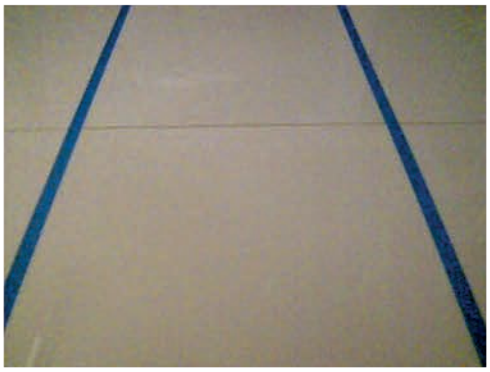


Fig. 1. Imagen de prueba inicial.

Con el fin de comprobar el comportamiento de los algoritmos desarrollados, se cambió por imágenes como la que se muestra en la figura Fig. **2**, con un entorno a escala mas acercado a la realidad y permitiendo diferentes combinaciones de líneas. Estás imágenes fueron capturadas desde una webcam Logitech c920 conectada a una laptop, corriendo los programas en Python 3.8. Así mismo, las imágenes son tomadas desde un robot educacional marca RoboRobo mientras dicho robot está en movimiento.

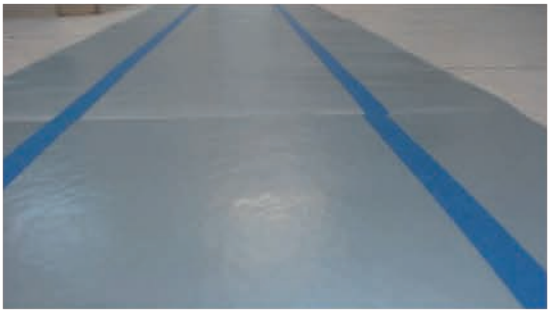


Fig. 2. Imagen de prueba mejorada.

*2.2 Preprocesado de imágenes*

El primer paso es convertir la imagen a escala de grises, en este caso utilizando el método BGR2GRAY de OpenCV, seguido por un proceso de umbralización inversa en conjunto con una umbralización Oshu.

Después se aplica a la imagen una operación de apertura para eliminar ruido en el fondo de la escena seguida de una operación de clausura. El resultado de estas 2 operaciones consecutivas es que los objetos presentes con un grosor considerable sean realzados mientras que los objetos más delgados al fondo de la imagen son eliminados.

Los resultados de estas operaciones se muestran en la figura Fig. **3**.

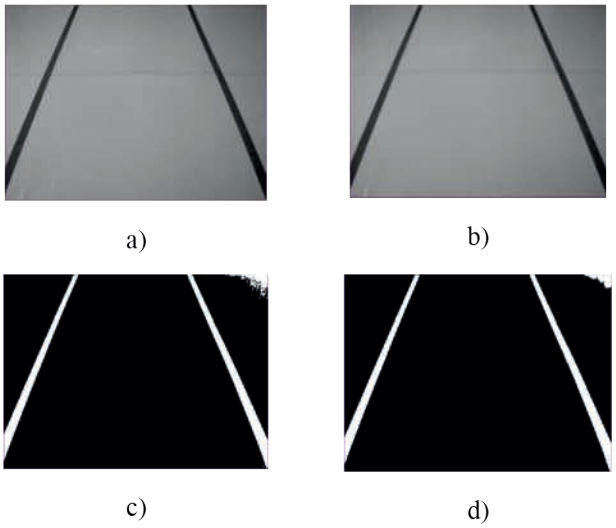



Fig. 3. Ejemplo de secuencia procesamiento: a) Escala de grises, b) Difuminación, c) Umbralización y d) Apertura.

*2.3 Procesado de imágenes*

Una vez obtenida la imagen con los objetos definidos, se procede a aplicar un filtro de detección de bordes, en este trabajo se utiliza la función *findContours* de *OpenCV*, teniendo como resultado una imagen negra con los bordes de todos los objetos presentes en la imagen dibujados en blanco. La función *findContours* nos devuelve una lista de vectores donde se guardan los puntos continuos correspondientes a los objetos presentes en la imagen. En la figura Fig. **4** se muestra el resultado.

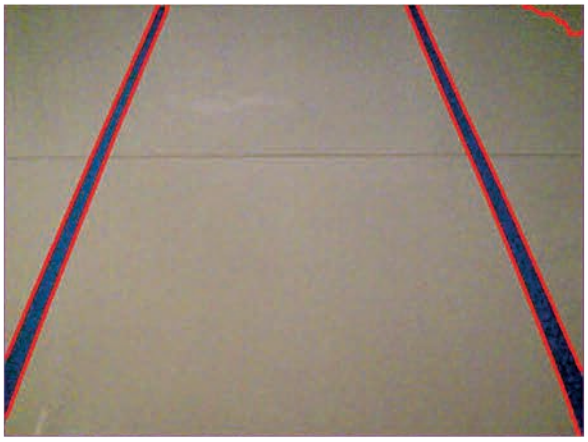


Fig. 4. Resultado de función *findContours*.

Aquí se presenta una problemática, y es que la función *findContours* también remarca los bordes de objetos tales como sombras sobre el fondo, lo que limita su operación. La manera de funcionar en este caso es aplicar otras funciones de detección más específicas. Para ello, entran en juego las líneas de Hough.

ISSN en trámite

La función *Houghlines* toma las porciones de imagen que mas se asemejen a líneas rectas, obteniendo dos valores: $\rho$ (rho) y $\alpha$ (alfa). La variable $\rho$ corresponde a la distancia mínima que tiene la línea hasta el origen de los pixeles de la imagen (esquina superior izquierda) y $\alpha$ es el ángulo que presenta la línea detectada. Almacena estos valores en una lista, que pueden ser graficados como se muestra en la figura Fig**. 5**.

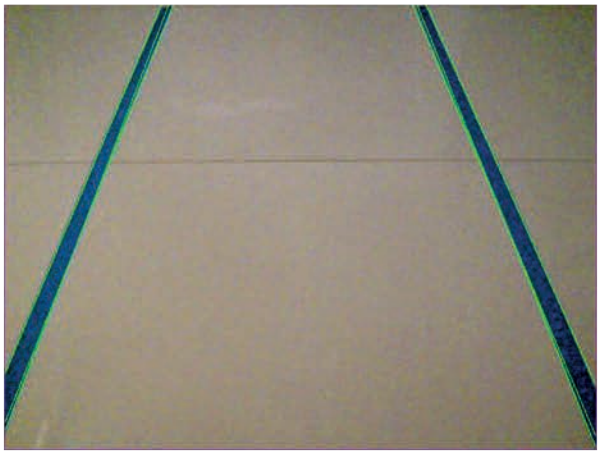


Fig. 5. Resultado de Houghlines.

Al utilizar la función Houghlines ocurre un comportamiento inestable, debido a que la función genera valores ρ y α para líneas con muy poca variación entre ellas, lo que produce una imagen con muchas líneas superpuestas.

Para solucionar lo anterior se desarrolló un algoritmo de promediado que separa la lista de valores calculados por Houghlines entre valores a la derecha o a la izquierda de la imagen. Esto último se realiza buscando una diferencia de ± 15 unidades entre los valores de α, poniendo en una lista los valores muy cercanos entre ellos y en otra los demás valores detectados.

Teniendo las líneas ya clasificadas por su proximidad se calcula un promedio de sus valores ρ y α, dando como resultado una única línea por lado de la imagen graficada en color blanco, como se muestra en la figura Fig**. 6**.

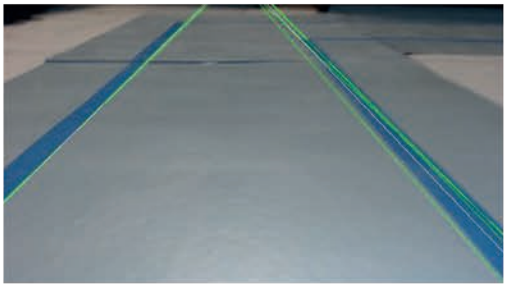


Fig. 6. Graficación de líneas promediadas.

Como último paso del procesado, para abstraer la información relevante del fondo se crea una nueva imagen de fondo negro y las líneas obtenidas graficadas en color blanco, como se muestra en la figura Fig**. 7**.

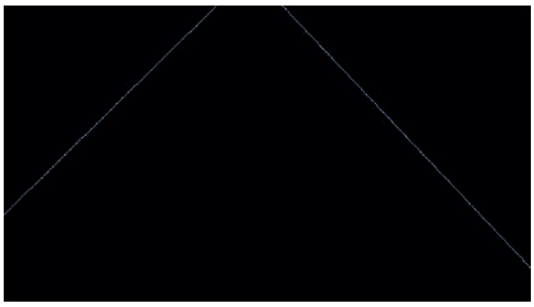


Fig. 7. Abstracción de límites de pasillo.

## 3. SIMULACIÓN DE ENTORNO DE PRUEBAS

Con el propósito de realizar pruebas de funcionamiento del sistema, se construyeron placas de cartón corrugado pintadas de color gris brillante para emular de una manera más fidedigna el entorno de una planta de manufactura industrial, marcando el pasillo con cinta para para enmascarar color azul de una pulgada de ancho. Estas placas son fácilmente ajustables permiten gran variedad de combinaciones para el entorno de pruebas.

Así mismo, para obtener el punto de vista de un vehículo en movimiento sobre el pasillo se construyó un modelo de vehículo educativo de la marca *RoboRobo*, contando con 2 ruedas, una base para colocar la cámara mencionada previamente en este trabajo y una unidad de radiofrecuencia para poder controlar el vehículo a distancia. En primera instancia se equipó al robot con una lámpara portátil para mejorar la iluminación al capturar las imágenes de prueba, pero se eliminó al observar que no hubo un cambio significativo en las capturas a comparación de las capturadas en ausencia de dicha luz. En la figura Fig**. 8** se muestra dicho robot.

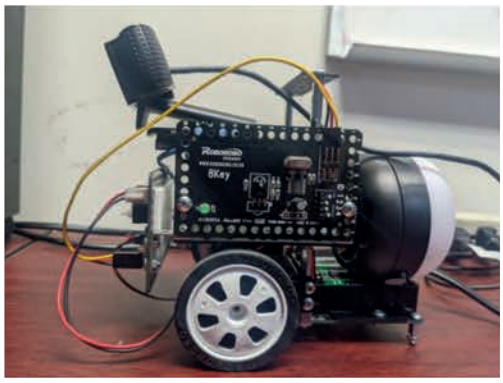


Fig. 8. Robot para pruebas de captura de imágenes.

Se prepararon varias configuraciones para probar el funcionamiento de los algoritmos aquí descritos. En la figura Fig**. 9** se muestra uno de los utilizados, ya con el robot en posición para comenzar la prueba.

ISSN en trámite

Fig. 9. Recorrido de pruebas como simulación de un pasillo industrial.

## 4. RESULTADOS

Mediante tres pruebas de captura de imágenes separadas se obtuvieron 3,640 imágenes procesadas desde el vehículo de pruebas. En la misma captura se guarda la imagen antes de procesar con las líneas detectadas graficadas sobre las mismas.

Utilizando las librerías *os*, *random*, *math* y *shutil* se seleccionaron aleatoriamente 344 pares de imágenes obtenidas, lo que es equivalente a aproximadamente el 10% del total, con el fin de evaluar manualmente el desempeño del algoritmo. Dicha evaluación se realizó con base en los siguientes parámetros:

- Se tienen 3 estados en los que se puede valorar una imagen: incorrecto, parcialmente correcto o correcto.
- Para presentar un estado "correcto" las imágenes abstractas deben representar las líneas presentes su par real.
- Se presenta un estado de "parcialmente correcto" si la imagen abstracta no representa a alguna de las líneas presentes en la imagen real, pero si representa a alguna de las demás.
- Se presenta un estado de "incorrecto" al no representar las líneas presentes en la imagen real.

Algunos ejemplos de dichos casos se presentan en la figura Fig. **10**, presentadas junto con sus pares de imagen real.

En algunos casos, las líneas graficadas difieren de las reales al presentar una angulación mayor o menor, por lo que entran en el estado de "parcialmente correcto". Así mismo, algunos casos representan a la línea de cinta por sus dos bordes verticales en vez de una línea central, en este caso se evalúa con el estado de "correcto" si solo se presenta una línea en la imagen real.

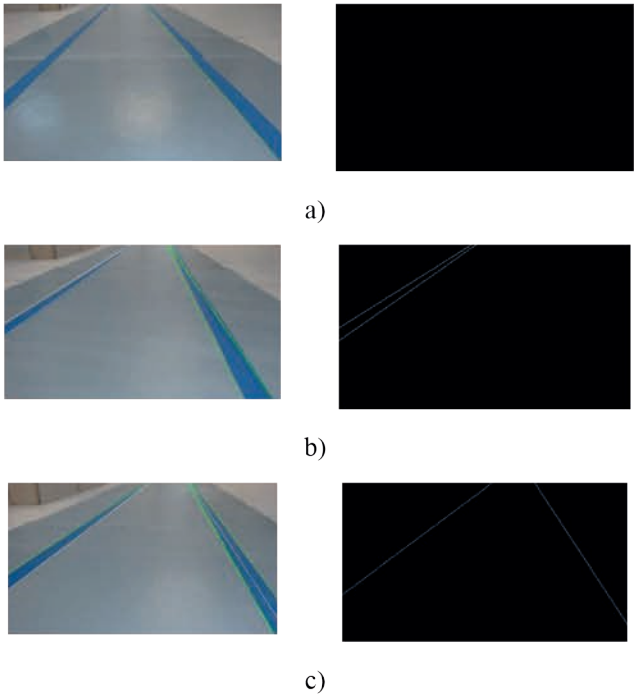



Fig. 10. Ejemplos de resultado de validación: a) Estado "incorrecto" b) estado "parcialmente correcto" y c) estado "correcto".

Al tabular los resultados de este proceso de evaluación obtenemos los siguientes datos:

**Tabla 1. Resultados de validación en imágenes de prueba.**

| Validación | Cantidad | Porcentaje |
|---|---|---|
| Incorrecto | 88 | 25.58 |
| Parcialmente correcto | 154 | 44.76 |
| Correcto | 102 | 29.65 |

Como podemos apreciar en la Tabla 1 el mayor porcentaje de imágenes fueron validadas como "parcialmente correctas". A su vez, de estas imágenes parcialmente correctas el 50% les faltaba representar una línea de las presentes en la imagen real, específicamente la línea derecha.

Dentro de las líneas validadas como "correctas" el 52% detectaron las líneas presentes sin observaciones, mientras que el 29% presentaban una variación en el ángulo con respecto a sus pares reales.

En cuanto a las imágenes "incorrectas" casi el 7% presentaron una detección de líneas no presentes en la imagen real, mientras que el resto no detectó las líneas en absoluto.

En el Apéndice A se incluyen los resultados a detalle de este análisis de validación.

 ISSN en trámite

## 5. CONCLUCIONES

Dentro de la industria, e incluso en la vida diaria se está presentando un cambio significativo. La injerencia de nuevas tecnologías nos permite potenciar la capacidad de realizar trabajos repetitivos con una eficiencia impresionante o trabajos donde las personas corren un enorme riesgo de salud (Jonasson, 2021). Parte de este progreso se representa en los vehículos autónomos, cuyos sistemas de movimiento y reconocimiento de entorno son cada vez más afinados y precisos.

En este trabajo se exploraron varias formas de detectar un entorno específico de operación para un vehículo autónomo, destacando el desarrollo de un sistema de reconocimiento con base en el procesamiento de imágenes utilizando algoritmos donde se aplican las líneas de Hough. Como se puede observar en los resultados presentados el sistema mantiene un nivel de estabilidad moderado, siendo que presenta casi un 45% de identificación incompleta de su entorno. Así mismo se toma en consideración la efectividad del sistema al detectar líneas eliminando las sombras del entorno y los objetos presentes en el fondo de la imagen, lo que permite una manera muy eficiente de limpiar las imágenes de obstáculos.

Dentro del proyecto presentado caben muchas mejoras, siendo la primera etapa de un trabajo en desarrollo se puede llegar a aplicaciones mas complejas tomando como base este trabajo, como la utilización de las imágenes abstractas en sistemas de identificación más complejos utilizando inteligencia artificial o algún sistema de cálculo aritmético de posición relativa. Así mismo, la inclusión de tecnologías más robustas como cámaras RGB-D mostradas en trabajos de exploración de entorno (Joochim, 2010) o ubicación de objetos específicos en ambientes industriales (Pérez, 2016).

## 6. AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo fue desarrollado gracias al programa de becas nacionales brindado por Conacyt. Se realizó en las instalaciones del Instituto Tecnológico de México campus Chihuahua II, en el programa de Maestría en Sistemas Computacionales con rama en Sistemas Inteligentes.

## REFERENCIAS

Zhao, J., Liang, B., y Chen, Q. (2017). The key technology towards the self-driving car. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*. Emerald Publishing Limited.

Harapanahalli, S., O Mahony, N., Velasco Hernández, G., Campbell, S., Riordan, D., Walsh, J. (2019). Autonomus navigation of mobile robots in factory environment. *Procedia Manufacturing*. Elsevier B.V.

Li, Q., Adriaansen, A., Udding, J. y Pogromsky, A. (2011). Design and control of Automated Guided Vehicle systems: a case study. 18th IFAC World Congress. IFAC. Milán, Italia

Jonnason, E., Ramos Pinto, L. y Vale, A. (2021). Comparison of three key remote sensing technologies for mobile robot localization in nuclear facilities. *Fusion Engineering and Design*. Elsevier B.V.

Joochim, C. y Roth, J. (2010). Mobile robot exploration based on three dimension cameras acquisition. *2nd IFAC Symposium on Telematics Applications*. IFAC. Rumania.

Pérez, L., Rodríguez, I., Rodríguez, N. y Usamentiaga, R. (2016). Robot guidenace using machine visión techniques in industrial environments: a comparative review. *Sensors*. MDPI.

## Apéndice A. RESULTADOS DETALLADOS DE VALIDACIÓN.

Los resultados aquí presentados son correspondientes a las tres capturas realizadas, diferenciando por anotaciones en las imágenes para permitir mejor análisis de comportamiento del algoritmo. Se presentan las tablas con todas las anotaciones para los tres estados establecidos en el documento. Junto a su porcentaje dentro del total de imágenes de este estado.

**Tabla 2. Imágenes "incorrectas".**

| Notas | Cantidad | Porcentaje |
|---|---|---|
| Sin detección | 82 | 93.18 |
| Representación incompleta | 0 | 0 |
| Falta línea derecha | 0 | 0 |
| Falta línea izquierda | 0 | 0 |
| Angulo con varianza entre línea real y abstracta | 0 | 0 |
| Sin notas | 0 | 0 |
| Detección de línea no presente | 6 | 6.82 |
| Detección de 2 bordes | 0 | 0 |
| Total de imágenes | 88 | 100 |

**Tabla 3. Imágenes "Parcialmente correctas".**

| Notas | Cantidad | Porcentaje |
|---|---|---|
| Sin detección | 0 | 0 |
| Representación incompleta | 23 | 14.94 |
| Falta línea derecha | 78 | 50.65 |
| Falta línea izquierda | 45 | 29.22 |
| Ángulo con varianza entre línea real y abstracta | 2 | 1.30 |
| Sin notas | 0 | 0 |
| Detección de línea no presente | 6 | 3.90 |
| Detección de 2 bordes | 0 | 0 |
| Total de imágenes | 154 | 100 |

ISSN en trámite

**Tabla 4. Imágenes "correctas".**

| Notas | Cantidad | Porcentaje |
|---|---|---|
| Sin detección | 1 | 0.98 |
| Representación incompleta | 2 | 1.96 |
| Falta línea derecha | 0 | 0 |
| Falta línea izquierda | 0 | 0 |
| Ángulo con varianza entre línea real y abstracta | 30 | 29.41 |
| Sin notas | 54 | 52.94 |
| Detección de línea no presente | 0 | 0 |
| Detección de 2 bordes | 15 | 14.71 |
| Total de imágenes | 102 | 100 |

 ISSN en trámite

# Aprendizaje Emocional en la Gamificación

*Renata Aguilar Rodríguez, Universidad Autónoma del Estado de México CU Texcoco, (Tel: 5591 063997; e-mail: raguilarr379@alumno.uaemex.mx)
**Rosa María Rodríguez Aguilar, Universidad Autónoma del Estado de México CU Texcoco, (e-mail: rmrodrigueza@uaemex.mx)
*** Irene Juárez Aguilar, Universidad Autónoma del Estado de México CU Texcoco, (e-mail: iaguilarj588@profesor.uaemex.mx)
****Juan de Jesús Amador Reyes, Universidad Autónoma del Estado de México CU Ecatepec, (e-mail: jjamadorr@uaemex.mx)
***** Yedid Erandini Niño Membrillo, Universidad Autónoma del Estado de México CU Texcoco, (e-mail: yeninom@uaemex.mx)

**Resumen:** Jugar videojuegos es una actividad que ha cobrado gran empatía entre los estudiantes de nivel media superior, actividad que realizan para el entretenimiento y otras funciones. En ellos se puede detectar que desarrollan una emoción que afecta de forma positiva a su percepción y desempeño escolar. Con este trabajo se pretende conocer las reacciones emocionales adquiridas al jugar videojuegos y su interés a que se diseñen estos de forma educativa, para lo anterior se aplicó a los estudiantes del Conalep plantel del Sol del Estado de México una prueba para medir la efectividad que tendrían los juegos educativos y para el análisis de la información se hizo uso de una de las herramientas de la inteligencia artificial, construcción de un mapa cognitivo difuso.

*Keywords:* computo afectivo, videojuegos, mapas cognitivos difusos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Como parte de las nuevas tecnologías la gamificación es una atribución nueva a la realidad actual, la hace más atractiva y estimula la práctica de ludificación, actividad que tiene un alto impacto en el desarrollo de conocimientos y habilidades en el ser humano. Los juegos serios también contribuyen con el desarrollo de objetivos como la enseñanza en la ciencia promoviendo así el aprendizaje a través de instrumentos como la observación, prueba de hipótesis y las simulaciones científicas esto con la finalidad de llevar al educando a una secuencia de actividades que le permitan resolver problemas relacionados entre sí y que a su vez mejoran sus habilidades (Guerrero, 2020).

Estas herramientas tecnológicas son utilizadas en diversas áreas, como el ecosistema educativo, donde se diseñan e implementan diversos instrumentos digitales que acompañen al proceso de enseñanza aprendizaje, se puede considerar como uno de los objetivos de la innovación educativa.

Emplear conceptos como el de gamificación hacen del proceso enseñanza aprendizaje una adquisición de experiencias sociales, en donde resalta la característica de enseñar y aprender, genera la formación de valores y sentimientos que hacen del individuo identificarse como un ser social que comprende y desarrolla convicciones y que junto al proceso de cognición logra la formación multitarea del ser humano (Fernández, 2004).

La lógica difusa es una técnica de la inteligencia computacional que permite obtener una conclusión a partir de información con un alto grado de imprecisión, permite definir valores intermedios, la lógica difusa pretende simular la forma en que los seres humanos toman decisiones (D´Negri, 2006).

Al combinar estas ideas dentro de una herramienta digital se obtiene una mezcla de conocimientos y actividades que son manipuladas por los estudiantes; en ellos causan una serie de emociones que contribuyen en su formación educativa: esto se conoce como cómputo afectivo, que es un área de la computación que se encuentra relacionada con el estudio y desarrollo de sistemas que identifican, procesan y estimulan las emociones humanas, con el objetivo de que las máquinas adapten su comportamiento al estado emocional que emita una persona; por medio de su detección, medición y entendimiento del mismo (Picard, 2012).

### 1.1 Problemática y Justificación

En el Estado de México el nivel educativo de media superior ha tenido un incremento considerable en deserción escolar; existen diversas causas que pueden detonar este tipo de eventos (Solís, 2018).

Existen diversas herramientas que apoyan a los estudiantes en sus tareas y aprendizajes, cada una de ellas enfocadas a resolver problemas determinados, se conocen como sistemas de e-

 ISSN en trámite

learning o CAI (Computer Assisted Instruction), sistemas tutoriales inteligentes y los juegos serios, que tienen como objetivo reforzar y ofrecer una forma diferente de adquirir conocimientos (Zatarain, 2018). Por esta razón la gamificación que se ha implementado en algunos niveles educativos bajo el uso de juegos serios, tiene la finalidad de mejorar la práctica en la enseñanza de conocimientos; ayudando a argumentar y razonar (Rodríguez, 2016). En la EMS la escaces de este tipo de herramientas se pueden considerar como uno de los motivos de reprobación y decersión, por lo que se busca conocer las características necesarias para el diseño de sistemas enfocados al aprendizaje, potencializando las emociones positivas dentro de ellos y así disminuir el indice de decersion y reprobación escolar.

La aplicación de esta encuestra basifica la planificación y diseño del producto de gamificación que se encuentra en desarrollo para el subsistema de Conalep, que incluya y trabaje las necesidades de su modelo académico.

## 2. METODOLÓGIA

Como parte de este trabajo, se aplicó un test a los estudiantes de nivel media superior para reconocer sus emociones cuando ellos realizan las actividades al jugar videojuegos, además de su opinión acerca de la implementación de un juego educativo y como esto pudiera ayudarlos a tener un mejor escolar.

### 2.1 Metodología Cuantitativa

Se implementó una prueba acerca de las emociones que tienen los alumnos durante y después de jugar videojuegos, participaron estudiantes de nivel media superior perteneciente al subsistema Conalep del plantel del Sol en la zona Oriente del Estado de México.

Obteniendo un total de 206 respuestas, que forman parte de la población que estudia un bachillerato tecnológico enfocado a las carreas técnicas de: mecatrónica, construcción, soporte y mantenimiento de equipos de cómputo y seguridad e higiene, carreras que se imparten en este plantel.

La investigación es de tipo cuantitativa debido a que se utilizará la implementación de mapas cognitivos difusos, conforme a los pesos asignados que representan las respuestas de los estudiantes.

Los mapas cognitivos difusos son redes causales que se representan por un grafo dirigido difuso, en donde los nodos muestran conceptos, acciones o deseos, los ejes causales determinan las reglas difusas entre ellos y la cantidad de entradas establecen todas las reglas, con la capacidad de modelar causalidades circulares en mundos virtuales realistas (Kosko, 1986).

Estos mapas actúan como sistemas dinámicos no lineales (parecidas a una red neuronales) donde las entradas deben tener asignados estados, para conservar un equilibrio y a su vez efectúe una salida. Por consecuencia en un mapa cognitivo difuso simple las rutas concluyen en un punto fijo o en un ciclo que se encuentra limitado (Conde, 2014).

Al estudiar el aprendizaje, las emociones y las estrategias nuevas e innovadoras, se cumple uno de los propósitos de la inteligencia artificial en la educación, que es incrementar e incluso predecir el rendimiento y satisfacción del uso de estas herramientas digitales embebidas con la inteligencia artificial, para de esta forma identificar y reducir el abandono del alumno en los distintos ciclos y modalidades formativas.

### 2.2 Instrumento de aplicación

La prueba de aplicación está constituida por 14 reactivos en esencia al uso de los videojuegos, destacando cuestiones como: el género del usuario, la concurrencia con la que juega videojuegos a la semana, las horas al día que le dedica al mismo y sobre todo cual es la emoción que experimenta durante y después de realizar la actividad.

El instrumento tenía estas respuestas predefinidas: nada, poco y mucho; contestación que se puede determinar cómo certera o no certera dentro de la lógica difusa.

Instrumento de aplicación:

| Pregunta: | Respuesta 1: | Respuesta 2: | Respuesta 3: | Respuesta 4: | Respuesta 5: | Respuesta 6: |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.¿Cuál es tu género ? | Masculino | Femenino | Otro | - | | |
| 2. ¿Cuál es tu edad? | 14-15 años | 15-17 años | 17-19 años | Otro | | |
| 3.Consideras que te llama más la atención las cosas: | Visuales<br>-Nada<br>-Poco<br>-Mucho | Auditivas<br>-Nada<br>-Poco<br>-Mucho | Prácticas<br>-Nada<br>-Poco<br>-Mucho | | | |
| 4.¿Juegas videojuegos ? | No, me gustan | Poco | 2-3 veces a la semana | 3-4 veces a la semana | Diario | |
| 5.¿Cuántas horas al día juegas videojuegos ? | 1-2 horas | 3-4 horas | 8 horas | +8 horas | 0 horas | |
| 6.Antes jugar un juego nuevo yo: | Leo las intrucciones del juego<br><br>-Nunca<br>- A veces<br>- Siempre | Comienzo a jugar de forma intuitiva<br><br>-Nunca<br>- A veces<br>-Siempre | / | / | / | |
| 7.¿Cómo te sientes cuando juegas videojuegos ? | Emocionad @ | Ansios@ | Frustrad @ | Feliz | Deprim id@ | Relajad@ |
| 8.Actividad que realizas | Escucho música: | Platico con mis | Veo televisión | Otra: | | |

 ISSN en trámite

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| mientras juegas: | -Nunca<br>-A veces<br>-Siempre | amig@s:<br>-Nunca<br>-A veces<br>-Siempre | :<br>-Nunca<br>-A veces<br>-Siempre | -Nunca<br>-A veces<br>-Siempre | | |
| 9.¿Cuándo juegas videojuegos lo haces para? | Distraerte | Divertirme | Evitar tareas del hogar | Pasatiempo | Deporte | / |
| 10.¿Cuál es tu estrategia para acreditar los niveles, misiones o ganar las partidas mientras juegas videojuegos? | Aprendo los trucos de memoria | Escribo los trucos en una libreta | Guardo los avances en la memory card | Aprendo mediante prueba y error | Lo dejo a la suerte | / |
| 11.Considero que jugar videojuegos me ayuda a: | Tener más creatividad / imaginación<br>-Nada<br>-Poco<br>-Mucho | Adquirir confianza<br>-Nada<br>-Poco<br>-Mucho | Alcanzar metas/ personales o escolares<br>-Nada<br>-Poco<br>-Mucho | Confrontar retos personales<br>-Nada<br>-Poco<br>-Mucho | / | / |
| 12.Después de jugar como te sientes: | Motivad@ | Ansios@ | Nervios@ | Angustiad@ | Feliz | |
| 13.¿Piensas que jugar videojuegos te ayuda para?: | Entender los temas escolares<br>-Nada<br>-A veces<br>-Siempre | Pensar más<br>-Nada<br>-A veces<br>-Siempre | Resolver tareas<br>-Nada<br>-A veces<br>-Siempre | Solo distraerme<br>-Nada<br>-A veces<br>-Siempre | / | / |
| 14.Si existiera un videojuego con temas educativos te gustaría que sirviera o fuera para: | Entender mejor la materia:<br>-Nada<br>-Poco<br>-Mucho | Juntar puntos para acreditar la materia:<br>-Nada<br>-Poco<br>-Mucho | Solo por curiosidad<br>--Nada<br>-Poco<br>-Mucho | Otro | / | / |

**Tabla 1:** Instrumento de Evaluación, Creación propia.

La prueba como lo muestra la tabla 1 fue aplicada a 206 estudiantes de EMS, quienes contestaron todas las preguntas del instrumento, estas respuestas aportan como base el diseño y desarrollo de productos de gamificación enfocados a este subsistema educativo como el que está en producción.

En general todos los reactivos se marcaron como obligatorios dentro del formulario para obtener una respuesta, de ahí generar una mezcla que permita la obtención de los mapas cognitivos difusos que en su observación relacione los ítems de la prueba con la finalidad de evaluar la reacción emocional de los estudiantes ante una actividad lúdica que es el juego enfocado al uso de los videojuegos y como este puede llegar a estimular su aprendizaje.

Este instrumento es creación propia, a lo cual se han validado las preguntas mediante la técnica del Alpha de Cronbach la cual permite calcular la fiabilidad de cuestionarios o escalar por medio del uso del SPSS y el coeficiente de Alpha Cronbach. (Rodríguez, 2013).

El coeficiente de alpha Conbach es una formula para estimar la fiabilidad de un instrumento en donde las preguntas tienen más de dos valores.

$$\frac{\alpha = k(1- \sum S^2_i / S^2_t)}{k-1}$$

**Ilustración 1:** Fórmula general del coeficiente del Alpha Cronbach, Imagen creación propia.

La ilustración 1 muestra la estructura de la formula general donde k es el número de ítems del instrumento $S^2_i$ la variande de las puntuaciones en el ítem i, y $S^2_t$ la varianza de las puntuaciones totales del cuestionario o test.

Al realizar la prueba de confiabilidad del test se obtuvieron los sigueintes resultados:

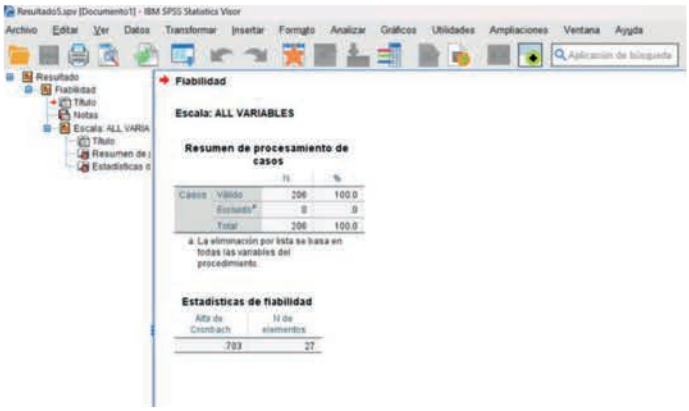



**Ilustración 2:** Prueba de Fiabilidad de la prueba de aplicación en el software de IBM SSP, Creación propia.

El resultado del calculo de fiabilidad como lo muestra la ilustración 2; en donde se evaluaron 206 respuestas que reflejan el 100% de nuestra prueba, y la respuesta de nuestra Alfa de Cronbach se obtuvo .703, resultado que refiere en la escala del Alfa Cronbach que va desde (.70 – 90) como una prueba de fiabilidad aceptable como lo describe (Rodríguez, 2013).

## 2.4 Determinación de los Factores Críticos de Éxito

La causalidad es un término que se encuentra relacionado con la representación de sistemas en la realidad, es una forma que se utiliza para explicar la organización de los eventos del

 ISSN en trámite

mundo real, son alternativas donde se evalúan posibles hechos causados por una alternativa (Vargas, 2005).Un mapa cognitivo difuso tiene una causalidad del intervalo que va del {0,1} y existen tres posibles tipos de relaciones causales (Vázquez, 2012).

$W_{ij} > 0$ Causalidad positiva entre los conceptos de estudio $C_i$ y $C_j$ que determina un incremento o disminución en $C_i$ y esto genera lo contrario en $C_j$.

$W_{ij} < 0$ Causalidad negativa entre los conceptos $C_i$ y $C_j$ el incremento disminución de $C_i$ lleva a la disminusión (incremento) de $C_j$.

Wij = 0, indica la no existencia de relación entre Ci y Cj.

Conociendo las causalidades que existen como resultados, el mapa cognitivo difuso se representa mediante un digrafo en donde los nodos representan conceptos y los arcos indican la relación causal. La intensidad de la relación causal se representa mediante valores difusos (Peña, 2007).

Los valores de los conceptos se calculan en cada paso de la simulación, donde el valor inicial del mapa cognitivo difuso converge un punto fijo, con un ciclo limitado o caótico; los conceptos interconectados se calculan mediante función de transición, determinada por la función matemática sigmoidal:

$$A_i^{(k+1)} = f(\sum_{i=1, \neq j}^{n} A_i^{(K)} * W_{ij})$$

Para esto los mapas cognitivos difusos pueden ser representados mediante una matriz de adyacencia que se obtiene mediante los valores asignados a cada uno de los arcos.

La matriz de adyacencia se forma mediante la siguiente fórmula (Kosko, 1986)

$$E = {}_{1/k} (E_1 + E_2 + \ldots + E_K)$$

## 3. RESULTADOS

Conforme al test aplicado los datos se dividieron de acuerdo a su importancia para este estudio, se desarrollo la tabla de factores críticos de éxito de aprendizaje y emociones con la finalidad de observar a los datos con mayor positivismo y calificación más alta.

La funcionalidad de la tabla de factores críticos es reunir las respuestas positivas y agruparlas, para determinar la cantidad de valores que intervienen en nuestra prueba, los factores de los que dependen los valores y por ultimo la cantidad específica que recibe cada valor. Con estos datos se obtiene la matriz de adyacencia en donde se extraen los datos necesarios para la elaboración de nuestro mapa cognitivo difuso.

| Valor | Factor | Descripción |
|---|---|---|
| N1 | NA,P,M | Consideras que te llama más la atención las cosas: visuales, auditivas o prácticas |
| N2 | N,A,S | Antes jugar un juego nuevo yo: leo las instrucciones o juego intuitivamente |
| N3 | E,A,F,FF,D,R | ¿Cómo te sientes cuando juegas videojuegos? |
| N4 | M,P,TV,O | Que otra actividad realizas mientras juegas: escuchar música, platicar con amigos, ver televisión, otra. |
| N5 | D,DD,E,P,DE | ¿Cuándo juegas videojuegos lo haces para? |
| N6 | A,E,G,PE,S | ¿Cuál es tu estrategia para acreditar los niveles, misiones o ganar las partidas mientras juegas videojuegos? |
| N7 | CR,CO,M,R | Consideras que jugar videojuegos te ayuda a: |
| N8 | M,A,N,AN,F | Después de jugar como te sientes: |
| N9 | E, P, R, D | ¿Piensas que jugar videojuegos te ayuda para?: |
| N10 | EM, JP, SC, O | Si existiera un videojuego con temas educativos te gustaría que sirviera o fuera para: |

**Tabla 2:** Factores críticos de éxito de aprendizaje y emociones. Fuente: Creación propria.

Conforme a los factores de participación se crea la matriz de adyacencia, el contenido de la tabla 2, es información propia de la prueba con la finalidad de estructurar la matriz de adyacencia y generar el mapa cognitivo difuso.

Esta matriz de adyacencia representa a los nodos que conforman la estructura del mapa cognitivo difuso, la línea diagonal que se marca en la intersección de los nodos es la respuesta positiva que obtuvo en cada pregunta.

 ISSN en trámite

| Valor | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 | N7 | N8 | N9 | N10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N1 | 130 | 75 | 51 | 46 | 5 | 1 | 15 | 54 | 5 | 13 |
| N2 | 124 | 89 | 109 | 17 | 10 | 5 | 21 | 13 | 17 | 10 |
| N3 | - | 65 | 72 | 5 | 13 | 5 | 37 | 79 | 31 | 23 |
| N4 | - | 58 | 35 | 130 | 13 | 10 | 46 | 32 | 21 | 85 |
| N5 | - | 68 | 32 | 13 | 99 | 16 | 96 | 16 | 42 | 16 |
| N6 | - | 80 | 56 | 62 | 51 | 87 | 18 | 65 | 97 | 40 |
| N7 | - | 66 | 116 | 65 | 109 | 62 | 80 | 30 | 63 | 51 |
| N8 | - | 68 | 106 | 102 | 96 | 86 | 100 | 124 | 31 | 111 |
| N9 | - | 103 | 105 | 85 | 103 | 59 | 31 | 18 | 105 | 31 |
| N10 | - | 17 | 46 | 50 | 85 | 39 | 0 | 0 | 31 | 124 |

**Table 3**: Matriz de adyacencia. Creación propia.

La tabla 3 corresponde a la matriz de adyacencia., los factores pueden intervenir como positivos y negativos de acuerdo a su implementación, las respuestas que se encuentran cerca de las principales actoras se consideran como causalidades positivas y las que tienen mayor distancia como negativas

Los mapas cognitivos difusos tienen la finalidad de mostrar aquellas causalidades que intervienen en los hechos de la realidad, haciendo énfasis en las respuestas positivas y aquellas que lo parecen con el propósito de tener una reacción más idónea a un signo positivo, que intervenga como la parte que da equilibrio a los nodos aquellos estados que determinan las decisiones y resultados del mapa cognitivo difuso.

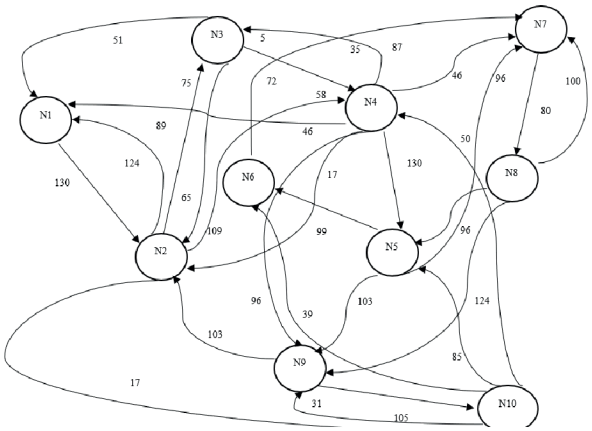



**Ilustración 3**: Mapa Cognitivo Difuso de aprendizaje y emociones. Creación propia.

La ilustración 3 muestra el mapa cognitivo difuso creado, donde se establece el uso de las reglas; el mapa contiene estados, que están establecidos por pesos, se conectan por medio de las respuestas entre cada pregunta y la similitud que tienen entre ellas, cada una tiene una transición de inicio y fin, lo cual determina que cada hecho genera reacción y que, así como lo genera lo termina para dar inicio a otra.

## CONCLUSIONES

La prueba aplicada a los estudiantes de educación media superior del Conalep plantel del Sol da a conocer que los usuarios están fuertemente asociados al uso de videojuegos, de 206 alumnos encuestados 75% de ellos practican con alto impacto esta actividad de entretenimiento la cual ha incrementado su práctica a través de los años.

El 55% se sienten felices realizando esta actividad, el 35% restante encuentran el jugar videojuegos como una actividad relajante, la cual los ayuda a prestar mayor atención para realizar actividades y por último el 15% que falta toman la actividad como emocionante.

Para la solución de los videojuegos los estudiantes del plantel Conalep del Sol el 55% aprende las estrategias para acreditar los niveles de los videojuegos, 40% experimenta a través de la prueba y error, 5% y el cree en la suerte para obtener la acreditación de los niveles.

Por último 65% del total de estudiantes eligen que un videojeugo educativo les ayudaría a entender mejor las materias, 15% eligen llegar a utilizarlo para acumular puntos y así poder acreditar la materia y solo el 20% harían uso del juego educativo por curiosidad.

Estos estudiantes dedican tiempo significativo a jugar videojuegos, canalizando la acción en su mayoría para distraerse, pensar más, despejar su mente y tener la capacidad de enfocarse más a sus actividades académicas; Relacionan las acciones positivas que obtienen al momento de jugar videojuegos transformándola en una aptitud efectiva para su vida diaria, tal como tener confianza en su persona, incrementar su creatividad, tener una mayor seguridad hasta enfrentar retos personales.

La mayoría tiene y obtiene una sensación de felicidad cuando realizan la actividad, algunos otros la toman como una tarea que trae un estado de paz y relajación; implementan parte de su receptividad para aprender trucos de memoria y acreditar los niveles o en algunas ocasiones trabajan mediante el ensayo de prueba y error.

Algunos alumnos responden que sería grato utilizar un software que les permita jugar, tener un puntaje repasar un tema académico y acreditar la materia al mismo tiempo. Con lo anterior se observa que los estudiantes de media superior están

 ISSN en trámite

abiertos a utilizar herramientas nuevas que les ayude a mejorar sus notas académicas y que sobre todo les estimule en la adquisición de conocimientos, al mismo tiempo llenarse de emociones positivas y beneficiarias para ellos.

BIBLIOGRAFÍA

C. A. Guerrero Alarcón, L. E. G. L. K. D. C. C., 2020. Los videojuegos como estrategia para incrementar la motivación y alcance de logros en procesos de aprendizaje. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2020,* pp. 1-9.

Carlos Eduardo D´Negri, E. L. D. V., 2006. Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa. *Revista Americana de Medicina Respiratoria,* 6(3), pp. 126-136.

Diego Vergara Rodríguez, J. M., 2016. Diseño de juegos serios para reforzar conocimientos: Una experiencia educativa en secundaria.. *Profesorado: Revista de currículum y formación de profesorado,* pp. 239-254.

Fatima Fernández, G. G., 2004. Componentes del Proceso enseñanza aprendizaje.. *Temas de Introducción a la formación Pedagógica. Pueblo y Educación.,* Issue 10, p. pág. 355.

J.C. Conde Ramrez, A. S.-L., 2014. Evocación de hábitos en personajes virtuales mediante Mapas Cognitivos Difusos y técnicas de videojuegos.. *Research in Computing Science ,* Issue 73, p. 73–87.

Kosko, B., 1986. Fuzzy cognitive maps.. *International Journal of Man-Machine Studies,* Issue (24), p. 65–75.

Kosko, B., 1986. Fuzzy cognitive maps.. *International Journal of Man Machine Studies,* 1(24), pp. 65-75.

Leyva Vázquez, M. Y., 2012. Modelado y análisis de los Factores Críticos de Éxito de los proyectos de software mediante Mapas Cognitivos Difusos. *Ciencias de la Información,* 43(2), pp. 41-46.

Peña, A. S. H. &. G. A., 2007. Mapas Cognitivos: un Perfil y su Aplicación al Modelado del Estudiante.. *Centro de Investigación en computación,* Volumen 10, pp. 230-250.

Picard, R. W., 2012. Toward Machines With Emotional Intelligence. *Sci. Emot. Intell. Knowns Unknowns, ,* p. 1–22.

Rodríguez, J., 2013. Calcular la fiabilidad de un cuestionario o escala mediante el SPSS: el coeficiente alfa de Cronbach. *REIRE: Revista de Innovación y recreación en Educación,* -(-), pp. 1-13.

Solís, P., 2018. La transición de la secundaria a la educación media superior en México: el difícil camino a la cobertura universal.. *Perfiles Educativos.,* pp. 1-24.

Vargas, J. B. C., 2005. Aplicación de Mapas Cognitivos difusos dinámicos a tareas de supervisión y control. *Universidad de los Andes Mérida Venezuela.*

Zatarain, R., 2018. Reconocimiento afectivo y gamificación aplicados al aprendizaje de Lógica algorítmica y programación. *Revista Electrónica de Investigación Educativa.,* 20((3)), pp. 115-125.

 ISSN en trámite

# Arquitectura de software para utilizar realidad aumentada con control gestual de manos en apoyo al aprendizaje de la lectoescritura

**Raúl de Jesús Sanchez Martínez, María Antonieta Abud Figueroa, Ulises Juárez Martínez, Hilarión Muñoz Contreras, Lisbeth Rodríguez Mazahua.**

*Tecnológico Nacional de México*
*Instituto Tecnológico de Orizaba*
*División de Estudios de Posgrado e Investigación*
*Orizaba, Ver.*
*{M15011248, maria.af, ulises.jm, hilarion.mc, lisbeth.rm2}@orizaba.tecnm.mx*

**Resumen:** La lectoescritura es la capacidad para leer y escribir adecuadamente, también está íntimamente relacionada a la comprensión lectora al facultar a una persona para interpretar el lenguaje a partir de un texto. En la prueba PISA 2018 México se localizó en el nivel 2 de comprensión lectora, encontrándose por debajo del promedio de los países que conforman la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). En la actualidad y con el constante avance de la tecnología, distintos proyectos desarrollaron soluciones satisfactorias a problemáticas de aprendizaje relacionadas al área de las matemáticas y la medicina utilizando realidad aumentada e interfaces humano-máquina para controlar sus modelos generados. Por tanto, en el presente proyecto se propone una arquitectura para el desarrollo de una aplicación para el apoyo al aprendizaje de la lectoescritura. Dicha aplicación utilizará realidad aumentada por medio del despliegue de modelos tridimensionales renderizados a través de un dispositivo con cámara para su despliegue a través de una pantalla en la realidad objetiva y a su vez, el usuario manipulará estos objetos a través de una interfaz humano-máquina enfocada en identificar movimientos de las manos como instrucciones. El principal beneficio de la aplicación a desarrollar será la creación de una herramienta de fácil uso como auxilio a los profesores o maestros para una enseñanza interactiva.

*Palabras clave: Visión Artificial, Interacción Humano-Máquina, Realidad Aumentada, Control Gestual de Manos, Lectoescritura.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La prueba PISA (*Programme for International Student Assessment*, Programa Internacional para la Evaluación de Estudiantes) 2018 reveló que, entre los miembros de la OCDE, México ocupa un lugar bajo en los resultados promedio en cuanto a comprensión lectora se refiere. En estudios abordados en este documento se concluyó que la capacidad de una persona para comprender textos complejos facilita el acceso a estructuras complejas de pensamiento, ergo, la capacidad para leer y escribir es un termómetro fiable de la inteligencia de una persona. Por tanto, un promedio bajo en la comprensión lectora de una sociedad es indicativo de la decadencia de su capacidad para la resolución de problemas colectivos.

Por otro lado, las tecnologías de realidad aumentada han avanzado a pasos agigantados los últimos 10 años, a partir de su implementación en entornos de desarrollo de videojuegos. La capacidad para desplegar una imagen virtual sobre el mundo real abrió amplias posibilidades sobre todo en cuanto al aprendizaje se refiere, facilitando la creación de escenarios del mundo real en entornos virtuales, con consecuencias inexistentes, por eso, su implementación en sectores de la industria y la educación no se hizo esperar.

A su vez, se crearon medios para interactuar directamente con estos escenarios, para facilitar su análisis por medio de interfaces que permiten la comunicación entre los operadores humanos y el entorno virtual, generalmente a través de la captura de movimiento.

Por lo anteriormente mencionado, en el presente proyecto se propone una arquitectura para un *software* que utilizando realidad aumentada controlada por medio de una interfaz humano-máquina, facilite el aprendizaje de la lectoescritura, como apoyo al desarrollo de dicha habilidad.

En la sección 2 de este artículo se exploran los trabajos relacionados con esta propuesta. En la sección 3 se expone la arquitectura propuesta para el desarrollo del *software*, seguido de las conclusiones de este artículo y los agradecimientos pertinentes.

 ISSN en trámite

## 2. TRABAJOS RELACIONADOS

A continuación, se describen los trabajos relacionados con este proyecto, mientras en la Tabla 1 se comparan considerando los siguientes criterios: 1) El motor de despliegue de modelos tridimensionales; 2) La biblioteca SDK (*Software Development Kit*) de rastreo de puntos utilizada, y 3) La interfaz humano-máquina utilizada para la manipulación de los modelos 3D.

La geometría es un área sumamente importante de las matemáticas, y como tal, muchos estudiantes califican sus experiencias en el aprendizaje de dicha área como poco placenteras y difíciles. En el primer trabajo analizado (Le y Kim, 2017) los autores propusieron un marco de trabajo para el aprendizaje del área matemática de la geometría usando un software de realidad aumentada e interfaces humano-máquina de reconocimiento de gestos manuales. En el desarrollo de su investigación se utilizó fundamentalmente el dispositivo Leap Motion para el reconocimiento de los gestos, pues su SDK incluye una serie de funciones que permite el reconocimiento de los movimientos de la mano. Se utilizaron las bibliotecas de ARToolkit para el reconocimiento de los marcadores de posición de los modelos de figuras geométricas, así como para la captura de video a través de una cámara y la renderización de los modelos anteriormente mencionados en el video capturado.

En el segundo trabajo analizado (Schutera *et al.*, 2021) se discutió la importancia de la ubicación espacial para la comprensión de conceptos matemáticos complejos y se desarrolló una aplicación Android basada en realidad aumentada para la enseñanza de geometría vectorial llamada cleARmaths. Para su desarrollo se utilizó la plataforma de desarrollo de videojuegos Unity que permite la captura de imagen y la renderización en tiempo real, gracias al cual se estructuró un código de comportamiento en clases que heredan de la superclase Monobehaviour, que permite la creación de componentes con la propiedad de Objetos de Juego. Para el respectivo rastreo de los marcadores de imagen se utilizó el SDK Vuforia.

En el trabajo de (Karambakhsh *et al.*, 2019) se desarrolló una red neuronal convolucional que reconoce las expresiones humanas como instrucciones, para el aprendizaje de anatomía. Se propuso un proceso de entrenamiento de la aplicación haciendo uso de computación en la nube para su interacción con distintos dispositivos, facilitando el proceso de desarrollo. Para el desarrollo del proyecto se utilizó la cámara de profundidad RealSense, que con sus funciones de proyector de laser infrarrojo permite detectar la forma de los objetos escaneados para crear un modelo 3D con el método de representación de superficies basado en puntos clave. Mientras que para mostrar los modelos de la red neuronal se utilizó la biblioteca de Python Tensorflow, que permitió la conexión con el dispositivo HoloLens, que cuenta con la tecnología para rastrear los movimientos de las manos a través de su cámara integrada y su pantalla interactiva permite desplegar la red neuronal sobre la imagen real de fondo.

En el trabajo de (Sun, 2019) se presentó una herramienta para el control de dispositivos IoT (Internet of Things, Internet de las Cosas) a través de gestos de las manos, usando RA (Realidad Aumentada), cuyo nombre es MagicHand. En esta herramienta propuesta se creó un prototipo de programa, facilitando la interacción a través del sonido y sistema de iluminación. Para la interpretación de los movimientos manuales del usuario se implementó una red neuronal artificial. MagicHand también fue equipado con una cámara detectora de objetos que es capaz de evaluar códigos QR para la creación de objetos virtuales, además de identificar figuras geométricas para el análisis de sus formas.

En la aplicación de Telemedicina (prestación de servicios médicos a distancia), el funcionamiento correcto de dispositivos médicos es elemental, así como la correcta interacción entre el médico y el paciente. En el trabajo de (Bifulco *et al.*, 2014) se expuso el uso de RA en la creación de una aplicación de telemedicina para el entrenamiento de usuarios sin experiencia al realizar estudios de electrocardiograma. Se colocaron puntos de control a un maniquí que, conectados al dispositivo, permiten el reconocimiento espacial por medio de una cámara. Además de contar con cajas de texto e indicaciones audibles para auxiliar al usuario para realizar la secuencia de la prueba. También se agregaron comandos de voz para que el usuario mejore la operatividad del sistema. Al probarse la aplicación en 10 voluntarios sin experiencia previa, quedó demostrado que el uso de la RA favoreció ampliamente el aprendizaje de los mismos, pues se realizó un proceso de prueba en la aplicación y uno posterior con pacientes reales, en el cual el margen de diferencia en la colocación de los electrocardiogramas fue de 4 milímetros.

El objetivo del trabajo de (Putra and Putra, 2021) fue el desarrollo de una aplicación de RA con captura de movimiento para el entrenamiento en la creación de Canang Sari (ofrenda hindú). Dicha aplicación ofrece información acerca de distintos tipos de canang e imágenes de ejemplo. Para su desarrollo se utilizó el SDK de Vuforia, que combina la realidad objetiva y el objeto virtual a través del uso de teléfonos inteligentes y la lectura de códigos QR. Las imágenes de ejemplo se diseñaron a través de Adobe Illustrator e implementaron RA a través de Unity. Se usaron marcadores multi-objetivo, para el desarrollo e identificación de diferentes tipos de Canang. Para su desarrollo se utilizó la metodología en cascada.

En Indonesia, la Educación del Carácter es una materia del sistema educativo enfocada en el aprendizaje de la ética, valores morales y la educación cívica. En el trabajo de (Sarosa *et al.*, 2019) se tomó en cuenta que las generaciones más jóvenes de Indonesia han crecido expuestos a Tecnologías de Información y Comunicación, y por tanto la implementación de las mismas a través de la RA beneficiaría ampliamente el aprendizaje de la materia anteriormente mencionada. Se desarrolló una aplicación que haciendo uso de RA estimule a los estudiantes de la materia educación del carácter haciendo

 ISSN en trámite

uso de estímulos audio-visuales. Para el desarrollo del programa se realizó revisión de la literatura existente en el momento, que culminó en la utilización de las herramientas Unity y Vuforia como plataformas para el proyecto. Como resultado se obtuvo una aplicación Android con la capacidad de capturar marcadores de movimiento.

Aquellos que estudian el idioma inglés suelen pasarse por alto la importancia de comprender la fonética en el proceso de aprendizaje. La falta de comprensión del sonido de la lengua provoca errores de pronunciación que afectan la comunicación, tanto oral como escrita. Por eso, en el trabajo de (Nugraha *et al.*, 2019) se describió un modelo de enseñanza basado en RA para facilitar el proceso de aprendizaje de la fonética en el idioma inglés. Para el desarrollo del modelo se utilizó la aplicación Aurasma que recientemente cambio su nombre a HP Reveal. Se utilizaron marcadores de imágenes de uso libre descargadas de internet en contraste con todos los proyectos mencionados anteriormente que optaron en su mayoría por generación a través de códigos QR, que se editaron en forma de tarjetas relámpago. Al mostrarlas en la pantalla del dispositivo móvil, se muestra un modelo 3D de la imagen en la tarjeta, las palabras, así como una grabación de la pronunciación correcta.

En la provincia de Aceh al norte de Indonesia la falta de conocimiento sobre los objetos tradicionales de la región, así como de su arquitectura, por el público general permiten la disminución de los valores culturales de la zona. Uno de los tantos esfuerzos realizados para mejorar la percepción de los acehnenses sobre su propia cultura se describió en el trabajo de (Mursyidah, Indrawati and Ramadhona, 2019), con la realización de una aplicación de RA para la visualización de construcciones y objetos Acehnos tradicionales en animación 3D. El método usado es de rastreo de marcadores, mientras que el software usado es Vuforia, Blender 3D y Unity. Para el rastreo de marcadores se utilizó la biblioteca de ARToolkit para poder generar un modelo virtual que sea desplegable en el mundo real por medio de la identificación de coordenadas en relación a su distancia con la cámara.

El uso de la tecnología en el aprendizaje del idioma inglés como segundo idioma, tomando en cuenta las habilidades de la escritura, se explora ampliamente. En el trabajo de (Lin, Liu and Chen, 2020) se diseñó una aplicación de realidad aumentada para la escritura ubicua consciente del contexto, enfocada en incrementar la motivación y la memoria a largo plazo. Se compararon las escrituras obtenidas y las percepciones de los estudiantes a través de la aplicación contra las obtenidas a través del método clásico de clases. Los dos estilos tuvieron diferencias en la percepción de los estudiantes, demostrando que la aplicación desarrollada favoreció la memoria a largo plazo, la motivación y la percepción de mejoría en el proceso de la escritura. Se determinó que la herramienta desarrollada debía incorporarse en cursos a distancia de aprendizaje del idioma inglés para favorecer los resultados del aprendizaje. Para el desarrollo de la aplicación utilizaron el software Unity.

La RA permite a los usuarios interactuar con objetos virtuales con un objeto real pues tiene la capacidad de mezclarlos en un entorno intermedio. En el trabajo de (SyafiqahSafiee and Wanis Ismail, 2018) se propuso la creación de un entorno virtual en el que objetos sean manipulados por gestos de la mano en RA. Para ello se realizó un estudio de los trabajos disponibles enfocados en la manipulación a través de gestos manuales, luego se utilizó Leap Motion para capturar las expresiones manuales del usuario que permitieron la manipulación de los objetos en la aplicación de RA desarrollada. La fase de evaluación se condujo tomando en cuenta la percepción del usuario, gracias a lo cual se determinó que logra su propósito de producir experiencias satisfactorias en la manipulación de modelos 3D a través de la manipulación gestual a través del uso de Leap Motion.

Numerosos estudios sitúan a la RA en el contexto de la educación y muy pocos de estos demostraron su impacto en cuanto al aprendizaje de la escritura se refiere, en el trabajo de (Allagui, 2021) se evaluó el uso de RA en un contexto universitario comparando la calidad de la escritura en distintos grupos estudiantiles, según su habilidad. Antes del experimento se expuso a un grupo de 32 estudiantes a una actividad de escritura sin realidad aumentada, mientras otro grupo tuvo la asignación de la prueba haciendo uso de una herramienta de RA. Después se realizaron entrevistas individuales con un grupo de 5 estudiantes para determinar su actitud con la actividad realizada en RA. Después de revisar las pruebas se determinó que las calificaciones obtenidas por los estudiantes con promedio más bajo obtuvieron puntaje similar a los estudiantes con mayor promedio, lo cual indica que la RA favorece el desempeño de las personas en cuanto al desempeño al escribir.

En el trabajo de (Yamada and Chandrasiri, 2018) se desarrolló un sistema que permite la comunicación entre dos trabajadores a través de gestos manuales. Este sistema usa realidad aumentada para desplegar frente a los ojos de un trabajador la mano de su auxiliar, permitiendo que el primero observe los gestos del último para recibir instrucciones del mismo. Para determinar la utilidad de este sistema se realizaron pruebas comparativas en situaciones de trabajo remoto. Para el despliegue del sistema utilizaron las interfaces HoloLens y Leap Motion.

A continuación, en la Tabla 1 se realiza un análisis comparativo de las tecnologías utilizadas en los siete artículos más importantes relacionados con la arquitectura propuesta en este documento.

 ISSN en trámite

**Tabla 1. Análisis comparativo de los trabajos relacionados**

| Artículo | A | B | C |
|---|---|---|---|
| (Le and Kim, 2017) | Unity3D | ARToolKit | Leap Motion |
| (Schutera *et al.*, 2021) | Unity3D | Vuforia | N/A |
| (Karambakhsh *et al.*, 2019) | HoloLens | Biblioteca de Python TensorFlow | HoloLens |
| (Sun, 2019) | HoloLens | Red Neuronal Convolucional | HoloLens |
| (Bifulco *et al.*, 2014) | Unity3D | Vuforia | N/A |
| (Putra and Putra, 2021) | Unity3D | Vuforia | N/A |
| (Sarosa *et al.*, 2019) | Unity3D | Vuforia | N/A |
| **A) Motor de despliegue de modelos 3D**<br>**B) Biblioteca SDK**<br>**C) Interfaz humano-máquina** | | | |

Al observar la tabla, se expone que la interfaz humano-máquina más utilizada es HoloLens, debido a la facilidad con la que los modelos tridimensionales pueden ser desplegados de forma directa en su pantalla y manipulados de forma sencilla y rápida, sin embargo el motor de despliegue más utilizado es Unity3D debido a su potencia de renderización y que permite directamente programar el comportamiento de los modelos a desplegar, siendo a su vez compatible con la mayoría de las interfaces humano-máquina enfocadas en gestos manuales. También se hace notar el extensivo uso del SDK Vuforia y su acoplamiento continuo con Unity3D.

## 3. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

A continuación, en la Figura 1, se muestra el esquema de la arquitectura propuesta.

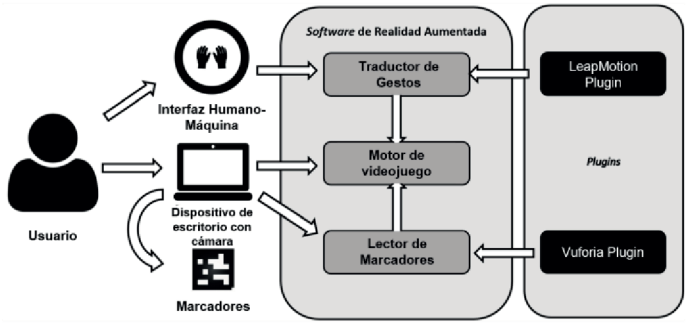



Fig. 1. Esquema de solución

La arquitectura se basa en un análisis de las tecnologías utilizadas en los proyectos analizados en la sección anterior. En esta propuesta se explora el uso de una interfaz humano-máquina que permita la interpretación de los movimientos de la mano del usuario por medio de un traductor integrado en la arquitectura del *software* propuesto. Se propone que el *software* cuente con tres módulos: el Traductor de Gestos Manuales, El motor de Juego y la Biblioteca SDK. El Traductor de Gestos traduce en tiempo real los movimientos de las manos del usuario enviándolos al Motor de Juego, que se encarga de obtener los modelos tridimensionales a partir de la Biblioteca SDK, que contiene bibliotecas para el rastreo e interpretación de marcadores y tiene acceso a una nube que guarda los modelos tridimensionales a desplegar.

En primera instancia, debido a su amplia capacidad de integración con diferentes herramientas de control, tanto por su facilidad de despliegue en diferentes plataformas, el motor de desarrollo de videojuegos sugerido es Unity 3D, pues cuenta con *plugins* que en trabajos anteriores se mostraron de utilidad para la integración con distintas interfaces humano-máquina. Unity 3D es una herramienta que permite la implementación de código para la descripción de su comportamiento, siendo el lenguaje permitido C#. Entre las interfaces más utilizadas para la manipulación de objetos en realidad aumentada se encuentra Leap Motion, que se propone a su vez para esta arquitectura debido a su compatibilidad con la herramienta Unity 3D y su bajo costo en comparación con otras opciones previamente exploradas en el estado del arte.

El SDK que se plantea para esta arquitectura es Vuforia, que se usó extensivamente en proyectos relacionados a este pues tiene una amplia compatibilidad con diversos motores de desarrollo, entre ellos Unity 3D, que, a su vez, tiene un *plugin* específico de integración con Vuforia. Se expone Visual Studio Code como IDE por su compatibilidad con el lenguaje C#, ya que ambos fueron desarrollados por Microsoft®. La metodología de desarrollo recomendada es Scrum, pues sus características se adaptan a la naturaleza del desarrollo de un proyecto de *software* con la arquitectura planteada en este documento.

En la Figura 2 se muestra un esquema de la disposición física del *hardware* necesario para la correcta implementación de la arquitectura propuesta, que incluye una computadora de escritorio o laptop, una cámara *Web*, los marcadores para lectura y la cámara de *Leap Motion*.

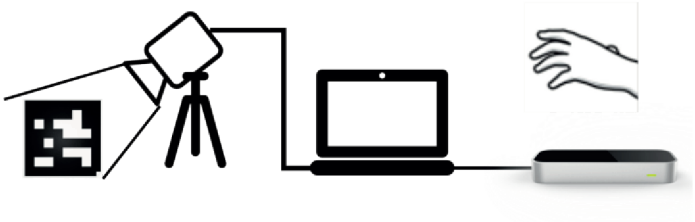


Fig. 2. Disposición física del *hardware*

En la Figura 3 se muestra un esquema del menú principal de la aplicación que tiene la característica de contar con tres apartados: uno para escuchar las palabras, otro para leerlas y un último para manipularlas y componer palabras. En la Figura 4 se muestra otro esquema relativo a la aplicación funcionando.

 ISSN en trámite

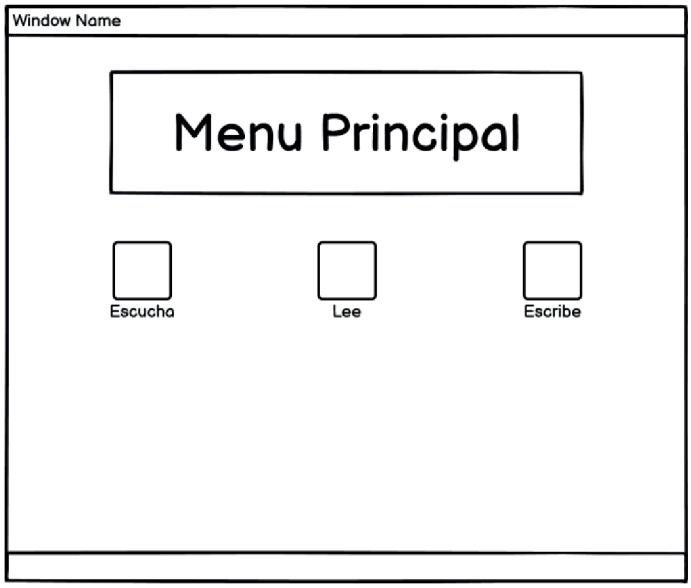



Fig. 3. Menú principal

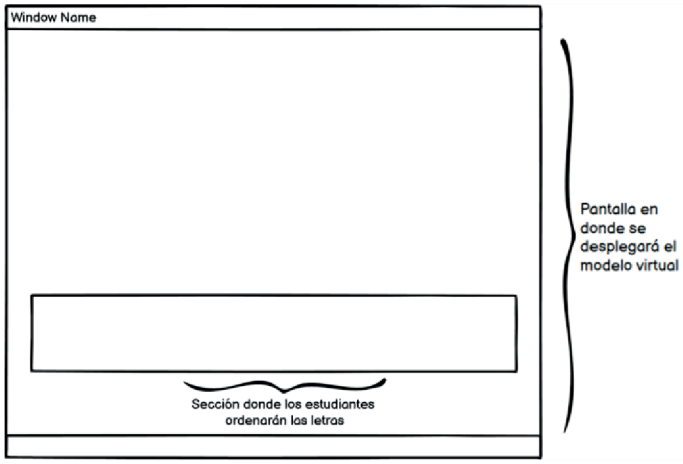



Fig. 4. Aplicación funcionando

En la Tabla 2 se realiza un análisis comparativo contrastando la arquitectura propuesta en este articulo con relación a los siete artículos más importantes analizados en la sección 2. Se observa que la arquitectura propuesta guarda relación con la mayoría de trabajos relacionados en el uso de Unity3D y Vuforia, al contar ambos con versiones de libre uso y *plugins* específicos para la integración de Vuforia en Unity3D, aunque por otro lado estos proyectos hicieron uso de HoloLens o no utilizaron ninguna interfaz humano-máquina en su mayoría. Al ser LeapMotion una interfaz de uso común en ambientes de realidad virtual y de un costo reducido en comparación con HoloLens, se propone el uso de este dispositivo para la manipulación de los objetos virtuales, facilitando de este modo la implementación de la arquitectura propuesta a un costo menor al de otros proyectos similares, explorados en la sección 2 de este artículo, que utilizan interfaces humano-máquina.

**Tabla 2. Análisis comparativo de los trabajos relacionados y la arquitectura propuesta.**

| Artículo | A | B | C |
|---|---|---|---|
| (Le and Kim, 2017) | Unity3D | ARToolKit | Leap Motion |
| (Schutera *et al.*, 2021) | Unity3D | Vuforia | N/A |
| (Karambakhsh *et al.*, 2019) | HoloLens | Biblioteca de Python TensorFlow | HoloLens |
| (Sun, 2019) | HoloLens | Red Neuronal Convolucional | HoloLens |
| (Bifulco *et al.*, 2014) | Unity3D | Vuforia | N/A |
| (Putra and Putra, 2021) | Unity3D | Vuforia | N/A |
| (Sarosa *et al.*, 2019) | Unity3D | Vuforia | N/A |
| (Sánchez *et al.*, 2022) | Unity3D | Vuforia | Leap Motion |
| **A) Motor de despliegue de modelos 3D**<br>**B) Biblioteca SDK**<br>**C) Interfaz humano-máquina** | | | |

## 4. TRABAJO A FUTURO

Como trabajo a futuro se realizarán las siguientes actividades: Se estudiarán estrategias pedagógicas para su utilización en el diseño del funcionamiento del sistema; se diseñarán los marcadores para lectura a través de la cámara; se moldearán los modelos tridimensionales que el usuario manipulará a través de *Leap Motion*; se diseñará y codificará el sistema, y finalmente se validará el funcionamiento del mismo con una población de muestra.

## 5. CONCLUSIONES

Actualmente México tiene un bajo nivel de rendimiento académico en cuanto a comprensión lectora se refiere, y basados en el hecho de que menor comprensión lectora significa menor capacidad para desarrollar ideas complejas, el aumento de las capacidades de lectoescritura favorecería de forma integral el aprendizaje de los estudiantes. En el análisis realizado en este artículo, se observa que los múltiples trabajos e investigaciones realizadas, crearon soluciones satisfactorias a las problemáticas de aprendizaje que enfrentaban los estudiantes en ámbitos más abstractos como la medicina, la ética y las matemáticas. Tomando en cuenta ambos puntos, es factible que la creación de una herramienta que utilice realidad aumentada e interfaces humano-máquina como apoyo al aprendizaje de la lectoescritura, no solo proporcione mejorías en dicha área, sino también mejore el desarrollo integral de los estudiantes y contribuya a fomentar el hábito de la lectura.

**Agradecimientos.** Los autores de este trabajo agradecen el apoyo por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el soporte financiero y al Tecnológico Nacional de México por permitir el desarrollo de este proyecto.

REFERENCES

Allagui, B. (2021) 'Writing a Descriptive Paragraph Using an Augmented Reality Application: An Evaluation of Students' Performance and Attitudes', *Technology, Knowledge and Learning*, 26(3), pp. 687–710. doi: 10.1007/s10758-019-09429-2.

Bifulco, P. *et al.* (2014) 'Telemedicine supported by Augmented Reality: An interactive guide for untrained people in performing an ECG test', *BioMedical Engineering Online*, 13(1), pp. 1–16. doi: 10.1186/1475-925X-13-153.

Karambakhsh, A. *et al.* (2019) 'Deep gesture interaction for augmented anatomy learning', *International Journal of Information Management*, 45, pp. 328–336. doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2018.03.004.

Le, H. Q. and Kim, J. I. (2017) 'An augmented reality application with hand gestures for learning 3D geometry', *2017 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing, BigComp 2017*, pp. 34–41. doi: 10.1109/BIGCOMP.2017.7881712.

Lin, V., Liu, G. Z. and Chen, N. S. (2020) 'The effects of an augmented-reality ubiquitous writing application: a comparative pilot project for enhancing EFL writing instruction', *Computer Assisted Language Learning*, 0(0), pp. 1–42. doi: 10.1080/09588221.2020.1770291.

Mursyidah, Indrawati and Ramadhona (2019) 'Augmented Reality Application for Introduction Traditional House and Objects of Aceh', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 536(1). doi: 10.1088/1757-899X/536/1/012152.

Nugraha, I. *et al.* (2019) 'The application of augmented reality in learning English phonetics', *Journal of Physics: Conference Series*, 1402(7). doi: 10.1088/1742-6596/1402/7/077024.

Putra, I. K. A. A. and Putra, I. G. N. A. C. (2021) 'Development of Augmented Reality Application for Canang Education Using Marker-Based Tracking Method', *JELIKU (Jurnal Elektronik Ilmu Komputer Udayana)*, 9(3), p. 365. doi: 10.24843/jlk.2021.v09.i03.p07.

Sarosa, M. *et al.* (2019) 'Developing augmented reality based application for character education using unity with Vuforia SDK', *Journal of Physics: Conference Series*, 1375(1). doi: 10.1088/1742-6596/1375/1/012035.

Schutera, S. *et al.* (2021) 'On the potential of augmented reality for mathematics teaching with the application cleARmaths', *Education Sciences*, 11(8). doi: 10.3390/educsci11080368.

Sun, Y. et al. (2019) 'Manipulating IoT Devices in Augmented Reality Environment MagicHand : A Deep Learning Approach towards Manipulating IoT Devices in Augmented Reality Environment', pp. 0–9.

SyafiqahSafiee, N. and Wanis Ismail, A. (2018) 'AR Home Deco: Virtual Object Manipulation Technique Using Hand Gesture in Augmented Reality', pp. 1–6.

Yamada, S. and Chandrasiri, N. P. (2018) 'Evaluation of Hand Gesture Annotation in Remote Collaboration Using Augmented Reality', pp. 727–728.

 ISSN en trámite

# Análisis de la caracterización de estilo de conducción en la prevención de accidentes por consumo de alcohol

**L.E. Torres Hernández*. L.E. Márquez Martínez**. A. Salas Núñez***. E. Sánchez Gutiérrez****.**

**Departamento de Sistemas y Computación, Tecnológico Nacional de México/I.T. Zacatecas, Carretera, Panamericana entronque a Guadalajara s/n. La Escondida. Apartado Postal 245 C.P. 98000 Zacatecas, Zac.*

**Resumen:** De acuerdo con el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), México es el séptimo país que presenta mayor cantidad de muertes por accidentes de tránsito. El estilo de conducción se refiere al comportamiento del conductor. La detección y clasificación de estilos de conducción ha permitido mejorar el flujo vehicular y reducir la cantidad de accidentes viales ocasionados principalmente por el conductor en estado de ebriedad, un problema por ser abordado en México.

*Palabras clave:* Estilo de conducción; Comportamiento del conductor; Aprendizaje automático; Seguridad del conductor; Accidente de tráfico;

## 1. INTRODUCCIÓN

El término accidente (Campos & Huttich, 2014) ha dejado de ser considerado un evento fuera de control que se presente de manera súbita para ser definido como lesión no intencional, por lo cual puede ser previsible y prevenible.

Siendo la habilidad para conducir (Elander, 1993), la capacidad de rendimiento en ciertos aspectos como lo son: la capacidad de mantener el control del vehículo, procesar la información, responder de manera adaptativa a las dificultades en el camino, y por otra, el estilo de conducción, el cual es referente al comportamiento del conductor de un automóvil dada la manera habitual de conducción estable a lo largo del tiempo.

### *1.1 Problemática*

La problemática en los accidentes automovilísticos a causa de consumo de alcohol en México (Gobierno del estado de México, 2013) se centra en la existencia de relación causal entre el consumo de alcohol y accidentes, ya que no suelen seguir protocolos estandarizados para realizar alcoholimetrías (cuantifican el nivel de alcohol en el aliento), ocasionando una falsa seguridad en consumidores ocasionales de alcohol (principalmente jóvenes).

Al haber una relación directa entre la concentración de alcohol en pequeñas dosis, y la ocurrencia de siniestros viales, según el estudio realizado (Zador, 1991) en el Reino Unido y Canadá, el riesgo relativo de aumento del 0.02 por ciento en la concentración de alcohol en sangre de un conductor, duplica el riesgo de sufrir accidentes fatales en comparación de un conductor con una concertación de alcohol igual a cero.

En México (Barroso Ana, 2022), el límite para poder conducir en estado etílico es de0,04 CAS (concentración de alcohol en la sangre), sin embargo,el riesgo de una colisión en el tránsito comienza en niveles bajos de CAS y aumenta cuando el CAS del conductor es $\geq 0.02$.

Por lo cual la prevención de accidentes en consumidores de alcohol en conductores ocasionales no ha sido abordada en la caracterización del conductor de modo que exista cierto grado de responsabilidad entre quienes consumen alcohol en pequeñas cantidades, y deben o quieren manejar un vehículo, por lo tanto es necesario desarrollar sistemas que supervisen las situaciones de funcionamiento de los conductores y alerten de cualquier condición insegura para prevenir accidentes automovilísticos.

### *1.2 Aplicación*

El estilo de conducción es un concepto que implica la existencia de características estables, mentales y situacionales (Marina Martínez, Heucke, Wang, Gao & Cao, 2018), los autores de trabajos previos (Dai, Teng, Bai, Shen & D. Xuan, 2010) indican ser un problema multidimensional, el cual se aborda mediante dos enfoques, uno particular para cada conductor y un modelo general no intrusivo para caracterizar comportamientos anormales exhibidos por los conductores.

Satisfaciendo el enfoque particular del estilo de conducción según autores (Dai,Teng, Bai, Shen & D. Xuan, 2010) incluyen los siguientes requisitos:

- Monitoreo en tiempo real.
- Confiable que funciona con precisión.
- No intrusivo.
- Bajo costo.
- Evaluación de aspectos estables, mentales y situacionales del contexto.

 ISSN en trámite

Proponiendo según (Dai, Teng, Bai, Shen & D. Xuan, 2010) modelos basados en cuatro tipos de comportamientos de conducción: estado etílico, imprudente y fatiga mediante la combinación de contextos información sobre el conductor, el vehículo y el entorno, siendo el comportamiento en estado de ebriedad según (Shirazi and A. B. Rad, 2014) un conjunto de acciones como aceleración repentina, conducir sin mantener la posición correcta en el carril, conducir sin controlar la velocidad y ángulo del volante.

El comportamiento del conductor es un área bien documentada con algunas posibilidades inexploradas (Marina Martinez, Heucke, Wang, Gao & Cao, 2018), como lo es el consumo de alcohol en conductores ocasionales.

Esto se realiza con el fin de compilar e identificar estudios a partir de los cuales se adoptan técnicas para futuras investigaciones.

### *1.3* Objetivo General

Crear una aplicación móvil para Android que permita detectar y cuantificar el nivel de alcohol dado el estilo de conducción, así como crear un perfil de conducción bajo efectos de alcohol.

## 2. METODOLOGÍA

La presente investigación es comparativa tipo cuantitativa dado que se centra en la recopilación y el análisis de resultados en trabajos previos con el fin de identificar técnicas de detección en base a características cuantificables como los son eficiencia, tiempo de respuesta y nivel de intrusión.

Los indicadores para comparar son:

- Algoritmo empleado.
- Tiempo de respuesta.
- Sensores empleados.
- Eficiencia del algoritmo empleado.
- Capacidad de evaluación de entorno situacional.
- Capacidad de evaluación de comportamiento del conductor.
- Nivel de intrusión.
- Aplicación.

Los trabajos relacionados comprenden la caracterización de estilos de conducción de tipo normal, estado etílico, imprudente y fatiga, siendo estos relacionados con la conducta en estado de ebriedad.

## 3. RESULTADOS

La caracterización de estilos de conducción es un factor decisivo en el comportamiento del conductor, siendo la relación entre el conductor, el control del vehículo y la sensibilidad del conductor a entornos de conducción complejos o situacionales (el clima, trafico, entre otros) un factor decisivo en la eficiencia de los algoritmos. Los usos algorítmicos difieren según el tipo de datos de entrada a los que los autores tuvieron, tal como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1. Resultados de los trabajos previos**

| **Trabajo** | Cura, A., Küçük, H., Ergen, E., & Öksüzoğlu, I.B., 2021. Driver Profiling Using Long Short-Term Memory (LSTM) and Convolutional Neural Network | Zheng, Y., & Hansen, J.L., 2016. Unsupervised driving performance assessment using free-positioned smartphones in vehicles. | Brian Suffoletto, Pritika Dasgupta, Ray Uymatiao., 2020. A Preliminary Study Using Smartphone Accelerometers to Sense Gait Impairments Due to Alcohol Intoxication | Ruojun Li, Ganesh Prasanna Balakrishnan., 2017. On Smartphone Sensability of Bi-Phasic User Intoxication Levels from Diverse Walk Types in Standardized Field Sobriety Tests | Ruojun Li, Ganesh, Prasanna Balakrishnan, Jiaming Nie., 2021. Estimation of Blood Alcohol Concentration From Smartphone Gait Data Using Neural Networks |
|---|---|---|---|---|---|
| **Algoritmo empleado** | Redes neuronales artificiales | Support vector machines (SVM) | Sensores | Redes Neuronales artificiales | Redes Neuronales artificiales |
| **Tiempo de respuesta** | Tiempo real | Tiempo real | Tiempo real | Tiempo Real | Tiempo Real |
| **Sensores empleados** | Acelerómetro, GPS y consumo de combustible | Acelerómetro, sensor de orientación y GPS | Acelerómetro | Acelerómetro y giroscopio | Acelerómetro y giroscopio |
| **Evaluación de entorno situacional** | No | No | No | Si | No |
| **Evaluación de comportamiento de conductor** | Si | Si | Si | Si | Si |
| **Eficiencia del algoritmo** | 95.3% | 85% | 89% | 85% | 90% |
| **Nivel de intrusión** | Bajo | Bajo | Bajo | Media | Media |
| **Aplicación** | Somnolencia | Comportamiento del conductor | Comportamiento del conductor | Comportamiento del conductor | Comportamiento del conductor |

Se identifica la utilización de algoritmos para la distinción y el etiquetado de estilos de conducción, en la identificación individual del conductor y el estado de la carretera.

Las aproximaciones estadísticas se realizan en el reconocimiento de maniobras del conductor y modelado de la toma de decisiones del conductor.

Modelos Machine Learning Support y Vector Machines son principalmente aplicados en la estimación del comportamiento de conducción.

La técnica de redes dinámicas bayesianas se aplica en entornos de detección para abordar el problema de los datos incompletos en entornos multidimensionales.

Las redes neuronales artificiales encuentran su aplicación en la detección de somnolencia.

## 4. CONCLUSIONES

Los resultados sugieren la posibilidad de la detección de otros impedimentos, como somnolencia y distracción ya que existe una correlación con los estilos de conducción de tipo: imprudente y somnolencia en la conducción en estado etílico.

La aplicación de los algoritmos de detección es apoyar al conductor a un comportamiento seguro mediante la detección de conducta insegura.

Existe una relación entre el uso de las redes dinámicas bayesianas y la detección del comportamiento del conductor en estado etílico, siendo estas el método más aproximado para tratar con datos inexactos como lo es la caracterización en estado etílico dado que el comportamiento del conductor es un problema de contexto incierto.

 ISSN en trámite

Se reconoce la característica de ser un problema multidimensional sensible al contexto, cuyo factor decisivo se presume ser el tiempo real de la información y los patrones de comportamiento del conductor, siendo la relación entre el conductor, control del vehículo y sensibilidad del conductor a entornos de conducción complejos, un factor decisivo en la eficiencia del algoritmo.

Como trabajo a futuro se desarrollará una aplicación móvil para la detección de consumo de alcohol por medio del reconocimiento del estilo de conducción mediante el algoritmo de redes dinámicas bayesianas en plataforma android.

## REFERENCIAS

Al-Sultan, S., Al-Bayatti, A.H., & Zedan, H., 2013. Context-Aware Driver Behavior Detection System in Intelligent Transportation Systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 62, 4264-4275.

Cura, A., Küçük, H., Ergen, E., & Öksüzoğlu, İ.B., 2021. Driver Profiling Using Long Short-Term Memory (LSTM) and Convolutional Neural Network (CNN) Methods. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 22, 6572-6582.

Campos & Huttich, R., 2014. Los accidentes de tránsito, problema de salud pública. Salud Pública De México, 15, 29_41.

Dai, J., Teng, J., Bai, X., Shen, Z., & Xuan, D., 2010. Mobile phone based drunk driving detection. 2010 4th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, 1-8.

Elander, J., West, R., & French, D., 1993. Behavioral correlates of individual differences in road-traffic crash risk: an examination method and findings. Psychological bulletin, 113(2), 279–294.

Gobierno del estado de México, Accidentes y alcoholismo, 2020. CEVECE.

Marina Martinez, C., Heucke, M., Wang, F., Gao, B., & Cao, D., 2018. Driving Style Recognition for Intelligent Vehicle Control and Advanced Driver Assistance: A Survey. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 19, 666-676.

Shirazi, M.M., & Rad, A.B., 2014. Detection of Intoxicated Drivers Using Online System Identification of Steering Behavior. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 15, 1738-1747.

Zador P. L., 1991. Alcohol-related relative risk of fatal driver injuries in relation to driver age and sex. Journal of studies on alcohol, 52(4), 302–310.

Barroso Ana, 2022. Protocolo para la implementación de puntos de control de alcoholimetría, 1, 33-49

Zheng, Y., & Hansen, J.L., 2016. Unsupervised driving performance assessment using free-positioned smartphones in vehicles. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 1598-1603.

Brian Suffoletto, Pritika Dasgupta, Ray Uymatiao., 2020. A Preliminary Study Using Smartphone Accelerometers to Sense Gait Impairments Due to Alcohol Intoxication

Ruojun Li, Ganesh Prasanna Balakrishnan., 2017. On Smartphone Sensability of Bi-Phasic User Intoxication Levels from Diverse Walk Types in Standardized Field Sobriety Tests

Ruojun Li, Ganesh, Prasanna Balakrishnan, Jiaming Nie., 2021. Estimation of Blood Alcohol Concentration From Smartphone Gait Data Using Neural Networks

 ISSN en trámite

# Utilización de técnicas heurísticas basadas en el enfoque evolutivo para la optimización de acomodo de cajas de diferentes tamaño en un espacio tridimensional limitado (problema bin-packing)

**José Nicolás A. García Martínez** * **Gerardo Reyes Salgado** ** **Andrea Magadan Salazar** ***

* *Tecnológico Nacional de México campus CENIDET, Cuernavaca, Morelos 62490 MX (e-mail: m21ce013@cenidet.tecnm.mx).*
** *Tecnológico Nacional de México campus CENIDET, Cuernavaca, Morelos 62490 MX (e-mail: gerardo.rs@cenidet.tecnm.mx).*
*** *Tecnológico Nacional de México campus CENIDET, Cuernavaca, Morelos 62490 MX (e-mail: andrea.ms@cenidet.tecnm.mx).*

Resumen: El presente trabajo introduce tres metaheurísticas para resolver el problema de carga de contenedores (CLP) con cajas de diferente tamaño, maximizando el espacio de ocupación dentro de un contenedor. Se presentan tres metaheurísticas: Algoritmo Genético (genetic algorithm, GA), Algoritmo de colonia de abejas artificial (artificial bee colony, ABC) y Algoritmo de luciérnagas (firefly algorithm, FA); cada una utiliza una heurística de empacado y se maneja la misma codificación. Las metaheurísticas se componen por los mismos operadores evolutivos, obteniendo una hibridación entre estas.

*Palabras clave:* BPP3D, Carga de Contenedores, Algoritmo Genético, Algoritmos Bio-inspirados.

## 1. INTRODUCCIÓN

### *1.1 Problema del Bin Packing 3D*

En el estudio del *bin packing 3D* se han encontrado diversos métodos para resolverlo, dividiéndose en dos: métodos exactos y métodos por heurísticas (Martello et al., 2000). Los métodos exactos se asegura una *solución óptima* al problema, este requiere la utilización de grandes cantidades de tiempo para problemas modernos (Duan et al., 2018). Las alternativas para obtener *aproximación a soluciones óptimas* con las **heurísticas de empacado** se obtienen soluciones cercanos al óptimo.

El problema de carga de contenedores (*container loading problem* (CLP)) es el problema más importante de carga de contenedores en tres dimensiones (Bischoff and Marriott, 1990). Es un *problema combinatorio* de clase **NP-duro** (Garey and Johnson, 1990). Además, el CLP simplifica el caso particular del problema de *carga de un solo contenedor*, consiste de un solo contenedor con $n$ objetos a empacar (*Single Container Loading, SCL*), teniendo problemas *en línea* (se desconoce las cajas entrantes y sus dimensiones) y *fuera de línea*. Si se tienen una mayor cantidad de cajas de diferentes tamaños, se considera el problema como *fuertemente heterogéneo o débilmente homogéneo*, en caso contrario, se considera como *fuertemente homogéneo ó débilmente heterogéneo*.

### *1.2 Métodos aproximados*

Proporcionan aproximaciones aceptables con menos esfuerzo computacional (Duan et al., 2018). Se mencionan los principales métodos:

1. **Heurísticas.** Incluye métodos de construcción y métodos de mejoramiento.
2. **Metaheurísticas.** Se han preferido la utilización de metaheurísticas para el 3D-CLP (Hasni and Sabri, 2013).
3. **Búsqueda por árbol.** Utilizan la búsqueda de grafos para el 3D-CLP basándose en heurísticas para generar un plan de empacado (Hasni and Sabri, 2013).

### *1.3 Metaheurísticas*

Desde los años 90's, se han aplicado los algoritmos genéticos al problema de *paletizado* de objetos rectangulares (Kröger et al., 1990). Se encuentran diversas investigaciones de los *algoritmos genéticos* (*Genetic Algorithm*,

 ISSN en trámite

GA) aplicados al problema de carga en tres dimensiones. Actualmente, el GA ha pasado a ser utilizado en múltiples problemas de optimización continuos y discretos.

En las últimas dos décadas se han modelado las **metaheurísticas bioinspiradas**, consisten de una *inteligencia de enjambre* para explorar el espacio de soluciones, en su mayoría se aplican a problemas de optimización continuo regidas por **ecuaciones de movimiento**.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### *2.1 Metaheurísticas bioinspiradas*

Las metaheurísticas FFA y ABC fueron inicialmente para problemas de optimización continuo, se ha modificado los algoritmos para adaptarlo a un problema de optimización discreto e incluso para problemas de combinatoria. Estas modificaciones, ayudan a resolver el problema mediante *operadores de permutación*. A continuación se listarán los principales trabajos para dicha modificación.

*Algoritmo de Colonia de Abejas Artificial*

- Kıran et al. (2013). Se toma las definiciones de los dos grupos de operadores evolutivos. El primero es el **grupo de combinación de operadores punto a punto** (C1) y el segundo es el **grupo de combinación de operadores sobre subsecuencias** (C2).
- Zhong et al. (2017). Aplicando al problema TSP, se exponen los diferentes operadores genéticos de selección en la fase de la abeja espectadora. Se toma definiciones para abarcar el problema como en Kıran et al. (2013).
- Bayraktar et al. (2021). Compara dos metaheurísticas: *memory integrated artificial bee colony algorithm (MIACB)* y *genetic operator based artificial bee colony algorithm (GABC)* .

*Algoritmo de libélulas*

- Jati et al. (2013). Define el algoritmo de libélulas discreto, formulando estrategias evolutivas para el movimiento de las libélulas, aplicando el movimiento $m$ veces.
- Kıran et al. (2013). Se expone una formulación discreta para los movimientos de las libélulas. Se presenta los **PasoAlpha**, representa el movimiento aleatorio, y **PasoBeta**, representa la atracción entre libélulas. Además, se aproxima a primer orden la gaussiana que define la *intensidad de luz* de las libélulas.
- Osaba et al. (2017). Utiliza una formulación del DFFA para evaluar problemas de rutas vehículares. Utiliza la *distancia hamming* para calcular la intensidad de cada libélula.

### *2.2 Metaheurísticas evolutivas*

*Algoritmo genético*

- Raidl and Kodydek (1998). Algoritmo genético para el problema de contenedor múltiple, utiliza y ejemplifica la codificación basada en orden, con una heurísticas de empaquetado.
- Karabulut and İnceoğlu (2004). Algoritmo genético híbrido con DBLF (*Deep Bottom Left Fill*) para el BPP3D multi-contenedor. Define algoritmos para generar instancias por guillotina.
- Wang and Chen (2010). Define un AGH con esquema de diploide para la codificación. Extiende el DBLF y el operador de cruza basado en orden OX para la extensión de la codificación.
- Mokshin et al. (2020). Utiliza la *probabilidad adaptativa* para definir la probabilidad de mutación de una cría y obtener mejores resultados:
$$p_m = 1 - \frac{f_{1i} - f_{2i}}{2}. \tag{1}$$
- Kim et al. (2021). Utiliza el *índice de diversidad* $\eta$ para medir el grado de convergencia de la población actual en algoritmos híbridos genéticos:
$$\eta = \frac{f_{best} - f_{worst}}{f_{best}^2}. \tag{2}$$

## 3. METODOLOGÍA

En esta sección se expone el desarrollo de la metodología a utilizar sobre el problema SCL fuera de línea fuertemente heterogéneo. Por cada metahuerística, se definen tres versiones diferentes con de operadores de combinación ó mutación: *mutación por inversión*, *grupo de combinación C1* (Kıran et al., 2013) y *grupo de combinación C2*(Kıran et al., 2013). Y un único operador de recombinación ó de cruza: *cruza OX*.

### *3.1 Definición del problema*

Para un contenedor $C$ donde el origen se encuentra en la esquina inferior, sus dimensiones son $(L, W, H)$. Teniendo el conjunto de cajas $B = \{b_1, b_2, ..., b_n\}$ con dimensiones $(l_i, w_i, h_i)$. En donde $l_i$ es la longitud, $w_i$ el ancho y $h_i$ el alto de cada caja. Se requiere obtener el *maximizar el espacio ocupado* dentro del contenedor:

$$\text{maximizar } \frac{\sum_i^n l_i w_i h_i \delta_i}{LVH} \tag{3}$$

Sujeto a:

$$0 \leq x_i + d_i \leq L, 0 \leq y_i + w_i \leq W, 0 \leq z_i + h_i \leq H \tag{4}$$

$$x_{ik} \geq x_{jk} + d_{jk} \cup x_{jk} \geq x_{ik} + d_{ik};\ k = 1, 2, 3 \tag{5}$$

$$\delta_i \in [0, 1]\ \forall i \in [0, n]. \tag{6}$$

La ecuación de optimización 3 representa el volumen acumulado de las cajas empacadas entre el volumen del contenedor. La restricción 4 implica que las cajas dentro del contenedor no deben exceder los límites de este. Las restricción 5 implican que las cajas a empacar no deben cruzarse entre sí, el valor de $k$ refiere a las tres

 ISSN en trámite

coordenadas cartesianas, $d_{ik}$ es la dimensión en $k$ de la $i$-ésima caja . La restricción 6 define la variable $\delta_i$ indicando que la i-ésima caja está dentro del contenedor si su valor es 1, caso contrario su valor es 0.

### *3.2 Parámetros generales*

Se utiliza la misma función aptitud y codificación para las tres metaheurísticas.

- **Función aptitud**:

$$fitness = \frac{\sum_i l_i w_i h_i}{V}, \tag{7}$$

- **Codificación.** *Codificación decimal basado en orden.* En esta codificación, no se utilizará los *tipos de cajas* para evitar tener valores repetidos.
- **Decodificación.** Heurística de empacado DBLF Karabulut and İnceoğlu (2004).
- **Población inicial.** Para obtener soluciones factibles, se utiliza 4 heurísticas de ordenamiento (Karabulut and İnceoğlu, 2004), mientras el resto se genera aleatoriamente (permutaciones).

**Algoritmo 1** Algoritmo Híbrido Genético

**Requiere** $pr_{mut}, pr_s, pr_{cruza}$
1: *Obtener población aleatoria* $\leftarrow P$
2: $Rank(P)$
3: $n \leftarrow |P|$
4: **Repetir**
5: $\quad k \leftarrow rand(\frac{n}{4}, \frac{n}{2})$
6: $\quad P' \leftarrow P[: k]$
7: $\quad$ **Repetir**
8: $\quad\quad p_1, p_2 \leftarrow Torneo(P, 2, pr_s), Torneo(P, 2, pr_s)$
9: $\quad\quad$ **Si** $p_1,\ p_2\ \notin P'$ **Entonces**
10: $\quad\quad\quad P' \cup p_1, p_2$
11: $\quad\quad$ **Si** $pr_{cruza}$ **Entonces**
12: $\quad\quad\quad c_1, c_2 \leftarrow Cruza(p_1, p_2), Cruza(p_2, p_1)$
13: $\quad\quad\quad c_1, c_2 \leftarrow Mutar(c_1, pr_{mut}), Mutar(c_2, pr_{mut})$
14: $\quad\quad\quad$ **Si** $Aptitud(c_1)$ es diferente **Entonces**
15: $\quad\quad\quad\quad P' \cup c_1$
16: $\quad\quad\quad$ **Si** $Aptitud(c_2)$ es diferente **Entonces**
17: $\quad\quad\quad\quad P' \cup c_2$
18: $\quad$ **Hasta** $n \leq |P'|$
19: $\quad Rank(P')$
20: $\quad$ **Si** $n < |P'|$ **Entonces**
21: $\quad\quad P' \leftarrow P'[: n]$
22: $\quad P \leftarrow P'$
23: **Hasta** *Condición*

### *3.3 Algoritmo Genético Híbrido*

En el Algoritmo 1, $P$ es la población con $n$ individuos. La función *Rank* ordena la población del más apto hasta el menos apto. El parámetro $k$ es un número aleatorio entre $\frac{n}{4}, \frac{n}{2}$, adjunta a la siguiente generación los primeros $k$ individuos de la población actual. Se itera hasta obtener que la nueva generación $P'$ tiene el mismo tamaño o mayor que la población actual $P$. Haciendo abuso de notación, la notación $P[: k]$, en la línea 5, acota la población teniendo solo los primeros $k$ individuos. El operador de *Torneo* toma como primer parámetro la población actual, el segundo parámetro es el tamaño de la selección y el tercer parámetro es la probabilidad de selección. En las líneas $17, 19$ se tiene la condición que cuando la aptitud de la cría es diferente que la aptitud de sus padres, esta se agrega a la nueva generación $P'$.

Las versiones diferentes quedarían de la siguiente forma:

- *HGA*. Operador por mutación por inversión de doble punto.
- *HGA (C1)*. Operadores de combinación 1 Kıran et al. (2013).
- *HGA (C2)*. Operadores de combinación 2 Kıran et al. (2013).

### *3.4 Algoritmo Discreto de Libélulas*

En los trabajos de Durkota (2011) y Poursalehi et al. (2013) el FFA es modificado para patrones de carga, además que definen los pasos Alpha y Betta para el movimiento aleatorio y atracción de las libélulas. Sea $n$ el número de cajas a empacar, se menciona la modificación hecha a estos trabajos:

1. Paso $\alpha$: se actualizan los $x_i$ usando:

$$x_i = |round[x_i + \alpha(rand - 0.5)]| \tag{8}$$

   tal que $x_i \in [1, n]$, si $x_i > n$ *entonces* $x_i = x_i - n$, si $x_i = 0$ *entonces* $x_i = 1$.
2. Se elige el parámetro $\gamma$ de forma constante. Usualmente se elige un valor menor a 1 para $\gamma$, se define el parámetro con $\frac{1}{n}$ puesto que mantiene valores pequeños.

Los valores absolutos de la Ec. 8 son para hacer reflexivo los valores que tomen $x_i$ en caso de ser negativos. El Algoritmo 2 representa la versión clásica de los algoritmos de libélulas. Los *PasoAlpha* y *PasosBetta* se describen en Durkota (2011).

 ISSN en trámite

**Algoritmo 2** Algoritmo de Libélulas Discreto

**Requiere** $\gamma, MaxItr$
$Obtener\ población\ aleatoria \leftarrow P$
$Rank(P)$
$pop \leftarrow |P|$
$n \leftarrow TotalCajas$
$best \leftarrow P_0$
**Para** $itr \leftarrow 1, MaxItr$ **Hacer**
  $\alpha \leftarrow \lfloor n - \frac{itr}{MaxItr} \cdot n \rfloor$
  $sum \leftarrow sum + i$
  **Para** $i \leftarrow 1, pop$ **Hacer**
    **Para** $j \leftarrow i + 1, pop$ **Hacer**
      $d_{ij} \leftarrow Hamming(P_i, P_j)$
      $I_i \leftarrow Intensidad(d_{ij}, P_i, \gamma)$
      $I_j \leftarrow Intensidad(d_{ij}, P_j, \gamma)$
      **Si** $I_i < Ij$ **Entonces**
        $PasoBetta(P_i, P_j)$
        $PasoAlpha(P_i, \alpha)$
  **Si** $Aptitud(P_{mejor}) > Aptitud(best)$ **Entonces**
    $best \leftarrow P_{mejor}$

**Algoritmo 3** Algoritmo de Libélulas Discreto Evolutivo

**Requiere** $\gamma, m, MaxItr$
$Obtener\ población\ aleatoria \leftarrow P$
$Rank(P)$
$pop \leftarrow |P|$
**Para** $itr \leftarrow 1, MaxItr$ **Hacer**
  **Para** $i \leftarrow 1, pop$ **Hacer**
    $p_{atr} \leftarrow EncontrarMásAtractiva(P, p_i)$
    **Para** $j \leftarrow 1, m$ **Hacer**
      **Si** $p_{atr}$ existe **Entonces**
        $p' \leftarrow Cruza(p_i, p_{atr})$
      **Sino**
        $p' \leftarrow Mutar(p_i, 1)$
      **Si** $Aptitud(p') \neq Aptitud(p_i)$ **Entonces**
        $P \cup p'$
  $Rank(P)$
  $P \leftarrow P[: pop]$
  **Si** $Condición$ **Entonces**
    **Romper**

Implementando el diferente esquema de movimiento definido en Jati et al. (2013), para $m$ movimientos definido por el usuario. Las libélulas se acercan una a la otra con el operador de cruza OX, y se mueven aleatoriamente con los operadores de mutación ó combinación. A este algoritmo se le llama Algoritmo de Libélulas Discreto Evolutivo (*EDFFA*). El Algoritmo 3 ejemplifica lo mencionado. La mutación se opera con probabilidad de 1.

En resumen, se obtienen las tres versiones:

- *DFFA* Durkota (2011) y Poursalehi et al. (2013). Utiliza ecuaciones de movimiento.
- *EDFFA (C1)*. Diferente esquema de movimiento Jati et al. (2013).
- *EDFFA (C2)*. Diferente esquema de movimiento Jati et al. (2013).

### *3.5 Algoritmo Discreto de Colonia de Abejas Artificial*

El Algoritmo de Colonia de Abejas Discreto (*DABC*) se define de manera análoga al proceso que se utilizó con el*DFFA* para la las ecuaciones de movimiento. Se utiliza una selección por torneo de dos en la etapa de la abeja espectadora. El Algoritmo 4 muestra el esquema de movimiento casual de la colonia de abejas. El procedimiento de $MejorarFlor$ se operan las ecuaciones de movimiento para el DABC, si en lugar de usar ecuaciones de movimiento se utilizan operadores evolutivos, a este caso se le llamará *Algoritmo de Colonia de Abejas Discreto Evolutivo* (EDABC).

**Algoritmo 4** Algoritmo de Colonia de Abejas Discreto

**Requiere** $Limite$
$Obtener\ población\ aleatoria \leftarrow P$
$pop \leftarrow |P|$
$b_{mejor} \leftarrow EncontrarMejorFlor(P)$
**Para** $itr \leftarrow 1, MaxItr$ **Hacer**
  **Para** $i \leftarrow 1, pop$ **Hacer**
    $MejorarFlor(P_i)$
  **Para** $i \leftarrow 1, pop$ **Hacer**
    $p \leftarrow Torneo(P, 2, 1)$
    $MejorarFlor(p)$
  **Para** $i \leftarrow 1, pop$ **Hacer**
    **Si** $LimiteExplotar(P_i) \geq Limite$ **Entonces**
      $P_i \leftarrow SolucionAleatoria()$
      $LimiteExplotar(P_i) \leftarrow 0$
  $b' \leftarrow EncontrarMejorFlor(P)$
  **Si** $Aptitud(b') > Aptitud(b_{mejor})$ **Entonces**
    $b_{mejor} \leftarrow b'$
  **Si** $Condición$ **Entonces**
    **Romper**

Se tienen dos versiones para el algoritmo de abeja. Los operadores de combinación se definen en Kıran et al. (2013), y se concluyó que el grupo de combinación $C2$ obtuvo los mejores resultados.

- *DABC* . Utiliza ecuaciones de movimiento, basándose en el trabajo de DFFA en Durkota (2011) .
- *EDABC (C2)*. Definido en Kıran et al. (2013). El algoritmo cambia las ecuaciones de movimiento por operadores evolutivos.

## 4. EXPERIMENTACIÓN

### *4.1 Instancias*

Se utilizan las instancias de (Karabulut and İnceoğlu, 2004). En la Tabla 4.1, la primer columna define el tipo de problema que se generará. Teniendo en total de 4 tipos de problemas. Las instancias son creadas por el algoritmo

 ISSN en trámite

2 definido en (Karabulut and İnceoğlu, 2004). La segunda columna muestra la cantidad de cajas de la instancia, y las dimensiones de los contenedores. Para el Problema 2, se tienen un total de 25 cajas sobre un contenedor de $50 \times 50 \times 50$.

- En cada instancia se tomaron diferentes semillas aleatorias, para $p$ ={22,4,20,40,46,21,8,10,4,42,35,25 ,14,28,11,65,33,48,26,7} utilizando la fórmula en Bischoff and Ratcliff (1995): $s = 250250 + 100(p - 1)$.
- En la creación de las instancias, se condiciona que las cajas resultantes tengan el mínimo valor de 1 en cada uno de sus lados.
- Se calcula el espacio sobrante dentro del contenedor $1 - f_i$, donde $f_i$ es la aptitud del mejor individuo encontrado.

| | Alg. 2 |
|---|---|
| Problema 2 | 25 (50x50x50) |
| Problema 3 | 52 (100x100x100) |
| Problema 4 | 100 (200x200x200) |
| Problema 5 | 151 (300x300x300) |

Cuadro 1. Instancias por guillotina.

### *4.2 Procedimiento y parámetros experimentales*

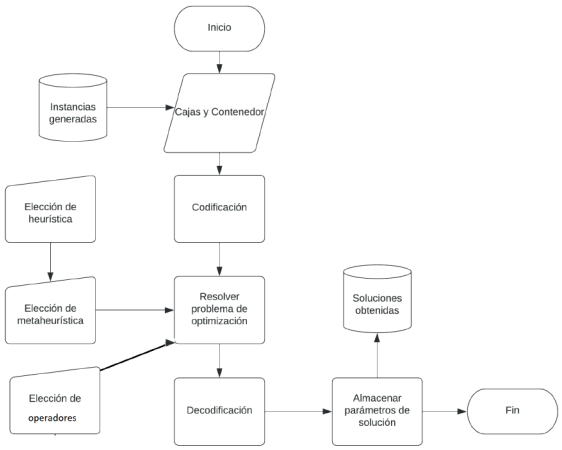



Figura 1. Diagrama de flujo generalizado del experimento.

En el diagrama de flujo Fig. 4.2 se representa de forma generalizada la experimentación. Con tener el conjuntos instancias a resolver, la heurística de empacado y los operadores evolutivos. se puede resolver la instancia con cualquiera de las metaheurísticas presentadas. La razón de esto es por que las metaheurísticas trabajan sobre una misma codificación de solución, empleando los mimos operadores evolutivos (para los casos). Al final, se almacenan los resultados obtenidos de cada metaheurística.

**Parámetros iniciales**

- Se utiliza la codificación basada en orden para todos los casos Raidl and Kodydek (1998).
- Se inicia, para todos los casos, 50 soluciones iniciales con las 4 heurísticas de ordenamiento.
- Máxima iteración de 1000.
- En cada metaheurística, se utiliza el DBLF.
- En todas las metaheurísticas se tienen la condición de paro cuando el mejor individuo tiene aptitud de 1.
- Algoritmos Genéticos: La probabilidad de selección $p_s = 0.85$, de cruza $p_c = 0.75$ y la probabilidad de mutación es *adaptativa* Ec. 1. Se utiliza el *índice de diversidad* Ec. 2 como criterio de convergencia, la iteración termina cuando $\eta < 0.001$.
- En DABC y EDABC, el límite de explotación de soluciones es: $L = round(\sqrt{pop \cdot n})$. Valores pequeños del límite da mejores resultados. Esto se comprobó en la experimentación.
- En EDFFA, se mantiene el valor de $m = 11$, igual que en Jati et al. (2013).

## 5. RESULTADOS

Los algoritmos genéticos se probaron sobre todos los tipos de problemas, los algoritmos de libélulas y el de abejas sólo se implementaron hasta el tercer tipo de problema (P2, P3), no se terminaron de probar las demás instancias por cuestiones de tiempo de entrega. El Problema 1 se omitió por la razón que al hacer las 1000 iteraciones, todos los resultados alcanzaban el máximo volumen ocupado, 100 %.

Los resultados muestran el *volumen sobrante* de las 20 instancias de cada problema, se remarca con negrita los mejores resultados y se añade el intervalo de confianza de los resultados. Al final se promedia los resultados, teniendo la última fila de cada cuadro de resultados este valor.

| | HAG | HAG C1 | HAG C2 |
|---|---|---|---|
| P2 | $0.2348 \pm 0.1011$ | $\mathbf{0.1780 \pm 0.0790}$ | $0.2875 \pm 0.1328$ |
| P3 | $\mathbf{0.8734 \pm 0.1675}$ | $1.2830 \pm 0.2791$ | $0.9778 \pm 0.2255$ |
| P4 | $4.2468 \pm 0.6240$ | $4.0771 \pm 0.5978$ | $\mathbf{3.7327 \pm 0.4681}$ |
| P5 | $\mathbf{3.2415 \pm 0.6535}$ | $3.6712 \pm 0.6358$ | $3.5209 \pm 0.66830$ |
| Mean | 2.1493 | 2.3023 | **2.1297** |

Cuadro 2. Algoritmo Híbrido Genético.

| | DFFA | EDFFA C1 | EDFFA C2 |
|---|---|---|---|
| P2 | $\mathbf{0.0644 \pm 0.0332}$ | $0.0658 \pm 0.0514$ | $0.0937 \pm 0.0528$ |
| P3 | $2.4171 \pm 0.4737$ | $\mathbf{0.3797 \pm 0.1664}$ | $0.5479 \pm 0.2143$ |
| Mean | 1.2407 | **0.2227** | 0.6416 |

Cuadro 3. Algoritmo Discreto (Evolutivo) de Libélulas.

 ISSN en trámite

| | DABC | EDABC C2 |
|---|---|---|
| P2 | $4.0143 \pm 0.9514$ | $\mathbf{3.7888 \pm 1.0323}$ |
| P3 | $3.8598 \pm 0.6174$ | $3.9793 \pm 0.6526$ |
| Mean | 3.9370 | **3.8840** |

Cuadro 4. Algoritmo Discreto (Evolutivo) de Colonia de Abejas.

## 6. ANÁLISIS Y CONCLUSIÓN

Los algoritmos híbridos genéticos Cuadro 2, mostraron una menor variabilidad en la utilización de diferentes operadores evolutivos. En promedio, el grupo de combinación C2 obtuvo el menor espacio sobrante, sin embargo, la diferencia entre este y usando el operador por inversión doble es muy pequeña, pudiendo considerarse despreciable esta diferencia de 0.0196 %. Por lo tanto, tanto usar el grupo C2 como la mutación por inversión de punto doble proporcionan los mejores resultos de las instancias.

Los algoritmos discreto de colonia de abejas Cuadro 3, para ambas versiones fueron los de que obtuvieron el menor desempeño de las tres metaheurísticas, aun así conservan un error pequeño menor al 4 % en promedio. Esto se debe a que los algoritmos de colonia de abejas olvidan las soluciones encontradas y estas no contribuyen en la mejora de la búsqueda.

El *algoritmo de libélulas discreto "evolutivo" (EDFFA)* Cuadro 4 con el nuevo esquema de movimiento (Jati et al., 2013), con los operadores evolutivos del grupo C1 obtuvo el mejor rendimiento de los algoritmos comparados. Esto demuestra que la noción de *dirección de movimiento* no existe para el espacio de permutaciones, además que cada generación de libélulas creadas tienen una tendencia a mejorar la aptitud de toda la población, de manera similar a los algoritmos genéticos. Los algoritmos de libélulas discretos (DFFA), que se rigen por las ecuaciones de movimiento, obtuvieron menor desempeño que el EDFFA. Por lo tanto, utilizar operadores evolutivos con el nuevo esquema de movimiento se obtienen mejores resultados.

## REFERENCIAS

Bayraktar, T., Ersöz, F., and Kubat, C. (2021). Effects of memory and genetic operators on artificial bee colony algorithm for three-dimensional bin packing problem. Technical report, EasyChair.

Bischoff, E.E. and Marriott, M.D. (1990). A comparative evaluation of heuristics for container loading. *European Journal of Operational Research*, 44(2), 267–276.

Bischoff, E.E. and Ratcliff, M. (1995). Issues in the development of approaches to container loading. *Omega*, 23(4), 377–390.

Duan, L., Hu, H., Qian, Y., Gong, Y., Zhang, X., Xu, Y., and Wei, J. (2018). A multi-task selected learning approach for solving 3d flexible bin packing problem. *arXiv preprint arXiv:1804.06896*.

Durkota, K. (2011). Implementation of a discrete firefly algorithm for the qap problem within the sage framework. *Bachelor Thesis, Czech Technical University*.

Garey, M.R. and Johnson, D.S. (1990). *Computers and Intractability; A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman & Co., USA.

Hasni, H. and Sabri, H. (2013). On a hybrid genetic algorithm for solving the container loading problem with no orientation constraints. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research*, 12(1), 67–84.

Jati, G.K., Manurung, R., et al. (2013). Discrete firefly algorithm for traveling salesman problem: A new movement scheme. In *Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation*, 295–312. Elsevier.

Karabulut, K. and İnceoğlu, M.M. (2004). A hybrid genetic algorithm for packing in 3d with deepest bottom left with fill method. In *International Conference on Advances in Information Systems*, 441–450. Springer.

Kim, H.C., Lee, Y.J., Han, S.H., and Oh, J. (2021). Hybrid genetic algorithm for packing segments of decommissioned nuclear reactor components.

Kıran, M.S., İşcan, H., and Gündüz, M. (2013). The analysis of discrete artificial bee colony algorithm with neighborhood operator on traveling salesman problem. *Neural computing and applications*, 23(1), 9–21.

Kröger, B., Schwenderling, P., and Vornberger, O. (1990). Parallel genetic packing of rectangles. In *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, 160–164. Springer.

Martello, S., Pisinger, D., and Vigo, D. (2000). The three-dimensional bin packing problem. *Operations research*, 48(2), 256–267.

Mokshin, V., Maryashina, D., Stadnik, N., Zolotukhin, A., and Sharnin, L. (2020). Modified genetic algorithm as a new approach for solving the problem of 3d packaging. 654–661.

Osaba, E., Yang, X.S., Diaz, F., Onieva, E., Masegosa, A.D., and Perallos, A. (2017). A discrete firefly algorithm to solve a rich vehicle routing problem modelling a newspaper distribution system with recycling policy. *Soft Computing*, 21(18), 5295–5308.

Poursalehi, N., Zolfaghari, A., and Minuchehr, A. (2013). Multi-objective loading pattern enhancement of pwr based on the discrete firefly algorithm. *Annals of Nuclear Energy*, 57, 151–163.

Raidl, G.R. and Kodydek, G. (1998). Genetic algorithms for the multiple container packing problem. In *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, 875–884. Springer.

Wang, H. and Chen, Y. (2010). A hybrid genetic algorithm for 3d bin packing problems. In *2010 IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA)*, 703–707. doi: 10.1109/BICTA.2010.5645211.

Zhong, Y., Lin, J., Wang, L., and Zhang, H. (2017). Hybrid discrete artificial bee colony algorithm with threshold acceptance criterion for traveling salesman problem. *Information Sciences*, 421, 70–84.

 ISSN en trámite

# Utilizando el IoT Para calcular la evapotranspiración de referencia en agricultura protegida

**Irvin Velasquez-Mora*, Alicia Martínez-Rebollar*, Yesica I. Saavedra-Benitez*, Javier Ruiz-Ortega*,****

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Int. Internado Palmira S/N, C.P. 62490, Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos, México*
*( e-mail: { m22ce078, alicia.mr, yesica.sb, d20ce082}@ cenidet.tecnm.mx)*
*** Tecnológico Nacional de México/Torreón, Carr. Torreón-San Pedro Km 7.5, Ejido Anna, Torreón, Coahuila, México*

Resumen: El agua utilizada para fines agrícolas es un tema central en cualquier debate sobre los recursos hídricos y la seguridad alimentaria. En promedio, en la agricultura se ocupa el 70 % del agua que se extrae en el mundo. De esta manera, en la actividad agrícola es necesario la adopción de tecnologías emergentes para atender las necesidades alimentarias actuales haciendo un uso responsable de los recursos naturales, insumos y económicos. En este contexto, el Internet de las Cosas se está utilizando como tecnología emergente para el apoyo en la producción agrícola. Este trabajo de investigación propone el desarrollo de una arquitectura de Internet de las Cosas para recoger datos climáticos (humedad relativa, temperatura del aire, radiación solar y velocidad del viento) al interior de un invernadero a cada segundo. Los datos obtenidos serán procesados y trasformados en un modelo de datos FIWARE para ser enviados al *Orien Context Broker* (OCB) a intervalos de un minuto usando tecnología GSM. Las mediciones servirán para estimar la evapotranspiración de referencia al interior de un invernadero.

*Palabras claves:* Evapotranspiración, Internet de las cosas, Invernadero

## 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la actividad agrícola enfrenta el reto de asegurar el abasto de alimentos para la población, sin embargo, su dimensión está en función de la tasa de crecimiento poblacional, economía, infraestructura agrícola y recursos naturales de cada país. Según el sector agrícola en México, los datos estadísticos publicado por el departamento de investigación Statista, México es uno de los países con la mayor biodiversidad del mundo, contando con una superficie sembrada de 18,012,66 miles de hectáreas y 17.095,03 miles de hectáreas cosechadas en el año 2021 (Marvella Colín,2021). Gracias a las condiciones climáticas lo convierte en productor de una vasta variedad de cultivos. El sector agrícola mexicano es uno de los líderes en América Latina. México es el principal país productor de hortalizas en la región latinoamericana, y ocupa la segunda posición en el cultivo de frutas. Las actividades agrícolas también juegan un papel esencial en la economía del país azteca, con una participación en el producto interno bruto (PIB) de 2,5% y un flujo constante de inversión extranjera directa (IED), que en el primer trimestre de 2022 superó los 22 millones de dólares estadunidenses (Statista Research Department).

Por otro lado, los factores meteorológicos son determinantes para la producción agrícola por el efecto que tienen en los cultivos. Por lo tanto, el monitoreo ambiental en la agricultura es importante para lograr el incremento de la productividad (Charalampopoulos & Droulia, 2020). Los datos meteorológicos pueden obtenerse en campo utilizando métodos e instrumentos tradicionales, o una serie de instrumentos mecánicos. También pueden ser obtenidos por instrumentos electrónicos automáticos, como las estaciones meteorológicas automatizadas (Sivakumar, Gommes, 2000). y las redes inalámbricas de sensores (Abbasi, Islam,2014). Sin embargo, (Martínez Flores Medina, & Moreno Casillas, 2015) menciona que la mayoría de las estaciones meteorológicas automatizadas utilizadas en el país son modelos comerciales importados de países desarrollados generando dependencia tecnológica. Esta dependencia impacta los costos de la adquisición, transporte e importación, la instalación y el mantenimiento.

Una estación meteorológica automatizada comercial enfocada a la agricultura, con comunicación inalámbrica de 300 metros de alcance, tiene un costo aproximado de 1750USD después de incluir los impuestos, el envío y los gastos de aduana. Para una estación con alcance de 100 kilómetros, los costos rebasan los 5000 USD (Davis. Estaciones Davis. 2022).

Actualmente existen tecnologías emergentes como el internet de las cosas (IoT del inglés, Internet of Things) que permite

 ISSN en trámite

conectar elementos físicos cotidianos al Internet y ofrece un conjunto de aplicaciones que integran tecnologías como: computación en la nube, computación en la niebla, sistemas embebidos, sensores inalámbricos, inteligencia artificial y sistemas de monitoreo y predicción (Leonardo, & Olivo, 2015).

Existen muchas investigaciones en las que el uso de la tecnología del Internet de las cosas ha mostrado resultados prometedores, tal es el caso de la denominada "*agricultura inteligente*". El objetivo del presente trabajo de investigación es diseñar e implementar un módulo de monitoreo de variables climáticas de bajo costo al interior de un invernadero utilizando el paradigma del Internet de las cosas. Además, estimar la evapotranspiración de referencia basada en un modelo de *ETo* (resultado de la investigación realizada por Ruiz y colaboradores en 2021 con técnicas de programación genética en el Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico en colaboración con el Tecnológico Nacional de México campus Ensenada). Así mismo, los datos obtenidos serán procesados y trasformados en un modelo de datos FIWARE para ser enviados al *Orion Context Broker* a intervalos de un minuto usando tecnología GSM.

El artículo está organizado como sigue: la Sección 2 presenta el marco teórico, abordando los fundamentos teóricos utilizados en esta propuesta; la Sección 3 contiene algunos trabajos relacionados con la agricultura inteligente; En la sección 4 se presenta la metodología de solución; y la Sección 5 presenta conclusiones y trabajos futuros.

## 2. MARCO TEÓRICO

### *2.1 Internet de las cosas*

El concepto de internet de las cosas involucra la interconexión global de objetos por medio del uso de las tecnologías de Internet; así como otras tecnologías tales como identificación por radiofrecuencia (*RFID*), comunicación Máquina a Máquina (M2M), redes inalámbricas de sensores y actuadores (WSAN, por sus siglas en inglés), entre otras (Miorandi, Sicari, De Pellegrini, & Chlamtac, 2012).

La visión del internet de las cosas es permitir la interconexión entre el mundo físico y el virtual con el fin de habilitar una interacción en cualquier momento y en cualquier lugar (Sundmaeker, Guillemin, Friess, & Woelfflé, 2010). Dicha interacción es posible a través del uso de tecnologías habilitadoras que permitan identificarse y comunicarse fácilmente con los objetos y/o dispositivos e interactuar con ellos.

De esta manera, los pilares tecnológicos del internet de las cosas son las tecnologías de identificación, de redes de sensores y de comunicación inalámbrica.

Cada día, millones de objetos equipados con la conjunción de estas tecnologías son conectados a Internet (Cisco, 2019). Estos objetos son conocidos como objetos inteligentes o dispositivos del internet de las cosas.

### *2.2 Internet de las cosas en la agricultura*

El uso de internet de las cosas en la agricultura se describe como una tecnología destinada a organizar la gran variedad de sensores para formar redes, a través de los cuales se puede recolectar información de tierras aptas para la agricultura y análisis en tiempo real de los resultados trasmitidos a los agricultores para que puedan tomar mejores decisiones (Berlanga, 2010).

A nivel tecnológico, la aplicación del internet de las cosas en agricultura encuentra un gran aliado por parte de la computación en la nube para el tratamiento de datos (Kiran R. Badua, 2015).

Algunas ventajas del uso del internet de las cosas con redes de sensores (WSN del inglés Wireless sensor networks ) en agricultura según menciona (Ojha, Misra, Raghuwanshi, & agriculture, 2017), son: alta escalabilidad, bajo costo, largo tiempo de vida, sistemas reconfigurables, tolerancia a fallos, seguridad de información, gestión de tierras de cultivo, calidad de servicio (QoS del inglés quality of service) y administración dinámica. En el último decenio se observa que no hay mucho desarrollo tecnológico en el sector agropecuario.

Con la aparición del internet de las cosas y las técnicas de aprendizaje automático, el sector agropecuario ve una gran área de oportunidad para detonar la agricultura de precisión utilizando modelos predictivos.

### *2.3 FIWARE*

FIWARE es una plataforma, impulsada por la Unión Europea, para el desarrollo y despliegue global de aplicaciones de Internet del Futuro. FIWARE intenta proveer de una arquitectura totalmente abierta, pública y libre, así como de un conjunto de especificaciones que permita a los desarrolladores, proveedores de servicios, empresas y otras organizaciones desarrollar productos que satisfagan sus necesidades, sin dejar de ser abierta e innovadora. FIWARE ha sido adoptada por la iniciativa de la Unión Europea, Connecting Europe Facilities como el componente clave para la gestión de datos (Context Broker). Las aplicaciones de este componente lideran las aplicaciones de Open Data, Data Lakes y gestores de contexto (FIWARE. 2022).

### *2.4 Orion Context Brocker*

El principal y único componente obligatorio de cualquier plataforma o solución desarrollada con FIWARE es el Orion Context Broker (OCB), el cual aporta una función fundamental en cualquier solución inteligente: administrar la información de contexto, consultarla y actualizarla. El OCB permite la publicación de información de contexto por entidades (llamados productores de contexto) por ejemplo los sensores, de manera que la información de contexto publicada se encuentre disponible para otras entidades (consumidores de contexto) los cuales están interesados en procesar la información, por ejemplo,

 ISSN en trámite

una aplicación para smartphones que usa la información de los sensores. Los proveedores de contexto y los consumidores de contexto pueden ser cualquier aplicación o incluso otros componentes dentro de la plataforma (FIWARE.2022).

*2.5 Evapotranspiración de referencia*

La Evapotranspiración ($ET$) es la combinación de dos procesos separados el primero de ellos es la perdida de agua de la superficie del suelo por evaporación y el segundo proceso es la transpiración del cultivo. La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una forma sencilla de distinguir entre estos dos fenómenos, como se observa en la Figura 1. La evapotranspiración representa el componente vital del ciclo hidrológico y, por lo tanto, su estimación precisa es muy necesaria para la gestión de los recursos hídricos, el balance hidrológico de las cuencas y los sistemas de riego.

**Principales factores climáticos:**

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento. La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina $ETo$ (Allen, Pereira, 2006).

El método de FAO Penman-Monteith denominado (FAO56-PM) Eq. (1) es recomendado como el único método para determinar la evapotranspiración de referencia $ETo$. Sin embargo, en localidades donde sólo se cuenta con datos de temperatura la FAO recomienda el método de Hargreaves-Samani Eq. (2) (Allen, Pereira, 1998).

*Fig. 1. Evapotranspiración (ET)*

$$ET_o = \frac{0.408\,\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T_{mean}+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \qquad (1)$$

$$ET_o = 0.0023R_a\sqrt{T_{max} - T_{min}} * (T_{mean} + 17.8) \qquad (2)$$

Donde:

$\boldsymbol{ETo}$ representa la evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día), $\boldsymbol{\Delta}$ la pendiente de la curva de presión de vapor ($kPa/°C$), $\boldsymbol{Rn}$ la radiación solar neta superficial ($MJ\ m2dia{-}1$), $G$ la densidad de flujo térmico del suelo ($MJ\ m2dia{-}1$), $\boldsymbol{\gamma}$ representa la constante psicrométrica ($kPa°C{-}1$). $\boldsymbol{T_{mean}}$ la temperatura media del aire ($°C$), $\mathbf{u_2}$ la velocidad del viento a 2m ($m/s$), $\boldsymbol{e_s}$ la presión de vapor de saturación ($kPa$), $\boldsymbol{e_a}$ la presión de vapor real ($kPa$), $\boldsymbol{T_{max}}$ la temperatura máxima ($°C$), $Tmin$ la temperatura mínima ($°C$) y $\boldsymbol{R_a}$ representa la radiación extraterrestre ($MJ\ m2dia{-}1$).

Para nuestra investigación se utilizará el modelo (resultado de la investigación realizada por Ruiz y colaboradores en 2021 con técnicas de programación genética en el Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico en colaboración con el Tecnológico Nacional de México campus Ensenada) de la Eq. (3) para estimar la evapotranspiración de referencia ETo al interior de un invernadero.

$$ETo = 2ds + \log(e^oT_{min} + ds + \log(e^oT_{min})) + es_ea \qquad (3)$$

Donde:

**ds** representa la declinación solar (Rad), $\mathbf{e^oT_{min}}$ la presión de vapor a temperatura mínima (kPa) y $\mathbf{e_s_e_a}$ el déficit de la presión de vapor (kPa).

## 3. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se presenta algunos trabajos que implementan el paradigma del IoT en la agricultura inteligente.

**Sistema de gestión del riego:** La agricultura actual requiere un sistema mejorado de gestión del riego para optimizar el uso del agua y actividades relacionadas (Rain Machine, Shimizu, Vijay 2014). Cuatro factores que se utilizan popularmente en los sistemas de riego inteligentes, como la integración de los datos de previsión meteorológica en tiempo real, el control de los agricultores y la gestión de los recursos hídricos. El IoT está ganando popularidad constantemente en sistemas relacionados con la gestión del riego en todo el mundo.

**Control de la calidad del agua:** La colocación de nodos sensores con comunicación inalámbrica ayuda en la monitorización de la calidad del agua. Esta propuesta desarrolla una monitorización en tiempo real de la calidad del agua utilizando el IoT. El sistema mide parámetros físicos y químicos del agua como temperatura, pH, turbidez, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. Los datos se visualizan a través de una interfaz web mediante servicios en la nube (Paventhan et al: 2012).

**Monitoreo de las condiciones de un invernadero**: Invernadero y la agricultura están estrechamente relacionados entre sí. Los gases de efecto invernadero son los responsables de aumentar la temperatura del clima, y por lo tanto tiene un impacto directo en

 ISSN en trámite

la agricultura. Por otra parte, la emisión de gases de efecto invernadero depende del pH, la temperatura, CO2, etc. (HarvestGeek. 2022).

**Monitoreo del suelo:** La propiedad del suelo es crucial para el dominio agrícola. El conocimiento del suelo añade una ventaja a la producción agrícola (Jeyakkannan & Nagaraj, 2014) ha incorporado la tecnología 6LoWPAN con IoT para monitorear en tiempo real de forma remota las condiciones del suelo a través de una red de nodos sensores.

**Agricultura de Precisión con vehículo aéreo no tripulado:** La agricultura de precisión se puede implementar utilizando tecnologías avanzadas como UAV y Sistemas de Información Geográfica apoyada en sensores permite que plataformas IoT en la nube desplieguen inteligencia artificial a través de cálculos de ruta de vuelo para la detección de condiciones climáticas en el aire. Además, los procesos de monitoreo y diagnóstico dan soporte en tiempo real (Hawk, P.; A. 2022).

## 4. METODOLOGIA DE SOLUCIÓN

El paradigma IoT es tan amplio y cubre tantos aspectos que no existe una homogeneidad acerca de cuál debería ser el modelo a seguir. Con el IoT han surgido diferentes propuestas arquitectónicas entre las que podemos encontrar: la arquitectura de 3 capas, la arquitectura de 5 capas, la arquitectura de nube, la arquitectura de niebla y la arquitectura de computación de borde entre muchas otras.

En esta sección se presenta una propuesta de arquitectura de tres capas como se observa en la figura 2.

### *4.1 Capa de percepción*

La capa de percepción integra los diferentes sensores encargados de recoger los datos del entorno. Aquí se "*sienten*" los parámetros físicos. La capa está integrada por un microcontrolador Arduino, diferentes sensores analógicos digitales un display 16x2, la fuente de energía principal será la red eléctrica gubernamental. Sin embargo, en situaciones de cortes de energía contará con una batería de respaldo tipo Lipo.

- **Placa Arduino uno.** Arduino UNO es una placa basada en el microcontrolador ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 6 pueden ser usando con PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de 16Mhz, conexión USB, conector jack de alimentación, terminales para conexión ICSP y un botón de reseteo. Tiene toda la electrónica necesaria para que el microcontrolador opere, simplemente hay que conectarlo a la energía por el puerto USB ó con un transformador AC-DC.

- **Módulo Sim900.** El GPRS SIMCOM SIM900 GSM *Quad band GSM shield* es una tarjeta ultra compacta de comunicación inalámbrica. Además, es compatible con todos los modelos de Arduino con el formato UNO, es decir, que la puedes controlar con otros microcontroladores también. Por último, la tarjeta está basada en el módulo SIM900 GSM 4. El GPRS está configurado y controlado vía UART usando comandos AT. Ideal para sistemas remotos.

- **Sensor de temperatura y humedad relativa (DHT22).** Es un sensor digital de temperatura y humedad relativa de buen rendimiento y bajo costo. Integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos (no posee salida analógica).

- **Sensor de radiación solar Davis Instruments (6672).** El sensor de radiación solar mide la radiación solar global, esto es, la suma en el punto de medida de las componentes directa, difusa y reflejada. Está formado por un fotodiodo de silicio de alta precisión ubicado dentro de una carcasa plástica que proporciona un camino a las corrientes de aire para enfriar el interior por convección, minimizando el calentamiento del sensor. El anillo de corte proporciona una excelente respuesta al coseno. Cada sensor es calibrado contra un estándar secundario bajo luz natural. Los tornillos de montaje con muelles y el indicador de nivel permiten una rápida y precisa instalación del sensor. Incluye un cable de 0,6 metros de longitud. Para montarlo en un ISS de Vantage Pro2™ es necesario el soporte de montaje adicional.

- **Sensor de velocidad del viento YGC-FS.** El sensor de velocidad del viento de YGC-FS (transductor) adopta la estructura tradicional del sensor de velocidad del viento de tres Copas de viento, la copa de viento utiliza material ABS, alta resistencia, buen arranque. Con la función de relé, se puede basar el sensor de velocidad del viento directamente en el valor de velocidad del viento de otro equipo de control de conmutación, también puede emitir señales de velocidad del viento 485, señales de pulso y voltaje, puede ser ampliamente utilizado en barrera publicitaria, clima, Océano, medio ambiente, aeropuerto, puerto, laboratorio, Industria, agricultura, transporte y otros campos.

En la capa de percepción la tarjeta Aurdino recibirá la señal (analógica o digital) con intervalos de un segundo de los diferentes sensores instalados dentro del invernadero. Los datos obtenidos (parámetros físicos) serán procesados y trasformados en un modelo de datos FIWARE.

 ISSN en trámite

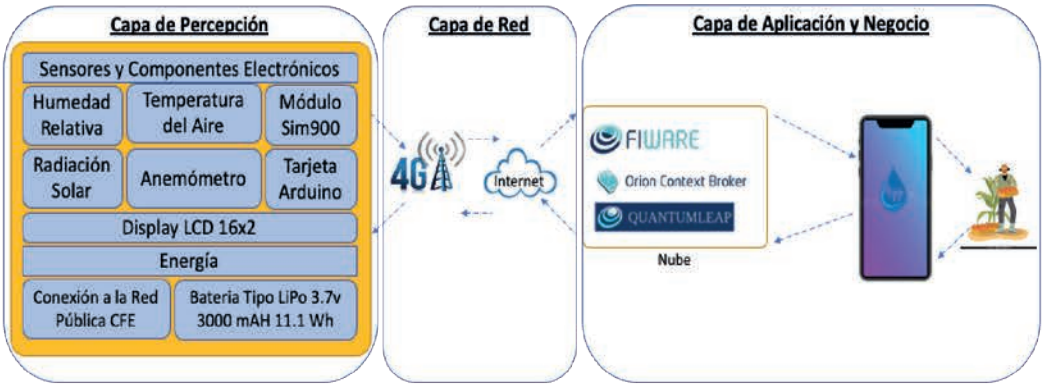



*Fig. 2. Arquitectura IoT de tres capas.*

### *4.2 Capa de Red*

La capa de red, será la responsable de realizar las negociaciones de conexión a la red celular para tener acceso a Internet. La capa de red se alimentará con los datos provenientes de la capa de percepción transformados en un modelo de datos para ser enviados al Orion Context Broker (OCB) a intervalos de un minuto usando tecnología GSM. Así mismo, esta capa tendrá la capacidad de recibir comandos vía GSM para ser ejecutados por el módulo de monitoreo y control, como, por ejemplo, encender la bomba de agua para ejecutar un riego no programado.

### *4.3 Capa de Aplicación y Negocio*

La capa de aplicación y negocio proporcionará servicios a través de una interfaz web. El usuario final podrá consultar datos climáticos por fecha, mostrando gráficas y/o tablas de cada parámetro consultado, así como el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La arquitectura propuesta servirá para implementar el modelo de ETo obtenido en la investigación de doctorado que se está realizando en el Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico en colaboración con el Tecnológico Nacional de México campus Ensenada. Aprovechando la oportunidad que ofrece la combinación de herramientas hardware y software libre, se busca desarrollar e implementar una arquitectura de bajo costo que utilice el paradigma del IoT.

La conectividad a través de la tecnología GSM es la mejor opción para lugares remotos donde no se cuenta con internet y los servicios en la nube hacen que el Internet de las cosas sea la mejor opción para nuestra arquitectura. Esta consta de tres capas de operación comprendiendo la capa de percepción, capa de red y capa de aplicación y negocio. Se busca ser una referencia para los agricultores e investigadores y la comunidad interesada en aprovechar las tecnologías emergentes basadas en IoT con la finalidad de buscar mejorar la productividad agrícola.

Como trabajo futuro, se pretende escalar la funcionalidad de la arquitectura, por ejemplo, se pretende incorporar una base de datos con diferentes cultivos y sus características y que la arquitectura configure los parámetros de (temperatura y humedad) requeridos por el cultivo establecido por el usuario.

## REFERENCIAS

Financiero, E. *productores del campo enfrentan problemas en sus actividades*. 2022; Available from: https://www.elfinanciero.com.mx/economia/productores-del- campo-enfrentan-problemas-en-sus-actividades/.

Statista, *El sector agrícola en México - Datos estadísticos.*

Seemann, J., et al., *Agrometeorology*. 2012: Springer Science & Business Media.

Sivakumar, M., et al., *Agrometeorology and sustainable agriculture.* 2000. 103(1-2): p. 11-26.

Abbasi, A.Z., et al., *A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture.* 2014. 36(2): p. 263-270.

Martínez, V.D.V., et al., *Desarrollo y validación de una estación meteorológica automatizada de bajo costo dirigida a agricultura.* 2015. 6(6): p. 1253-1264.

Davis. *Estaciones Davis*. 2022; Available from: https://www.estacionesdavis.es/es/.

Marca, A.C., et al. Cloud Computing para el internet de las cosas. Caso de estudio orientado a la agricultura de precisión. in 1 Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología UTMACH, Machala. 2015

Miorandi, D., Sicari, S., De Pellegrini, F., & Chlamtac, I. J. A. h. n. (2012). Internet of things: Vision, applications and research challenges. 10(7), 1497-1516.

Sundmaeker, H., Guillemin, P., Friess, P., & Woelfflé, S. J. C. o. E. R. P. o. t. I. o. T., European Commision. (2010). Vision and challenges for realising the Internet of Things. 3(3), 34-36.

Cisco, V. J. P. S., Lisboa. Disponível em:, Acesso em. (2019). Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022 White Paper. 17.Politécnica de València, 2020.

ISSN en trámite

Berlanga, A. J., & García-Peñalvo, F. J. . (2010). Proceedings of the 5th International Conference on ELearning. 502. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-662-487686

Kiran R. Badua, D. C. N. P. (2015). Internet of Things ( Iot ) and Cloud Computing for Agriculture in India. International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering, 2(12), 27–30.

Ojha, T., Misra, S., Raghuwanshi, N. S. J. C., & agriculture, e. i. (2017). Sensing-cloud: Leveraging the benefits for agricultural applications. 135, 96-107.

FIWARE. FIWARE. 2022; Available from: https://www.fiware.org/about-us/.

Allen, R.G., et al., Evapotranspiración del cultivo. 2006. 56.

Allen, R.G., et al., Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. 1998. 300(9): p. D05109.

RainMachine. 2014; Available from: http://www.amazon.com/gp/product/B00CT5PNBU?tag=iotenableddevices-20.

Shimizu, S., et al., Cloud services supporting plant factory production for the next generation of agricultural businesses. 2015. 64(1): p. 63-68.

Vijay, G., E.B.A. Bdira, and M.J.I.s.j. Ibnkahla, Cognition in wireless sensor networks: A perspective. 2010. 11(3): p. 582-592.

Paventhan, A., et al., Soil property monitoring using 6lowpan-enabled wireless sensor networks. 2012: p. 1-3.

HarvestGeek. Available from: http://www.harvestgeek.com/.

Jeyakkannan, N. and B.J.A.J.o.C. Nagaraj, *Online Monitoring of Geological Methane Storage and Leakage Based on Wireless Sensor Networks.* 2014. 26

Hawk, P.; Available from: https://www.precisionhawk.com/.

 ISSN en trámite

# REGLAS DE ASOCIACIÓN EN VARIABLES RELEVANTES EN DIFERENTES EVALUACIONES EN EXÁMENES DE MATEMÁTICAS.

**Jorge Ángel Pérez Rico*, Gilberto Lorenzo Martínez Luna**, Adolfo Guzmán Arenas ***, Arturo Heredia Márquez******

** Escuela Superior de Física y Matemáticas del I.P.N. (ESFM-IPN), CDMX, C. P. 07738 MÉXICO (Tel: 5521024346; correo: jorgep3044@gmail.com).*
*** Centro de Investigación en Computación del I.P.N. (CIC-IPN), CDMX, C. P. 07738 MÉXICO (Tel: 5563418281; correo: lluna@cic.ipn.mx).*
**** Centro de Investigación en Computación del I.P.N. (CIC-IPN), CDMX, C. P. 07738 MÉXICO (Tel: 5511410050; correo: a.guzmanarenas@gmail.com).*
***** Centro de Investigación en Computación del I.P.N. (CIC-IPN), CDMX, C. P. 07738 MÉXICO (Tel: 5511410050; correo: arturoheredia@live.com.mx).*

**Resumen:** Los exámenes de desempeño-contexto EXCALE y PLANEA nos permiten obtener información interesante de las variables relevantes o bien, de aquellas que están correlacionadas con el desempeño del alumno en el área de Matemáticas. Las evaluaciones de los años 2005, 2008, 2012, 2015 y 2017 muestran que el porcentaje de alumnos evaluados como *Por Debajo del Básico* y *Avanzado* tiene una tendencia positiva, mientras que el de los alumnos colocados en *Básico* y *Medio* tienen una tendencia negativa. Las reglas de asociación obtenidas de variables relevantes que se han mantenido a nivel nacional de los alumnos con un buen desempeño son constantes y existen patrones que se repiten con el paso de los años, como es el caso de la variable relevante "aspiración académica". Para estudiantes con desempeño *Medio y básico*, dicha regularidad no existe, además de observarse dificultades para la clasificación de estos alumnos con los algoritmos de clasificación J48 y Naive Bayes.

*Palabras clave:* Algoritmos de clasificación, Educación, Minería de datos, Reglas de asociación, Variables relevantes.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación (INEE), publicaba de manera periódica los resultados de evaluaciones en diferentes niveles de educación, como: preescolar, primaria, secundaria y media superior a nivel nacional. Los resultados de pruebas como EXCALE, PLANEA y otras realizadas por el mismo organismo, incluían el nivel de desempeño en la evaluación e información recopilada por un cuestionario de contexto (familia, tutores, académica y directores) para ser analizados por interesados en ellos. Parte de los datos, se usan en este trabajo.

**Tabla 1. Número de alumnos y escuelas evaluados por examen y año (Estudiantes - Escuelas)**

| Año / Nivel de Estudios | 3° de Preescolar | 3° de Primaria | 6° de Primaria | 3° de Secundaria | 3er año Media Superior |
|---|---|---|---|---|---|
| 2004-2005 | | | 14,619 –2,770 | 52,251–1,181 | |
| 2005-2006 | | 68,666 –2,973 | | | |
| 2006-2007 | 10,300–1091 | | 12,000-715 | | 70,888 –4,229 |
| 2007-2008 | | | | 88,198–3,300 | |
| 2008-2009 | | | 70,888 –4,229 | | |
| 2009-2010 | | 70,434 -4,196 | | | 13,118-264 |
| 2010-2011 | 14,256–1,451 | | | | |
| 2011-2012 | | | | 94,269–3,590 | |
| 2014-2015 | | | 104,204-3446 | 144,517-3,529 | |
| 2016-2017 | | | | 131662–3,398 | 117,700-2,319 |

 ISSN en trámite

En la Tabla 1, se dan estadísticas de las evaluaciones EXCALE y PLANEA realizadas de 2005 a 2017 y en la Tabla 2 podemos observar las áreas que fueron evaluadas en las 5 evaluaciones realizadas en el último año de secundaria (EXCALE 2005, 2008, 2012 y PLANEA 2015, 2017), en las cuales la sección de matemáticas se mantiene siempre incluida.

**Tabla 2. Áreas de conocimiento evaluadas en las cinco evaluaciones.**

| 2004-2005 | 2007-2008 | 2011-2012 | 2014-2015 | 2016-2017 |
|---|---|---|---|---|
| Matemáticas | Matemáticas | Matemáticas | Matemáticas | Matemáticas |
| Español | Español | Español | Lenguaje y comunicación | Lenguaje y comunicación |
| | Formación Cívica y Ética | Formación Cívica y Ética | | |
| | Biología | Ciencias | | |

*1.1 Objetivo*

La aplicación de la minería de datos a este conjunto de evaluaciones podría permitir encontrar patrones interesantes en la información y así poder describir poblaciones de interés o bien realizar la predicción del desempeño (avanzado, medio, básico y por debajo del básico) de un alumno.

Un posible conjunto de interés, es el de los alumnos que tuvieron un bajo rendimiento en la prueba. Para este conjunto, los expertos en educación pueden encontrar áreas de oportunidad para obtener mejores resultados o planear otro tipo de evaluaciones. Otro conjunto de interés es el de los estudiantes con un buen desempeño, del cual se podría tratar de replicar las características que comparten estos estudiantes con el fin de obtener un mejor resultado en las evaluaciones.

Este trabajo tiene como propósito la comparación de los niveles de soporte y confianza de las reglas de asociación obtenidas para los alumnos con buen desempeño para así determinar la existencia de patrones en este conjunto de alumnos.

*1.2 Estado del arte.*

Existen distintos trabajos con el enfoque a la predicción del éxito de los alumnos a nivel licenciatura y posgrado como lo son (Yu R.,2020) y (Zhao Y.,2020). Aunque también existen trabajos enfocados a la predicción de alumnos que se encuentran en riesgo de deserción, como (Orea V., 2016)

*1.2.1 Predicción del éxito.*

Tanto (Yu R.,2020) como (Zhao Y.,2020) tienen como propósito realizar la predicción del éxito universitario o el desempeño de los estudiantes en la Maestría en Ciencia de Datos.

**Tabla 3. Métodos de minería de datos utilizados en los artículos citados.**

| | (Yu R., 2020) | (Zhao Y., 2020) | (Orea V., 2016) |
|---|---|---|---|
| Algoritmos de clasificación utilizados | -Máquinas de vectores de soporte.<br>-Regresión logística.<br>-Árbol de decisiones.<br>-KNN.<br>-Naive Bayes.<br>-Red neuronal.<br>-Ensemble.<br>-Random Forest. | -Máquinas de vectores de soporte.<br>-Regresión logística.<br>-Random Forest. | -KNN.<br>-Árboles de decisión. |
| Selección de variables | Sí | Sí | Sí |

La población estudiada en el primer artículo es alrededor de 2000 alumnos y su objetivo es el realizar predicciones en el éxito a corto y largo plazo utilizando información académica, de sistemas de gestión de aprendizaje y encuestas de actividades no cognitivas. Aquí se obtienen buenos resultados en la combinación de los datos de sistemas de gestión de aprendizaje e información institucional.

Para el segundo artículo citado son utilizados alrededor de 132 alumnos que ingresaron a un programa de Maestría en Ciencia de Datos, con el objetivo de predecir el desempeño de los alumnos utilizando la información recolectada en el proceso de admisión, como lo es el puntaje en el examen de admisión a maestría GRE, su nivel de inglés, su promedio de licenciatura, país de origen, área de estudios de origen y el ranking mundial de su universidad de origen. Utilizan distintos algoritmos de clasificación listados en la Tabla 3. De estos, los mejores resultados son obtenidos para los algoritmos de Random Forest y Ensemble.

*1.2.2 Predicción de la deserción académica.*

El tercer artículo citado se enfoca a la deserción académica y se estudian alrededor de 723 alumnos. Parte de bla información analizada es el examen de ingreso a licenciatura EXANI-II, información socioeconómica, nivel de inglés y promedio de bachillerato. Finalmente, sus resultados son buenos utilizando

 ISSN en trámite

el algoritmo de KNN y fue posible crear una herramienta para determinar qué alumnos podrían estar en riesgo de deserción.

*1.3 Variables relevantes en exámenes de desempeño-contexto*

Las variables relevantes son aquellas variables que mantienen correlación con una variable de interés (en nuestro caso el desempeño en la evaluación), de tal forma que el peso de estas variables es alto en la descripción de un conjunto de datos.

Definimos a una regla de asociación como una implicación de la forma:

Puntaje en Matemáticas: *Avanzado* →Aspiración A.: *Posgrado.*

Siendo la parte izquierda el *Antecedente* y la derecha el *Consecuente*. En este ejemplo, Puntaje o desempeño en Matemáticas: *Avanzado* corresponde al antecedente y Aspiración Académica: *Posgrado* al consecuente.

El *soporte* de la regla se define como la cantidad de veces (o porcentaje de la población) en la que se observa esta regla, mientras que la *confianza* es la probabilidad de que en un elemento del conjunto de la parte izquierda se observe esta regla.

El estudio de las reglas de asociación nos permite identificar información que podría ser relevante para determinadas poblaciones de interés, permitiéndonos describir patrones en la información. Esto sumado a la visualización de diagramas como el SANKEY (ver Figura 1), nos permitirá identificar la correspondencia entre las variables elegidas. Parte de este trabajo ya fue realizado en (Martínez G., 2022) para la prueba PLANEA 2015.

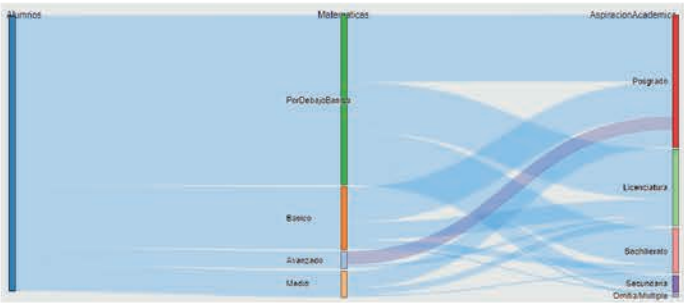



Figura 1. Diagrama SANKEY de las variables Matemáticas y Aspiración Académica.

2. MÉTODOS

El tratamiento para la integración de los resultados de PLANEA 2017 (INEE, 2022) con los de las evaluaciones anteriores de EXCALE y PLANEA ya existentes en la herramienta de ANCONE (ANCONE, 2022), fue acorde al KDD o Descubrimiento de Conocimiento en Bases de Datos, el cual se muestra en la Figura 2. En la Tabla 4 se muestran los detalles de las evaluaciones ya disponibles.

Para poner en disposición la prueba PLANEA 2017 fue importante considerar en la limpieza de datos la comparación entre variables ya integradas en ANCONE y las presentadas en los diccionarios de datos publicados por el INEE. Esto nos garantiza la coherencia de las variables a estudiar dentro de la herramienta permitiendo, además, facilitar la integración de la información a la base de datos ya existente.

Figura 2. Proceso de KDD

**Tabla 4. Número de variables por evaluación.**

| Año | 2005 | 2008 | 2012 | 2015 | 2017 |
|---|---|---|---|---|---|
| Evaluados | 52,251 | 88,198 | 94,269 | 144,517 | 131,662 |
| Evaluados en Área | 52,092 | 23,967 | 27,009 | 144,517 | 131,662 |
| Variables originales | 486 | 403 | 278 | 878 | 998 |
| Variables elegidas | 253 | 282 | 146 | 232 | 246 |
| Estados evaluados | 32 | 32 | 30 | 30 | 30 |
| Preguntas de Contexto | 108 | 80 | 38 | 232 | 232 |

La selección de aquellos atributos correlacionados (Hall M.A., 1997) nos permite reducir el volumen de la información trabajada (véase Tabla 4) y trabajar únicamente con información que podría ser relevante en nuestro estudio. El algoritmo *Correlation-based Feature Selection* incluido en el software Weka 3.8.6 fue la herramienta utilizada para la selección de variables relevantes a nivel nacional o por estado. Debido a la naturaleza de las preguntas (cuestionario de

 ISSN en trámite

contexto), las variables relevantes por estado o a nivel nacional no son necesariamente las mismas.

Una vez integrada la información en ANCONE, la herramienta nos muestra aquellas variables que son relevantes a nivel nacional o bien por estado y es posible hacer múltiples combinaciones para encontrar información interesante.

Mediante el algoritmo apriori ANCONE es capaz de obtener reglas de asociación, por lo que sólo es necesario seleccionar las variables que son de interés (antecedentes y consecuente) y los valores mínimos de Soporte y Confianza. Una vez elegida las variables y configuraciones deseadas, ANCONE nos proporcionará las reglas de asociación encontradas con sus respectivos niveles de Soporte y Confianza, un diagrama SANKEY y un *scatter plot* de Confianza vs Soporte de las reglas mostradas.

Para el fin de este estudio nos apoyaremos del diagrama SANKEY (Figura 1) o de ejes paralelos pues nos permite observar la distribución de la información entre las variables y con esto poder reconfigurar los niveles de Soporte y Confianza mínimos.

Lo anterior es importante pues debido al bajo porcentaje de alumnos que obtuvieron *Avanzado* en Matemáticas, es necesario configurar los valores de Soporte y Confianza al mínimo para poder observar algunas de las reglas de asociación que podrían ser interesantes.

Debido al interés de realizar una predicción del desempeño de los alumnos, hemos aplicado los algoritmos de clasificación J48 y Naive Bayes al dataset mediante validación cruzada que ofrece Weka 3.8.6. Los resultados se pueden observar en la siguiente sección.

## 3. DISCUSIÓN

La distribución de los cuatro valores del desempeño en Matemáticas (eje X) obtenido por los alumnos de tercero de secundaria en las cinco evaluaciones analizadas de EXCALE y PLANEA (barras de colores) se muestran en la Figura 3, donde se muestra el porcentaje de alumnos de cada nivel. Podemos destacar que aquellos estudiantes que obtienen *Por Debajo del Básico* y *Avanzado* aumentan en porcentaje con el paso de los años, mientras que lo contrario sucede con los que se encuentran en los niveles *Básico* y *Medio*.

El análisis de las reglas de asociación puede ser poco relevante si son seleccionadas variables que no sean relevantes o bien. Para poder realizar la selección de variables que podrían mostrarnos información interesante, hemos hecho la comparación de la tabla 5, donde observamos aquellas variables que se repitieron por lo menos en 2 de las evaluaciones analizadas.

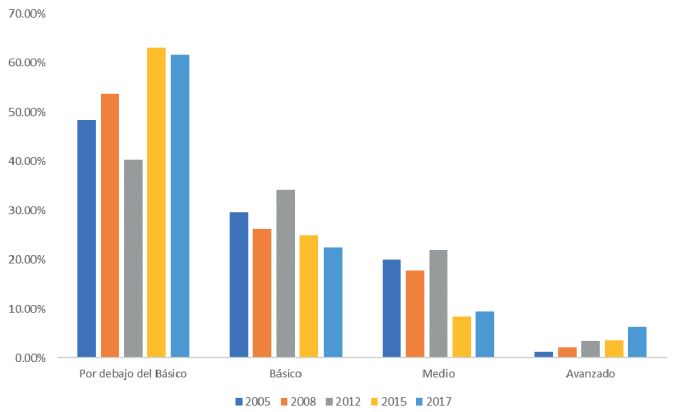



Figura 3. Porcentaje de alumnos por nivel por evaluación.

**Tabla 5. Variables relevantes repetidas a nivel nacional.**

| Número de evaluaciones | 5 | 3 | 2 |
|---|---|---|---|
| Variables repetidas | 1. Aspiración Académica<br>2. Tipo de escuela | 1. Estudios de los Padres<br>2. Cantidad Libros en Casa | 1.Turno<br>2. Computadora en Casa<br>3. Veces repitió grado |

Revisando una de las variables relevantes – aspiración académica - que apareció en las cinco evaluaciones, y sus cinco valores de esta variable, en específico dos – Licenciatura y Posgrado -, junto con el diagrama SANKY, se observó que estos valores son los que siempre contribuyen al mejor desempeño – *Avanzado* -, por esta contribución se desarrolló la gráfica de la Figura 4

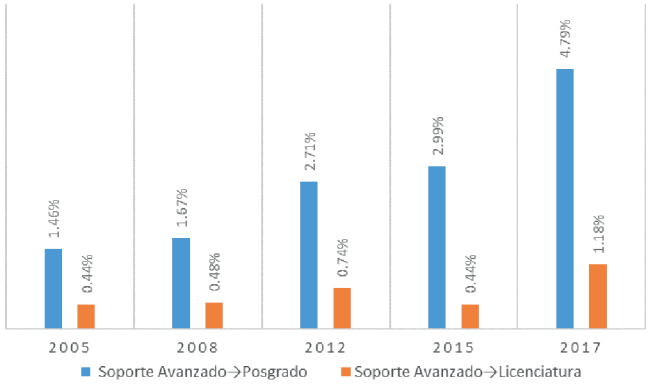



Figura 4. Niveles de soporte de las reglas Avanzado→Posgrado y Avanzado→Licenciatura

La Figura 4, indica que los niveles de soporte de las reglas *Avanzado→Posgrado* y *Avanzado→Licenciatura* en cada evaluación tiene tendencia positiva en porcentaje, es decir, cada

 ISSN en trámite

año mejora el porcentaje de alumnos que obtuvieron este nivel de logro.

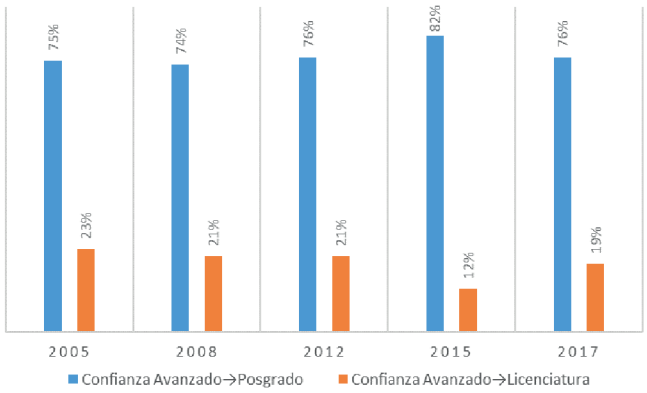



Figura 5. Niveles de confianza de las reglas Avanzado→Posgrado y Avanzado→Licenciatura

Por su parte, la Figura 5 nos muestra que los niveles de la confianza en las reglas de asociación para la aspiración de posgrado se han mantenido con los años, mientras la confianza en las reglas de asociación con la aspiración de licenciatura ha decrecido con el tiempo.

Ahora, si se observa el resultado de alumnos con desempeño *Medio* de la Figura 6, la tendencia en el porcentaje de alumnos es totalmente contraria reduciendo aproximadamente un 50% entre la primera evaluación y la última. La confianza en las reglas de *Medio→Posgrado* y de *Medio→Licenciatura* no tiene un comportamiento preciso (ver Figura 7).

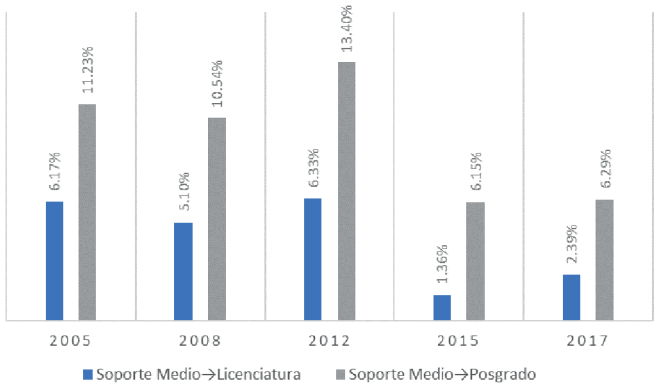



Figura 6. Niveles de soporte de las reglas Medio→Posgrado y Medio→Licenciatura

La tendencia en la disminución de alumnos que se colocan en el nivel *Medio* y la poca estabilidad en los niveles de confianza de las reglas de asociación de la Figura 7 nos permiten establecer la hipótesis de que este conjunto de datos podría contener anomalías, lo que podría observarse en la aplicación de algoritmos de clasificación.

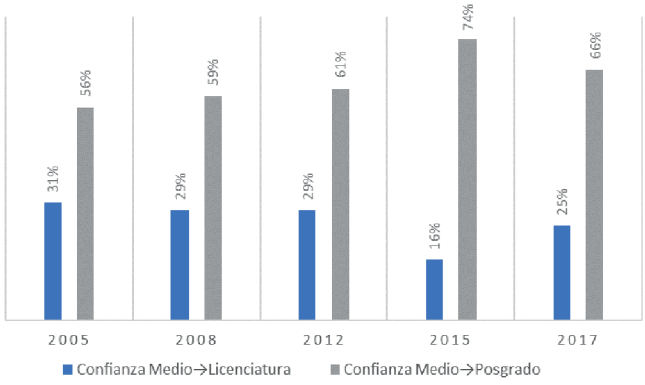



Figura 7. Niveles de confianza de las reglas Medio→Posgrado y Medio→Licenciatura

En el artículo (Martínez G., 2022) fueron aplicados los algoritmos de clasificación Naive Bayes y J48 para el conjunto con todas las variables y el que contenía únicamente variables relevantes. Como parte del seguimiento, hemos utilizado este algoritmo para el dataset de PLANEA 2017 tanto para el que contiene todas las variables como para aquel que utiliza únicamente las 20 variables relevantes a nivel nacional. Los resultados se pueden observar en la Tabla 6.

Se obtiene una mejor eficiencia en la clasificación para el conjunto con reducción de variables, por lo que si observamos las matrices de confusión de las Tablas 7 y 8 podemos observar en los ejes las clases y la población de cada una de estas. En la diagonal encontraremos el número de instancias que fueron correctamente clasificadas.

**Tabla 6. Resultados de la clasificación utilizando todas las variables y las variables relevantes.**

| Algoritmo | Eficiencia utilizando todas las variables. | Eficiencia con 20 variables relevantes. |
|---|---|---|
| Naive Bayes | 51.04 | 57.35 |
| J48 | 58.91 | 61.33 |

El modelo de Naive Bayes de la Tabla 7 nos muestra que existe una mejor clasificación para los niveles *Por Debajo del Básico* y *Avanzado* que para los dos niveles restantes. Para los cuales se logra clasificar únicamente el 20% para *Básico* y 4.5% para *Medio*.

Por su parte, el modelo generado para J48 consigue una mejor clasificación en la categoría *Por Debajo del Básico* que para cualquiera de las otras. Sin embargo, podemos relevar nuevamente que existe una muy baja eficiencia de clasificación en los niveles *Básico* y *Medio* para los cuales se clasifican correctamente sólo un 10.12% y 6.29% respectivamente.

 ISSN en trámite

**Tabla 7. Matriz de confusión del clasificador Naive Bayes usando reducción de variables.**

| | Por Debajo del Básico | Básico | Medio | Avanzado |
|---|---|---|---|---|
| Por Debajo del Básico (78393) | 62498 | 8897 | 1272 | 5726 |
| Básico (28642) | 15882 | 5701 | 957 | 6102 |
| Medio (12081) | 4733 | 2642 | 552 | 4154 |
| Avanzado (8020) | 1921 | 1617 | 318 | 4164 |

**Tabla 8. Matriz de confusión del clasificador J48 usando reducción de variables.**

| | Por Debajo del Básico | Básico | Medio | Avanzado |
|---|---|---|---|---|
| Por Debajo del Básico (78393) | 73100 | 3252 | 1130 | 911 |
| Básico (28642) | 23221 | 2899 | 1228 | 1294 |
| Medio (12081) | 8446 | 1867 | 760 | 1008 |
| Avanzado (8020) | 4394 | 1619 | 789 | 1218 |

Ambos modelos nos ofrecen muy baja eficiencia en la clasificación del nivel Medio, esto nos indica que la información podría estar aún muy mezclada, o bien, faltan variables que nos permitan realizar una mejor clasificación.

## 4. CONCLUSIONES

A lo largo de los años se pueden observar variables que se mantienen relevantes como lo es la aspiración académica. Esta variable nos muestra una tendencia en el alza de los niveles de soporte de las reglas de asociación *Avanzado→Posgrado* y *Avanzado→Licenciatura*; mientras que los niveles de confianza se mostraron bien comportados.

El esperar un comportamiento parecido para el nivel "*Medio* ", nos permitió detectar la irregularidad en los resultados en este conjunto, que una vez analizadas las matrices de confusión de los modelos de Naive Bayes y J48 en el dataset reducido, nos permitió detectar que este conjunto en particular obtiene una mala clasificación para ambos modelos.

En estos conjuntos de resultados de evaluaciones a nivel nacional en México, no han sido estudiados o hecho estudios relacionados a la Ciencia de Datos o uso de la Minería de Datos, tal vez falta de interés o falta de conocimiento de su publicación. Por lo anterior no hay forma de corroborar los resultados en cuanto al resultado de predicción o clasificación, por lo tanto una oportunidad para caracterizar estos conjuntos de datos e indicar su complejidad de caracterizar.

Sin embargo, este estudio permite identificar algunas de las preguntas de contexto que valdrían la pena incluir en futuras evaluaciones, las cuales pueden obtener nueva información que permita mejorar la eficiencia en la predicción y por lo tanto, obtener reglas de asociación de alto impacto para la posibilidad de planeación de políticas educativas de calidad a nivel nacional.

## REFERENCIAS

ANCONE. *Análisis de Contexto en Evaluaciones.* Disponible en: http://148.204.64.166/ancone/inicio.php# [Consultado 1 oct. 2022].

INEE. *Bases de datos*. Disponible en: https://www.inee.edu.mx/evaluaciones/bases-de-datos/ [Consultado 16 junio. 2022].

Hall M. A., Smith L. A. (1997). Feature Subset Selection: A Correlation Based Filter Approach. International Conference on Neural Information Processing and Intelligent Information Systems, 855-858.

Han, J., Kamber M., Pei J., *Data Mining: Concepts and Techniques*, 3rd ed. The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems Morgan Kaufmann Publishers, July 2011. ISBN 978-0123814791.

Martínez G., Guzmán A., Heredia A. (2022), Aplicación de la minería de datos en la relación del contexto - desempeño en matemáticas, en último año de secundaria. XVIII *Semana Nacional de Ingeniería Electrónica 2022 (SENIE 2022).*

Orea V., Vargas S., García A. (2016), Minería de Datos: predicción de la deserción escolar mediante el algoritmo de árboles de decisión y algoritmo de los k vecinos más cercanos.

Yu R. Li Q., Fischer C., Doroudi S. Xu D. (2020). Towards Accurate and Fair Prediction of College Success: Evaluating Different Sources of Student Data. *The 13th International Conference on Educational Data Mining (EDM 2020)*, 292-301.

Zhao Y., Xu Q., Chen M., Weiss G. (2020). Predicting Student Performance in a Master of Data Science Program using Admissions Data. *The 13th International Conference on Educational Data Mining (EDM 2020)*, 325-333.

 ISSN en trámite

# Percepción remota por medio de UAV en tiempo real: El escenario actual de la literatura

**Blandy Pamplona Solis, Isaias May Canche, Agustin Esquivel Pat, Raquel Saavedra Vargas, Manuel Zapata Encalada**

*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chetumal*
*Departamento de Sistemas y Computación,*
*Chetumal, Q. Roo, México;*
*e-mail:{blandy.ps, isaias.mc, agustin.ep, raquel.sv y manuel.zp }@chetumal.tecnm.mx*

**Resumen:** El inicio de un proceso de investigación tiene como base fundamental la revisión bibliográfica del tema a desarrollar, es sustento del conocimiento científico. Los estudios bibliométricos son métodos que apoyan la búsqueda de la literatura adecuada que es primordial para coadyuvar a la obtención de resultados, este trabajo presenta el análisis del estado del arte de la percepción remota "inteligente" mediante el uso de drones en tiempo real, localizando en las bases de datos los artículos generados durante el periodo de 1960-2022, este análisis proporciona una visión hacia donde se deberán enfocar los esfuerzos o los nichos de oportunidad que se podrán explotar con la finalidad de generar aportaciones en el área de estudio. Es al final de cuentas una manera de analizar el estado del arte de cualquier tópico a investigar.

***Palabras claves:*** Percepción remota, UAV, deep learning.

## 1. INTRODUCCIÓN

La percepción remota es utilizada para recolectar datos obtenidos a través de sensores que no están en contacto directo con el objeto de estudio y por medio del análisis de esos datos se obtiene información de interés (Esser C. and Ortega B., 2003; Lira, 1995). Esta disciplina se aplica en diversos campos de investigación como la astronomía, medicina, ecología, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y en los últimos años se ha incursionado su aplicación en la agricultura (Matese et al., 2015; Yang et al., 2019).

En la agricultura, la percepción remota se ha beneficiado de las ventajas de los UAV (del inglés unmanned aerial vehicle) para monitorear los cultivos, la utilización de los drones permite la obtención de información con alta resolución espacial con bajos costos de operación, por lo que el desarrollo de aplicaciones para este campo en tiempo real por medio del uso de técnicas de inteligencia artificial es altamente viable (Ellithy et al., 2020; Wang et al., 2021).

Contextualizar los trabajos que han sido desarrollados en el campo de la percepción remota utilizando vehículos aéreos no tripulados para la obtención de imágenes con alta resolución y conocer las técnicas de análisis de datos en tiempo real, con la finalidad de asegurar y dar certeza a que el proceso de investigación incluya información relevante es crucial realizar la revisión de literatura que engloba la temática planteada.

Presentar el escenario actual de la literatura desarrollada en el campo de la percepción remota por medio de drones en tiempo real, a través de un estudio bibliométrico, es el objetivo del presente documento; esto con la finalidad de planear las estrategias que permitan dar el soporte científico formal a las nuevas investigaciones en el área.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis de la literatura se realizó por medio de búsquedas en las bases de datos de Scopus y WoS, las cuales son consideradas las de mayor alcance debido al número de documentos indexados en ellas, para el caso que este documento reporta, la búsqueda tiene un periodo de 1960 a la 2022.

Los términos que se utilizaron en la consulta fueron "remote sensing", "unmanned aerial vehicle" y "real time", en donde se consideraron de igual manera frases o palabras que son sinónimos en la literatura, como el caso de "drone" o "UAV" para definir a los vehículos aéreos no tripulados.

Los términos mencionados en el párrafo anterior se consultaron en las bases de datos en los apartados de título, resumen y palabras claves de cada uno de los artículos contenidos en los

 ISSN en trámite

repositorios, con lo cual se obtuvieron para cada una de las bases de datos las siguientes consultas:

1. **Para WoS:** *((TS=("remote sensing" or "RS")) AND TS=("deep learning")) AND TS=(drone or UAV or "unmanned aerial vehicle" ) AND TS=("real time" )*

2. **Para Scopus:** *( TITLE-ABS-KEY ( "remote sensing" OR "RS" ) AND TITLE-ABS-KEY ( "deep learning" ) AND TITLE-ABS-KEY ( drone OR uav OR "unmanned aerial vehicle" ) AND TITLE-ABS-KEY ( "real time" ) )*

Donde:

**TS** = Topic que significa que la búsqueda se realiza en los campos de título, resumen y palabras claves (WoS, n.d.).

**TITLE-ABS-KEY** = la búsqueda se realiza en los campos de título, resumen y palabras claves (Scopus, 2021).

Las consultas se ejecutaron en cada una de las bases de datos, reportando en cada caso 65 documentos en Scopus y 30 en WoS. Donde, se detectaron 25 documentos duplicados en los índices de las bases de datos, por lo que se procedió a descartarlos, quedando un total de 70 elementos.

Una vez que se han obtenido el listado de los documentos, el siguiente paso es el análisis de los metadatos por medio de software especializado para construir redes bibliométricas basadas en citación, coautoría, co-citación y co-ocurrencia de términos que son extraídos de los textos científicos (Gómez-Luna *et al.*, 2014). En este trabajo, el software VOSviewer (van Eck and Waltman, 2022) fue utilizado como herramienta de análisis.

## 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El mapa de relaciones de co-ocurrencia de los términos muestra los elementos más importantes que aparecen en los documentos científicos que se analizan, en la Fig. 1 se muestran las principales frases y términos utilizados en el campo de investigación.

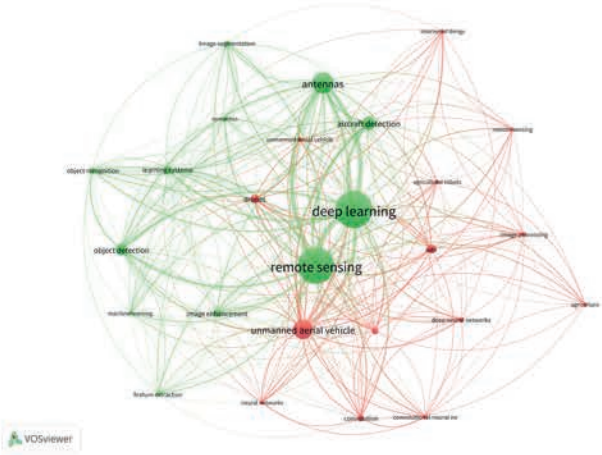



*Fig. 1. Mapa de co-ocurrencia de términos de la literatura científica.*

Las publicaciones en el área son recientes, ya que los primeros documentos fueron publicados en el año 2017, lo que significa que es un campo de estudio reciente, donde es posible realizar aportaciones que coadyuven al desarrollo del área de interés del grupo de trabajo (Fig. 2). En la Fig. 2 se puede observar la tendencia exponencial de los artículos publicados, por lo que es de esperar que el desarrollo de nuevas investigaciones siga creciendo en los próximos años.

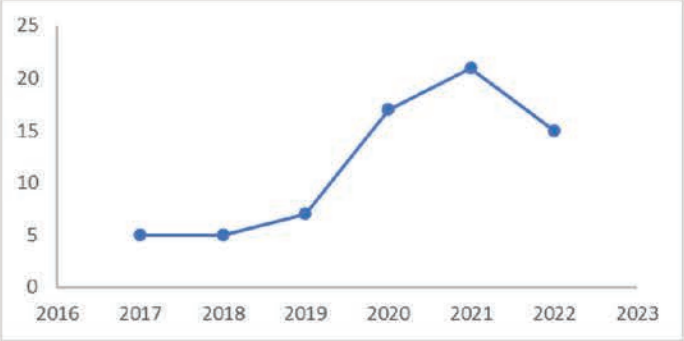



*Fig. 2. Número de publicaciones por año.*

En lo que respecta a la aportación por país, los hallazgos muestran que los artículos provienen de 24 países, de los cuales destacan: China, India y Estados Unidos tienen una producción mayor a 9 artículos durante estos años. Asimismo, China triplica el número de artículos que se han publicado, como se puede observar en la Figura 3, lo que corresponde al 42.8% del total de documentos generados en estos años.

ISSN en trámite

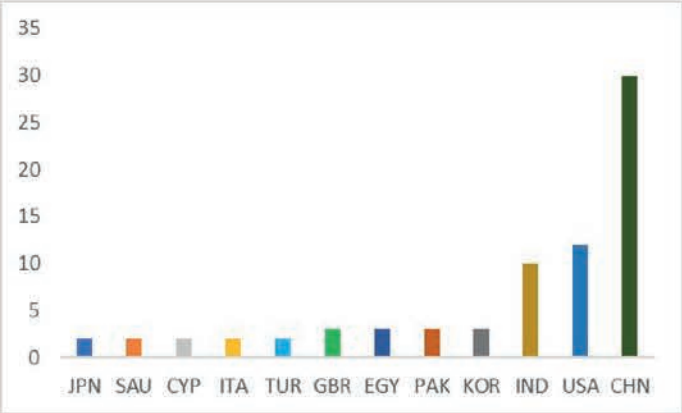



*Fig. 3. Número de publicaciones por país.*

El mapa de colaboración entre los autores de los artículos se presenta en la Fig. 4, se muestra que no existe una fuerte relación entre los 24 países, la coautoría se presenta en dos clusters con siete y tres países, mientras que las publicaciones que quedan han sido realizadas en colaboración con integrantes del mismo país; este comportamiento se debe principalmente a que el área de estudio tiene una producción limitada, adicionalmente que está en desarrollo.

Asimismo, este análisis de coautoría nos proporciona información pertinente para establecer redes de colaboración con autores de países que tienen un desarrollo mayor en el área de investigación.

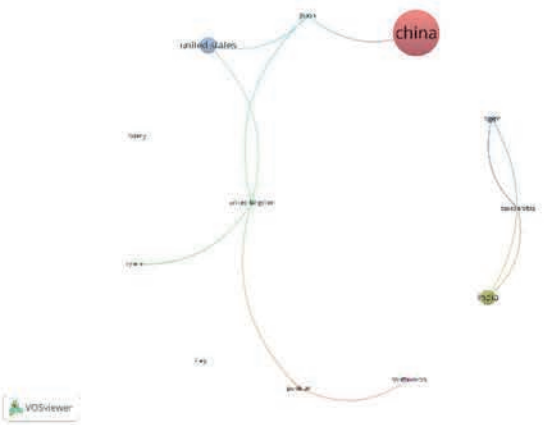



*Fig. 4. Mapa de coautoría desde la relación de los países.*

Se pudo observar que del total de 269 autores sólo 24 de ellos cuentan con 2 publicaciones, además que se encontró que sólo un autor cuenta con 3 publicaciones en el área.

En la Tabla 1 se enumeran los artículos sobresalientes respecto al número de veces que han sido citados, por lo cual esta lista es un apoyo en la búsqueda de literatura en el área, a partir de la información de los autores y artículos más relevantes, se podrá trabajar con la revisión sistemática de la literatura con un proceso más adecuado.

**Tabla 1. Autores más citados en la temática de investigación**

| Título - Autor | Citado por |
|---|---|
| A review on IoT deep learning UAV systems for autonomous obstacle detection and collision avoidance (Fraga-Lamas et al., 2019) | 53 |
| Fast vehicle detection in UAV images (Tang et al., 2017) | 44 |
| A near real-time deep learning approach for detecting rice phenology based on UAV images (Yang et al., 2020) | 44 |
| UFCN: a fully convolutional neural network for road extraction in RGB imagery acquired by remote sensing from an unmanned aerial vehicle (Kestur et al., 2018) | 39 |
| Real-time detection of ground objects based on unmanned aerial vehicle remote sensing with deep learning: Application in excavator detection for pipeline safety (Meng et al., 2020) | 32 |
| SSSDET: Simple Short and Shallow Network for Resource Efficient Vehicle Detection in Aerial Scenes (Mandal et al., 2019) | 26 |
| A Multi-Modal Approach for Crop Health Mapping Using Low Altitude Remote Sensing, Internet of Things (IoT) and Machine Learning (Shafi et al., 2020) | 24 |
| Adopting deep learning methods for airborne RGB fluvial scene classification (Carbonneau et al., 2020) | 24 |
| EmergencyNet: Efficient Aerial Image Classification for Drone-Based Emergency Monitoring Using Atrous Convolutional Feature Fusion (Kyrkou & Theocharides, 2020) | 23 |
| Real-time scene understanding for UAV imagery based on deep convolutional neural networks (Sheppard & Rahnemoonfar, 2017) | 22 |
| Improved crop row detection with deep neural network for early-season maize stand count in UAV imagery (Koubaa et al., 2020) | 16 |
| Deepbrain: Experimental evaluation of cloud-based computation offloadingand edge computing in the internet-of-drones for deep learning applications (Pang et al., 2020) | 16 |
| A Deep-Learning-Based Sea Search and Rescue Algorithm by UAV Remote Sensing (Wang et al., 2018) | 15 |
| UAV real-time monitoring for forest pest based on deep learning (Sun et al., 2018) | 15 |
| MOR-UAV: A Benchmark Dataset and Baselines for Moving Object Recognition in UAV Videos (Mandal et al., 2020) | 14 |
| Smart farming for improving agricultural management (Mohamed et al., 2021) | 13 |
| Informed Region Selection for Efficient UAV-based Object Detectors: Altitude-aware Vehicle Detection with CyCAR Dataset (Kouris et al., 2019) | 12 |

 ISSN en trámite

| | |
|---|---|
| Lightweight semantic segmentation network for real-time weed mapping using unmanned aerial vehicles (Deng et al., 2020) | 12 |
| AoI-Energy-Aware UAV-Assisted Data Collection for IoT Networks: A Deep Reinforcement Learning Method (Sun et al., 2021) | 11 |
| Real-time recognition of spraying area for UAV sprayers using a deep learning approach (Khan et al., 2021) | 11 |
| Deep Learning for Unmanned Aerial Vehicle-Based Object Detection and Tracking: A Survey (Xin et al., 2022) | 9 |

El análisis bibliométrico realizado en este trabajo es uno de los primeros pasos en el proceso de investigación, por medio de los resultados se establece una ruta para realizar el estudio de las aportaciones de los principales autores en el área. Determinar qué estudios o proyectos impactan directamente a las investigaciones requiere compromiso, sentido crítico y análisis profundo de los contenidos de cada uno de ellos.

De igual manera para realizar la selección de la literatura apropiada es necesario tener definida la temática de la investigación, ya que, si observamos el listado de la Tabla 1, existe una concordancia en el uso de los términos "percepción remota", "drones" y "*deep learning*". Sin embargo, dependerá de la particularidad de la investigación para tener los referentes idóneos, por ejemplo, si nuestro tema de investigación es la aplicación de la percepción remota por medio de drones en tiempo real para la detección de plagas en cultivo de caña, se tomaría como referentes iniciales a (Yang et al., 2020), (Shafi et al., 2020), (Koubaa et al., 2020), (Sun et al., 2018), (Mohamed et al., 2021) y (Deng et al., 2020) para iniciar el proceso de revisión sistemática de los contenidos de estos autores.

Por lo cual la Tabla 1 es un referente del estado del arte de primera mano y su respectiva lectura a profundidad permitirá tener una clara idea del alcance y por qué no, acotar o ampliar el impacto de la investigación que se pretende realizar.

## 3. CONCLUSIONES

La percepción remota, en los últimos años ha retomado su valía y mejorado la resolución de sus resultados, al incluir el uso de los drones.

Esto hace que las aplicaciones sean puntuales en cuanto a la solución de problemas, es decir dar soluciones personalizadas, como puede ser aportar beneficios en la agricultura.

El estado del arte, que se debe realizar en cualquier trabajo de investigación está cambiando el quehacer científico, ya que es posible la utilización de herramientas que permitan tener un acercamiento a los tópicos específicos y seleccionar los artículos relevantes en el área de interés.

La convergencia de las tecnologías nos acerca a mover los que haceres científicos a una personalización de las soluciones con un costo menor cada día, esto sin duda alguna nos detonará una industria 5.0, ciencia con soluciones personalizadas.

## REFERENCIAS

Carbonneau, P.E., Dugdale, S.J., Breckon, T.P., Dietrich, J.T., Fonstad, M.A., Miyamoto, H. and Woodget, A.S. (2020), "Adopting deep learning methods for airborne RGB fluvial scene classification", *Remote Sensing of Environment*, Elsevier Inc., Vol. 251, available at:https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112107.

Deng, J., Zhong, Z., Huang, H., Lan, Y., Han, Y. and Zhang, Y. (2020), "Lightweight semantic segmentation network for real-time weed mapping using unmanned aerial vehicles", *Applied Sciences (Switzerland)*, MDPI AG, Vol. 10 No. 20, pp. 1–11.

Ellithy, N.K., Balaawi, O.K. and Alnakeeb, A.K. (2020), "Drones for Agriculture", Vol. 7 No. 2, p. 272.

Esser C., A. and Ortega B., R. (2003), "Uso de percepción remota o teledetección para el manejo sitio-específico de viñedos", VIII Congreso de Economistas Agrarios 2003: Pensando En La Agricultura Del 2010, pp. 14–19.

Fraga-Lamas, P., Ramos, L., Mondéjar-Guerra, V. and Fernández-Caramés, T.M. (2019), "A review on IoT deep learning UAV systems for autonomous obstacle detection and collision avoidance", *Remote Sensing*, MDPI AG, Vol. 11 No. 18, available at:https://doi.org/10.3390/rs11182144.

Gómez-Luna, E., Navas, D.F., Aponte-Mayor, G. and Betancourt-Buitrago, L.A. (2014), "Literature review methodology for scientific and information management, through its structuring and systematization", *Dyna*, Vol. 81 No. 184, p. 158.

Kestur, R., Farooq, S., Abdal, R., Mehraj, E., Narasipura, O. and Mudigere, M. (2018), "UFCN: a fully convolutional neural network for road extraction in RGB imagery acquired by remote sensing from an unmanned aerial vehicle", *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 12, available at:https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.016020.

Khan, S., Tufail, M., Khan, M.T., Khan, Z.A., Iqbal, J. and Wasim, A. (2021), "Real-time recognition of spraying area for UAV sprayers using a deep learning approach", *PLoS ONE, Public Library of Science*, Vol. 16 No. 4 April, available at:https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249436.

Koubaa, A., Ammar, A., Alahdab, M., Kanhouch, A. and Azar, A.T. (2020), "Deepbrain: Experimental evaluation of cloud-based computation offloadingand edge computing in the internet-of-drones for deep learning applications", *Sensors (Switzerland)*, MDPI AG, Vol. 20 No. 18, pp. 1–25.

Kouris, A., Kyrkou, C. and Bouganis, C.-S. (2019), "Informed Region Selection for Efficient UAV-based Object Detectors: Altitude-aware Vehicle Detection with CyCAR Dataset", *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 51–58.

 ISSN en trámite

Kyrkou, C. and Theocharides, T. (2020), "EmergencyNet: Efficient Aerial Image Classification for Drone-Based Emergency Monitoring Using Atrous Convolutional Feature Fusion", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 13, pp. 1687–1699.

Lira, Jorge. (1995), La Percepción Remota. Nuestros Ojos Desde El Espacio., *La Ciencia Para Todos*, Vol. 33.

Mandal, M., Kumar, L.K. and Vipparthi, S.K. (2020), "MOR-UAV: A Benchmark Dataset and Baselines for Moving Object Recognition in UAV Videos", MM 2020 - Proceedings of the 28th ACM International Conference on Multimedia, Association for Computing Machinery, Inc, pp. 2626–2635.

Mandal, M., Shah, M., Meena, P. and Vipparthi, S.K. (2019), "SSSDET: Simple Short and Shallow Network for Resource Efficient Vehicle Detection in Aerial Scenes", Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP, Vol. 2019-Septe, IEEE Computer Society, pp. 3098–3102.

Matese, A., Toscano, P., di Gennaro, S.F., Genesio, L., Vaccari, F.P., Primicerio, J., Belli, C., et al. (2015), "Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture", *Remote Sensing*, Vol. 7 No. 3, pp. 2971–2990.

Meng, L., Peng, Z., Zhou, J., Zhang, J., Lu, Z., Baumann, A. and Du, Y. (2020), "Real-time detection of ground objects based on unmanned aerial vehicle remote sensing with deep learning: Application in excavator detection for pipeline safety", *Remote Sensing*, MDPI AG, Vol. 12 No. 1, available at:https://doi.org/10.3390/RS12010182.

Mohamed, E.S., Belal, A.A., Abd-Elmabod, S.K., El-Shirbeny, M.A., Gad, A. and Zahran, M.B. (2021), "Smart farming for improving agricultural management", *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, Vol. 24 No. 3, pp. 971–981.

Pang, Y., Shi, Y., Gao, S., Jiang, F., Veeranampalayam-Sivakumar, A.-N., Thompson, L., Luck, J., et al. (2020), "Improved crop row detection with deep neural network for early-season maize stand count in UAV imagery", *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier B.V., Vol. 178, available at:https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105766.

Scopus. (2021), "How do I search in Scopus?", Scopus: Access and Use Support Center, available at: https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/34325/supporthub/scopus/related/1/ (accessed 2 November 2022).

Shafi, U., Mumtaz, R., Iqbal, N., Zaidi, S.M.H., Zaidi, S.A.R., Hussain, I. and Mahmood, Z. (2020), "A Multi-Modal Approach for Crop Health Mapping Using Low Altitude Remote Sensing, Internet of Things (IoT) and Machine Learning", *IEEE Access, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, Vol. 8, pp. 112708–112724.

Sheppard, C. and Rahnemoonfar, M. (2017), "Real-time scene understanding for UAV imagery based on deep convolutional neural networks", International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Vol. 2017-July, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 2243–2246.

Sun, M., Xu, X., Qin, X. and Zhang, P. (2021), "AoI-Energy-Aware UAV-Assisted Data Collection for IoT Networks: A Deep Reinforcement Learning Method", *IEEE Internet of Things Journal*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Vol. 8 No. 24, pp. 17275–17289.

Sun, Y., Zhou, Y., Yuan, M., Liu, W., Luo, Y. and Zong, S. (2018), "UAV real-time monitoring for forest pest based on deep learning", *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, Chinese Society of Agricultural Engineering, Vol. 34 No. 21, pp. 74–81.

Tang, T., Deng, Z., Zhou, S., Lei, L. and Zou, H. (2017), "Fast vehicle detection in UAV images", RSIP 2017 - International Workshop on Remote Sensing with Intelligent Processing, Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., available at:https://doi.org/10.1109/RSIP.2017.7958795.

Van Eck, N.J. and Waltman, L. (2022), "VOSviewer manual", Leiden: Univeristeit Leiden

Wang, J., Wang, S., Zou, D., Chen, H., Zhong, R., Li, H., Zhou, W., et al. (2021), "Social network and bibliometric analysis of unmanned aerial vehicle remote sensing applications from 2010 to 2021", *Remote Sensing*, Vol. 13 No. 15, available at:https://doi.org/10.3390/rs13152912.

Wang, S., Han, Y., Chen, J., Zhang, Z., Wang, G. and Du, N. (2018), "A Deep-Learning-Based Sea Search and Rescue Algorithm by UAV Remote Sensing", 2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference, CGNCC 2018, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., available at:https://doi.org/10.1109/GNCC42960.2018.9019134.

WoS. (n.d.). "Web of Science Help", available at: http://webofscience.help.clarivate.com/en-us/Content/advanced-search.html (accessed 2 November 2022).

Xin, W., Li, W., Danfeng, H., Ran, T. and Du, Q. (2022), "Deep Learning for Unmanned Aerial Vehicle-Based Object Detection and Tracking: A Survey", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, Vol. 10 No. 1, pp. 91–124.

Yang, Q., Shi, L., Han, J., Yu, J. and Huang, K. (2020), "A near real-time deep learning approach for detecting rice phenology based on UAV images", *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier B.V., Vol. 287, available at:https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107938.

Yang, Q., Shi, L., Han, J., Zha, Y. and Zhu, P. (2019), "Deep convolutional neural networks for rice grain yield estimation at the ripening stage using UAV-based remotely sensed images", *Field Crops Research*, Elsevier, Vol. 235 No. August 2018, pp. 142–153.

 ISSN en trámite

# Sistema de control para la generación de estímulos automáticos en terapias multisensoriales para personas con Síndrome Down

**Wendy Aracely Sánchez Gómez, Irán Adolfo Mendo Adán, Mara Grassiel Acosta González Alberto Arturo Flores Hernández, Citlalin Aurelia Ortiz Hermosillo**

*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Matamoros*
*México (e-mail: {wendy.sg, l15260744, mara.acosta, alberto.fh, citlalin.oh}@ mtamoros.tecnm.mx)*

Abstract: Las personas con Síndrome Down tienen una interacción limitada con su entorno lo cual restringe la información sensorial que procesan teniendo repercusiones en sus emociones, actitudes y aprendizaje. Las salas multisensoriales tradicionales permiten estimular sensorialmente al usuario mediante diversos elementos favoreciendo la atención, la exploración, el placer y las sensaciones de bienestar en los usuarios. Sin embargo, presentan algunas limitaciones referentes a las interacciones del usuario con la sala y la fluidez de las sesiones. En este artículo se presenta un sistema de control que genera estímulos visuales y auditivos automáticos mediante reconocimiento de palabras, capaz de controlar los elementos de la sala mediante una aplicación móvil. Se llevó a cabo una encuesta de experiencia de usuario y de usabilidad, y una entrevista para evaluar el sistema propuesto.

*Keywords:* sistema de control; aplicación móvil; síndrome Down; sala multisensorial; estímulo automático

## 1. INTRODUCCIÓN

El aprendizaje y la motivación dependen en gran medida de los sentidos. Momento a momento, las experiencias sensoriales afectan nuestra motivación, actitudes, emociones, aprendizaje, actividades físicas y nuestro propio ser (Lotan & Shapiro, 2005). El nivel de desempeño alcanzado por un individuo es un reflejo de la estimulación y las oportunidades que le brinda su entorno (Eijgendaal et al., 2010).

Las personas con Síndrome Down tienen una interacción limitada con su entorno, lo que restringe la información sensorial que las personas típicas dan por sentado (Eijgendaal et al., 2010; Fornes, 2009). Para estas personas es difícil crear su propio entorno óptimo o experiencia sensorial, ya que su mundo suele ser estrecho, confinado y, en la mayoría de los casos, controlado por ellos. El aprendizaje depende de la capacidad del niño de hacer uso de la información sensorial para percibir la información sensorial de su entorno, integrar esta información y planificar y formar un comportamiento con propósito (Uyanik & Kayihan, 2010). Esta conciencia sensorial limitada no solo afecta las habilidades de aprendizaje, sino que también perjudica la calidad de vida (Hogg et al., 2001).

La utilización de un adecuado plan de tratamiento de estimulación sensorial, en el que intervengan todos sus sentidos, es beneficioso para los niños con síndrome de Down, ya que no solamente se mejora su nivel de atención y concentración, sino que también favorece un adecuado desarrollo corporal (Romero Rivera, 2016).

En los últimos años, se ha considerado ampliamente el uso de las salas multisensoriales tradicionales (Brodin, 1999). El objetivo de las salas multisensoriales tradicionales es ofrecer un ambiente tranquilo, no amenazante y relajante que promueva una sensación general restauradora y refrescante al involucrar a las personas con Síndrome Down en experiencias placenteras y exploratorias, con el apoyo cercano de los terapeutas, mientras se mantiene controlada la cantidad, intensidad y calidad de estímulos propuestos.

Se han llevado a cabo varios estudios para explorar la efectividad terapéutica y educativa de las salas multisensoriales tradicionales con resultados positivos traducidos en mejoras en la capacidad de adaptación a las circunstancias y la mitigación de algunos estereotipos (Iarocci & McDonald, 2006; Lancioni et al., 2002; Shams & Seitz, 2008). Sin embargo, las salas multisensoriales tradicionales tienen limitaciones, ya que ofrecen una capacidad restringida para que el usuario interactúe con artefactos que producen una causa, y reciban un estímulo apropiado como efecto, para establecer una relación causa-efecto, fundamental en el desarrollo de habilidades cognitivas. Además de esta limitación, otro problema está relacionado con la creación de escenarios de aprendizaje y secuencias de combinaciones de estímulos de diferentes fuentes, lo que lleva mucho tiempo y es potencialmente riesgoso para el flujo de la sesión, ya que los estímulos en las salas multisensoriales tradicionales sólo pueden controlarse el uso de botones físicos. Esto no es simplemente un problema de cansancio de los terapeutas, sino que también obliga al terapeuta a liberar la atención del usuario, quien a su vez puede eliminar la atención de su tarea actual. Por lo tanto, varios autores proponen la exploración del uso de nuevas tecnologías

 ISSN en trámite

para enriquecer a salas multisensoriales inteligentes (Baker et al., 2001; Carter & Stephenson, 2012; Lotan & Gold, 2009).

La Fundación Down de H. Matamoros, Tamaulipas es una asociación civil dedicada al servicio especializado para personas con Síndrome Down. La fundación cuenta con una sala multisensorial tradicional en donde se encuentran diversos elementos como una cama de pelotas, un tubo de burbujas, una máquina de humo, una máquina de burbujas, un sistema de audio y un sistema de iluminación LED. Estos elementos se controlan mediante botones físicos, lo cual genera que el terapeuta libere la atención a los niños y que no haya fluidez en las sesiones. Se atienden cerca de 35 personas con Síndrome Down, quienes reciben la terapia al menos una vez por semana. Esto genera cansancio y estrés en los terapeutas. Además, no cuentan con elementos en los cuales el niño interactúe directamente generando un estímulo sensorial automático.

En este artículo se presenta un sistema de control que genera estímulos visuales y auditivos automáticos mediante reconocimiento de palabras. El sistema también es capaz de controlar los elementos de la sala mediante una aplicación móvil. Además, se presenta la evaluación del sistema de control implementado en la Fundación Down de H. Matamoros, Tamaulipas.

## 2. TRABAJOS RELACIONADOS

En los últimos años, muchas instituciones han mostrado su interés por el desarrollo de proyectos orientados a la atención de las personas con discapacidad. Este tipo de proyectos están mejorando la calidad de vida de las personas con discapacidad (Assistive Technology Industry Association, 2018). En (Calle-Romero et al., 2017), los autores proponen YOCASTA, que es un sistema lúdico-interactivo está dirigido al tratamiento de los trastornos de ansiedad y la falta de concentración que se presenta en niños con algún tipo de discapacidad. YOCASTA registra el progreso del niño después de una sesión de terapia, guardando datos como el tiempo de respuesta, el número de intentos, el marcador y otros. En (Barros et al., 2017), los autores presentan CARDBOT, un dispositivo que permite el acceso a actividades de robótica educativa a estudiantes con discapacidad visual o poca capacidad de ver. Mediante CARDBOT el estudiante puede programar un robot particular organizándolo en una superficie específica como una mesa. En (Gonzalez-Gonzalez et al., 2018), los autores proponen JOHSAN, un sistema multisensorial capaz de ayudar en el proceso enseñanza-estimulación con niños con parálisis cerebral. El sistema fue diseñado de la mano de terapeutas. El sistema consiste de 3 etapas. En la primera etapa, participan el terapeuta, la familia y la aplicación móvil. En la segunda etapa, participan dispositivos maestros que incluyen un sistema de retroalimentación. En la tercera etapa, participan los tres dispositivos esclavos y el niño para los colores básicos y la selección de formas geométricas. Los investigadores en el campo de la asistencia robótica han diseñado robots capaces de sentir el tacto, comunicarse a través del sonido, los movimientos y, en algunos casos, de las luces. Se han llevado a cabo varias investigaciones en los últimos años con fines terapéuticos o educativos específicos. La mayoría de ellos son robots estáticos (Cabibihan et al., 2013; Fong et al., 2002) con algunas excepciones notables que ofrecen a los niños la posibilidad de explorar el espacio físico mientras experimentan una experiencia multisensorial controlada. QueBall (Salter et al., 2014) es un robot esférico capaz de rodar para moverse, detectar toques en la superficie y comunicarse con el usuario a través de una amplia gama de estímulos visuales y sonoros. I-BLOCKS (Brok & Barakova, 2010) ofrece un conjunto de bloques compostables equipados con sensores y actuadores que se pueden conectar para crear pisos o paredes interactivos. Teo (Bonarini et al., 2016) es un robot móvil, suave y abrazable que puede reaccionar a la manipulación. Permite movimientos corporales articulares del niño con el robot, en el espacio y control de contenidos multimedia en pantallas externas.

Por otro lado, se han desarrollado investigaciones principalmente en el campo de la Interacción Humano-Computadora (HCI) y la tecnología de asistencia, lo que ha dado lugar a nuevos enfoques. MapSense (Brule et al., 2016) es un mapa interactivo multisensorial que utiliza una superficie sensible al tacto, estímulos tangibles, olfativos y gustativos, para ayudar a los niños con discapacidad visual a mejorar las habilidades de colaboración y memoria. MEDIATE (Parés et al., 2005) es un ejemplo de un sistema interactivo que implementa interacción multisensorial de cuerpo completo en el espacio, creando un sentido de agencia en los niños afectados por NDD y para mejorar las acciones no repetitivas en su comportamiento.

Nuestra propuesta se enfoca en el desarrollo de un sistema de control que genera estímulos visuales y auditivos automáticos mediante reconocimiento de palabras. Además, es capaz de controlar los elementos de la sala mediante una aplicación móvil, lo que permite que las sesiones sean más fluidas.

## 3. SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control permite dos tipos de interacciones: mediante los botones de la interfaz gráfica y mediante la voz. El niño experimenta estímulos visuales y auditivos de una manera automática mediante el reconocimiento de palabras. El sistema capta el audio a través del micrófono del dispositivo móvil, identifica la palabra y genera acciones a través de un circuito controlador. Además, permite el control de todos los elementos de la sala multisensorial. El sistema de control está compuesto por una aplicación móvil y por un circuito controlador. La Figura 1 muestra la arquitectura del sistema.

 ISSN en trámite

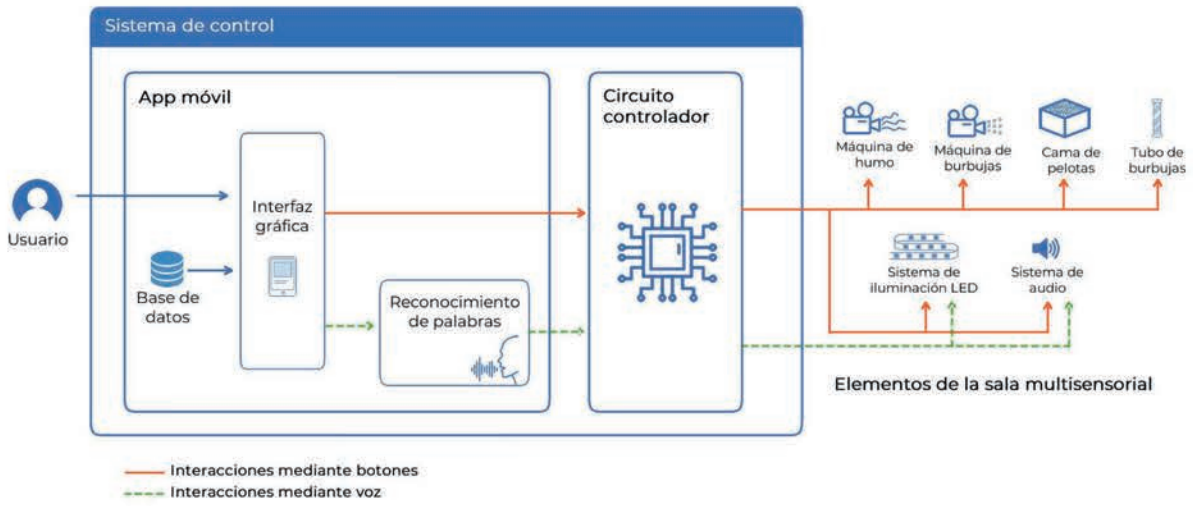



Figura 1 Arquitectura del sistema de control

*3.1 Aplicación móvil*

La aplicación móvil se compone de una interfaz gráfica, una base de datos y un módulo de reconocimiento de palabras. La aplicación fue desarrollada en Android Studio y la base de datos en SQLite. La interfaz gráfica se encarga de la interacción de los usuarios, tanto los niños como los terapeutas, con el sistema. La interfaz gráfica fue diseñada de acuerdo a los requerimientos de la fundación: pantallas sencillas e intuitivas; con colores primarios y secundarios, no demasiado vibrantes; con pocos elementos y sin sobrecargar de estímulos visuales con el fin de que los niños se enfoquen en la actividad que se busca. Las palabras y los sonidos de cada palabra se almacenan en la base de datos. Las palabras se eligieron junto con el terapeuta. La intención fue incluir palabras que tuvieran sonido para la estimulación auditiva y los colores para la estimulación visual. Las palabras que se incluyeron son: perro, gato, pájaro, vaca, loro, mono, carro, puerta, rojo, azul, verde, amarillo y morado. Además, se añadieron frases de felicitación para cuando pronuncie la palabra correctamente y de motivación para cuando la diga incorrectamente. Las frases de felicitación son: "¡Muy bien!", "Sigue así", "Ya casi terminas" y "Excelente". Las frases de motivación son: "Si se puede", "Ya falta poco", "Ya casi lo logras" y "¡Ánimo!".

La aplicación móvil muestra una palabra en la pantalla y el niño debe decirla lo más claro posible. El terapeuta motiva al niño a que la pronuncie correctamente. El módulo de reconocimiento de palabras se encarga de identificar la palabra que dijo el niño mediante la API de Google Assistant.

*3.2 Circuito controlador*

El circuito genera acciones de acuerdo a cada caso. La Tabla 1 muestra los casos y las acciones correspondientes. Si no se logra identificar la palabra, las luces led cambian a color blanco y aparece una frase de motivación. Esto se implementó de acuerdo a lo requerido por el terapeuta: "En la terapia no existen respuestas incorrectas, ya que se estarían afectando las emociones del paciente. Lo que se quiere es que el paciente tome la confianza de poder pronunciar mejor las palabras, el fin es estimularlo".

El sistema de control está diseñado para apoyar al terapeuta en las sesiones. El sistema le permite controlar los elementos de la sala. La Tabla 2 muestra los elementos que se pueden controlar y las acciones que se pueden realizar.

Tabla 1 Casos y acciones del circuito controlador

| **Caso** | **Acción** |
|---|---|
| Si la palabra es un animal | El sistema de iluminación de la sala cambia de color. Se escucha el sonido en el sistema de audio. Aparece la frase de felicitación en la pantalla. |
| Si la palabra es un color | El sistema de iluminación de la sala cambia a ese color. Aparece la frase de felicitación en la pantalla. |
| Si la palabra es una cosa | El sistema de iluminación de la sala cambia de color. Se escucha el sonido de esa cosa en el sistema de audio. Aparece la frase de felicitación en la pantalla. |
| Si no se logra identificar la palabra | El sistema de iluminación de la sala cambia al color blanco. Aparece la frase de motivación en la pantalla. |

 ISSN en trámite

Tabla 2 Elementos controlables y acciones

| Elemento de la sala | Acción |
|---|---|
| Cama de pelotas | Encender o apagar.<br>Cambiar los colores de los leds. |
| Tubo de burbujas | Encender o apagar.<br>Cambiar los colores de los leds. |
| Máquina de humo | Encender o apagar. |
| Máquina de burbujas | Encender o apagar. |

El hardware del circuito controlador utilizado fue una tarjeta Arduino Mega 2560, un NodeMCU, módulo de relevadores y componentes de electrónica básica. Tomando en cuenta los componentes de hardware y software, el costo aproximado es de $2000.00.

## 4. EVALUACIÓN

El sistema de control se implementó en la sala multisensorial de la Fundación Down de H. Matamoros, Tamaulipas. Se hicieron las conexiones eléctricas a los elementos de la sala y se instaló la aplicación en la tableta de la sala. Se llevó a cabo una sesión de pruebas del sistema en donde los tres terapeutas con que cuenta la fundación tuvieron la oportunidad de interactuar con el sistema. La evaluación del sistema de control se llevó a cabo mediante la escala de experiencia de usuario UEQ, la escala de usabilidad SUS y una entrevista a los terapeutas.

### *4.1 Escala de experiencia de usuario UEQ*

La escala UEQ (Laugwitz et al., 2008) es una escala de experiencia de usuario de respuesta tipo Likert de 7 puntos. Contiene 26 ítems los cuales miden 6 dimensiones, las cuales se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Dimensiones de la escala UEQ

| Dimensión | Descripción |
|---|---|
| Atracción | Mide la impresión general del sistema; si les gustó o no el sistema. |
| Transparencia | Mide qué tan fácil es aprender a utilizar el sistema. |
| Eficiencia | Mide si los usuarios pudieron llevar a cabo las funciones del sistema sin demasiado esfuerzo. |
| Control | Mide qué tanto los usuarios se sentían que tenían el control de las tareas que realizaban en el sistema. |
| Estimulación | Mide si los usuarios se encontraron motivados de utilizar el sistema. |
| Novedad | Mide qué tan innovador y creativo es el sistema; si logró cautivar a los usuarios. |

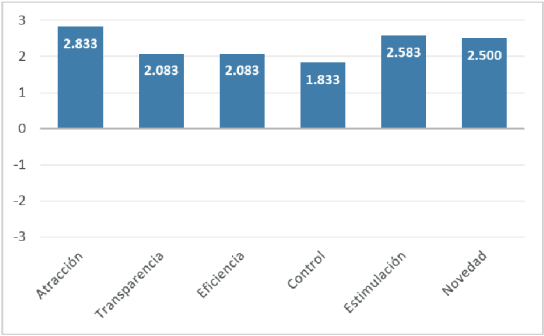



Figura 2 Resultados de la escala UEQ

Los resultados de la escala UEQ van desde -3 a +3. Si el resultado es mayor a 0.8 se considera como un resultado positivo, si está en el rango de -0.08 a 0.8 se consideran como un resultado neutral y si es menor a -0.8 se considera como un resultado negativo. La Figura 2 muestra los resultados de las respuestas de los terapeutas en cada dimensión.

La dimensión Atracción obtuvo un valor de 2.83±0.17 el cual es un resultado positivo, lo cual significa que el sistema de control les gustó a los terapeutas. Los ítems de esta dimensión que obtuvieron la puntuación promedio más baja son: desagradable/agradable, bueno/malo y repeler/atraer con una puntuación promedio de 2.7±0.6. La dimensión Transparencia obtuvo un valor de 2.58±0.72 el cual es un resultado positivo, lo cual significa que los terapeutas encontraron que el sistema de control es fácil de aprender a utilizar. Los ítems de esta dimensión que obtuvieron la puntuación promedio más baja son: no entendible/entendible y complicado/fácil con una puntuación promedio de 2.3±1.2. La dimensión Eficiencia obtuvo un valor de 2.58±0.38 el cual es un resultado positivo, lo cual significa que los terapeutas pudieron llevar a cabo las funciones del sistema de control sin demasiado esfuerzo. Los ítems de esta dimensión que obtuvieron las puntuaciones más bajas son: rápido/lento con una puntuación promedio de 1.3±1.5. La dimensión Control obtuvo un valor de 1.83±0.58 el cual es un resultado positivo, lo cual significa que los terapeutas encontraron que tenían el control de las tareas que realizaban en el sistema. Los ítems de esta dimensión que obtuvieron la puntuación más baja son: predecible/impredecible con una puntuación promedio de -0.7±2.1. La dimensión Estimulación obtuvo un valor de 2.58±0.52 el cual es un resultado positivo, lo cual significa que los terapeutas encontraron motivados de utilizar el sistema de control. Los ítems de esta dimensión que obtuvieron la puntuación promedio más baja son: valioso/de poco valor con una puntuación promedio de 2.3±1.2. La dimensión Novedad obtuvo un valor de 2.50±0.66 el cual es un resultado positivo, lo cual significa que los terapeutas encontraron que el sistema de control es innovador y los logró cautivar. Los ítems de esta dimensión que obtuvieron la puntuación más baja son: creativo/sin imaginación con una puntuación promedio de 2.3±0.6; y original/convencional con una puntuación promedio de 2.3±1.2.

 ISSN en trámite

*4.2 Escala de usabilidad SUS*

La escala de usabilidad SUS (Brooke, 1995) proporciona una herramienta confiable y "rápida y sucia" para medir la usabilidad. Consiste en un cuestionario de 10 ítems con respuestas tipo Likert de 5 puntos. SUS se ha convertido en un estándar de la industria. Entre sus beneficios destaca que es una escala muy fácil de administrar a los participantes. Se puede utilizar en tamaños de muestra pequeños con resultados fiables. Es válida ya que puede diferenciar efectivamente entre sistemas utilizables e inutilizables. Los resultados de la escala SUS van desde 0 a 100. Si el resultado es mayor a 68 se considera por encima del promedio y si es menor a 68 se considera por debajo del promedio. El resultado general fue de 100. La Figura 3 muestra los resultados de la escala SUS.

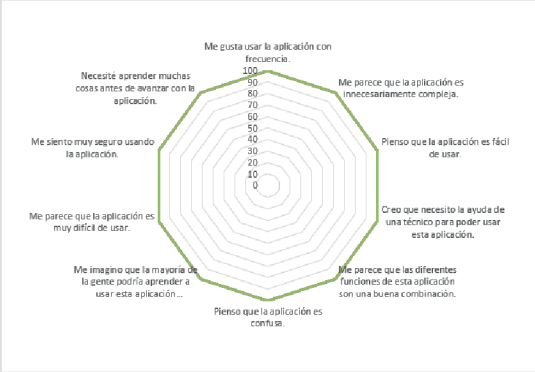



Figura 3 Resultados de la escala SUS

*4.3 Entrevista*

Se llevó a cabo una entrevista a los 3 terapeutas en la cual se les hicieron 3 preguntas cerradas de tipo Likert de 5 puntos y 3 preguntas abiertas. Los 3 terapeutas estuvieron "Totalmente de acuerdo" con las siguientes afirmaciones: "La aplicación ayudó a que las terapias fueran más fluidas", "La aplicación ayudó a que me cansara menos en las sesiones de terapia." y "La aplicación ayudó a que los niños tuvieran estímulos auditivos y visuales de manera automática". En la pregunta abierta "Mencione los comentarios positivos que tenga del sistema", los terapeutas hicieron los siguientes comentarios: "El sistema es muy práctico de usar y facilita el control de los elementos de la sala", "La interfaz gráfica es muy llamativa en las sesiones ya que a los niños les agrada" y "Mejora la interacción del niño con los elementos de la sala". En la pregunta abierta "Mencione en qué le ha ayudado el sistema dentro de las sesiones con los niños", los terapeutas comentaron: "En algunos niños se les deja la tableta y ellos manejan la sala, cambiando el color y agregando humo o burbujas; les resulta muy interesante y divertido poder controlarlo", "El tubo de burbujas mejoró la intensidad en la vibración; esto permite un mejor estímulo en el sentido del tacto", y "Aumentó el número de colores lo cual ayuda a reforzar lenguaje". En la pregunta abierta "Mencione las áreas de oportunidad que tenga del sistema", los terapeutas mencionan: "En ocasiones el sistema tiene un ligero retraso entre la aplicación y la máquina de humo", "En ocasiones, se desincroniza del Wifi" y "Físicamente frágil".

## 5. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un sistema de control que genera estímulos visuales y auditivos automáticos mediante reconocimiento de palabras y que controla los elementos de una sala multisensorial mediante una aplicación móvil y un circuito controlador. Se implementó en una fundación en donde atienden a personas con Síndrome Down. Se hicieron pruebas de experiencia de usuario y de usabilidad mediante las encuestas UEQ y SUS y mediante una entrevista a los terapeutas.

En la evaluación de experiencia de usuario se puede observar que el sistema les gustó, que es fácil de aprender a usar, que pudieron llevar a cabo las funciones del sistema de control sin demasiado esfuerzo, que tenían el control de las tareas que realizaban en el sistema, que se encontraron motivados de utilizar el sistema de control, que el sistema de control es innovador y los logró cautivar. En la evaluación de usabilidad, los terapeutas evaluaron con los mejores puntajes en los 10 ítems, obteniendo una ponderación general de 100. En sus respuestas podemos observar que los terapeutas encontraron al sistema fácil de usar, que la quieren usar con frecuencia, que se sienten seguros de usarla y que las funciones que se incluyen son una buena combinación.

En las entrevistas, los terapeutas confirmaron las respuestas que dieron en las escalas. Entre los comentarios positivos, se puede observar que los terapeutas encontraron que el sistema de control es muy útil durante en las sesiones. Los niños experimentan los estímulos visuales y auditivos de manera automática mediante la aplicación, lo cual les resulta interesante y divertido, que es justamente lo que se pretende en la sala multisensorial. Los niños desarrollan sus habilidades cognitivas mediante estos estímulos. Para los terapeutas también fue de ayuda ya que las sesiones fueron más fluidas y los terapeutas se cansaron menos. El uso del sistema de control les permite tener un control de la sala y de la intensidad de los estímulos. Se pudo observar que hay áreas de oportunidad como un retraso en la acción en la máquina de humo; esto se debe a la compatibilidad de los componentes. Mencionan la desincronización con el wifi; esto se debe a problemas que se tienen en la red de la fundación. Mencionan que es físicamente frágil; esto se debe a que se hizo un prototipo del sistema.

Como trabajo futuro, se está planeando el desarrollo de una nueva versión del circuito controlador con un armazón más resistente y duradero. Además, se planea agregar el control de más elementos de la sala, así como el desarrollo de nuevos elementos que también se puedan controlar desde la aplicación. Las personas con Síndrome Down sí pueden desarrollar habilidades como cualquier persona. Quizás les tome más tiempo, pero sí es posible. Es necesario seguir implementando tecnología en favor de ellos, de manera que logren desarrollar

 ISSN en trámite

sus capacidades y habilidades y que logren ser personas independientes.

## REFERENCIAS

Assistive Technology Industry Association. (2018). *Assistive Technology Industry Association*. http://www.atia.org/at-resources/what-is-at/

Baker, R., Bell, S., Baker, E., Holloway, J., Pearce, R., Dowling, Z., Thomas, P., Assey, J., & Wareing, L.-A. (2001). A randomized controlled trial of the effects of multi-sensory stimulation (MSS) for people with dementia. *British Journal of Clinical Psychology*, *40*(1), 81–96. https://doi.org/10.1348/014466501163508

Barros, R. P., Burlamaqui, A. M. F., Azevedo, S. O., Sá, S. T., Gonçalves, L. M. G., & Burlamaqui, A. A. R. S. (2017). CardBot-Assistive Technology for Visually Impaired in Educational Robotics: Experiments and Results. *IEEE Latin America Transactions*, *15*(3), 517–527. https://doi.org/10.1109/TLA.2017.7867603

Bonarini, A., Garzotto, F., Gelsomini, M., Romero, M., Clasadonte, F., & Yilmaz, A. N. C. (2016). A huggable, mobile robot for developmental disorder interventions in a multi-modal interaction space. *25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, RO-MAN 2016*, 823–830. https://doi.org/10.1109/ROMAN.2016.7745214

Brodin, J. (1999). Play in children with severe multiple disabilities: Play with toys - A review. In *International Journal of Disability, Development and Education* (Vol. 46, Issue 1, pp. 25–34). https://doi.org/10.1080/103491299100704

Brok, J. C. J., & Barakova, E. I. (2010). Engaging autistic children in imitation and turn-taking games with multiagent system of interactive lighting blocks. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *6243 LNCS*, 115–126. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15399-0_11

Brooke, J. (1995). SUS: A quick and dirty usability scale. In *Usability Evaluation In Industry*. CRC Press.

Brule, E., Bailly, G., Brock, A., Valentin, F., Denis, G., & Jouffrais, C. (2016). MapSense: Multi-sensory interactive maps for children living with visual impairments. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 445–457. https://doi.org/10.1145/2858036.2858375

Cabibihan, J. J., Javed, H., Ang, M., & Aljunied, S. M. (2013). Why Robots? A Survey on the Roles and Benefits of Social Robots in the Therapy of Children with Autism. In *International Journal of Social Robotics* (Vol. 5, Issue 4, pp. 593–618). Springer. https://doi.org/10.1007/s12369-013-0202-2

Calle-Romero, P., Valverde-Galan, P., Robles-Bykbaev, Y., Barros-Ponton, M. E., Canizares-Jarrin, L., Robles-Bykbaev, V., Ingavelez-Guerra, P., & Orellana-Peralta, J. (2017). YOCASTA: A ludic-interactive system to support the detection of anxiety and lack of concentration in children with disabilities. *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC 2017*, *2018-January*, 1–6. https://doi.org/10.1109/ROPEC.2017.8261603

Carter, M., & Stephenson, J. (2012). The Use of Multi-Sensory Environments in Schools Servicing Children with Severe Disabilities. *Journal of Developmental and Physical Disabilities*, *24*(1), 95–109. https://doi.org/10.1007/s10882-011-9257-x

Eijgendaal, M., Eijgendaal, A., Fornes, S., Hulsegge, J., Mertens, K., Pagliano, P., Rowe, J., Verheul, A., & Vogtle, L. (2010). Multi Sensory Environment (MSE/Snoezelen) – A Definition and Guidelines. *Rehabilitation*, *24*(4), 175–184.

Fong, T., Nourbakhsh, I., & Dautenhahn, K. (2002). *A Survey of Socially Interactive Robots: Concepts, Design, and Applications*. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA USA.

Fornes, S. L. (2009). *Multi Sensory Environments: Developing the theory and guiding practice for future direction: A delivery model developed from an integrative review of the literature, practice and research*.

Gonzalez-Gonzalez, S., Guachun-Arias, J., & Serpa-Andrade, L. (2018). JOHSAN – A multisensorial system to support the teaching-stimulation processes with children suffering from brain paralysis. *Proceedings of the 2018 IEEE 25th International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing, INTERCON 2018*, 3–6. https://doi.org/10.1109/INTERCON.2018.8526424

Hogg, J., Cavet, J., Lambe, L., & Smeddle, M. (2001). The use of Snoezelen as multisensory stimulation with people with intellectual disabilities: A review of the research. *Research in Developmental Disabilities*, *22*(5), 3532–372. https://doi.org/10.1016/S0891-4222(01)00077-4

Iarocci, G., & McDonald, J. (2006). Sensory integration and the perceptual experience of persons with autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *36*(1), 77–90. https://doi.org/10.1007/s10803-005-0044-3

Lancioni, G. E., Cuvo, A. J., & O'Reilly, M. F. (2002). Snoezelen: an overview of research with people with developmental disabilities and dementia. *Disability and Rehabilitation*, *24*(4), 175–184. https://doi.org/10.1080/09638280110074911

Laugwitz, B., Held, T., & Schrepp, M. (2008). Construction and evaluation of a user experience questionnaire. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *5298 LNCS*, 63–76. https://doi.org/10.1007/978-3-540-89350-9_6/COVER

Lotan, M., & Gold, C. (2009). Meta-analysis of the effectiveness of individual intervention in the controlled multisensory environment (Snoezelen®) for individuals with intellectual disability. *Journal of Intellectual and Developmental Disability*, *34*(3), 207–215. https://doi.org/10.1080/13668250903080106

Lotan, M., & Shapiro, M. (2005). Management of young children with Rhett disorder in the controlled multi-sensory (Snoezelen) environment. *Brain Development*, *27*, 88–94.

Parés, N., Masri, P., Van Wolferen, G., & Creed, C. (2005). Achieving dialogue with children with severe autism in an adaptive multisensory interaction: The "MEDIATE" project. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *11*(6), 734–742. https://doi.org/10.1109/TVCG.2005.88

Romero Rivera, M. A. (2016). *Influencia de la terapia de integración sensorial en el tratamiento de la hipotonía en niños con síndrome de Down*. Universidad Técnica de Ambato.

Salter, T., Davey, N., & Michaud, F. (2014). Designing & developing QueBall, a robotic device for autism therapy. *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, *2014-October*(October), 574–579. https://doi.org/10.1109/ROMAN.2014.6926314

Shams, L., & Seitz, A. R. (2008). Benefits of multisensory learning. *Trends in Cognitive Sciences*, *12*(11), 411–417. https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.07.006

Uyanik, M., & Kayihan, H. (2010). Down Syndrome: Sensory Integration, Vestibular Stimulation and Neurodevelopmental Therapy Approaches for Children. *International Encyclopedia of Rehabilitation*, *January*, 1–22. http://cirrie.buffalo.edu/encyclopedia/en/article/48/

 ISSN en trámite

# Técnicas de Optimización de Hiperparámetros en Modelos de Aprendizaje Automático para Predicción de Enfermedades Cardiovasculares

**Eduardo Sánchez-Jiménez Yasmín Hernández, Javier Ortiz-Hernández**
*TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos. 62490 México (Tel: 993-459-8058; e-mail: {m22ce005, yasmin.hp, javier.oh}@cenidet.tecnm.mx).*

***Resumen:*** Recientes avances en minería de datos y aprendizaje automático proponen un cambio de paradigma en el diagnóstico temprano de las enfermedades. Construir modelos predictivos involucra la selección de un algoritmo de aprendizaje automático. Esta decisión viene acompañada de un conjunto de hiperparámetros que debemos ajustar; son importantes porque controlan directamente la fase de entrenamiento del modelo y tienen un impacto significativo en el desempeño de este. Se plantea la teoría de optimización matemática como enfoque de configuración de hiperparámetros en modelos de aprendizaje automático. Se describen los hiperparámetros de los algoritmos: Bosque Aleatorio, Máquinas de Soporte Vectorial y XGBoost. Luego, se analizan las técnicas: Métodos teóricos de decisión, Optimización basada en el Gradiente y la Optimización Bayesiana. Por último, se muestran los resultados del análisis exploratorio del conjunto de datos de enfermedades cardiovasculares Cleveland.

***Keywords***: Aprendizaje automático, Enfermedades cardiovasculares, Hiperparámetros, Optimización Matemática.

## 1. INTRODUCCIÓN

Existe un gran avance en la aplicación de técnicas de aprendizaje automático para predicción de Enfermedades Cardiovasculares (ECV). Al utilizar este enfoque, la implementación de un modelo predictivo es un proceso complejo y largo que implica determinar el algoritmo adecuado y obtener una estructura de modelo óptima mediante la configuración de los hiperparámetros (Yang & Shami, 2020). Los hiperparámetros son variables propias de los algoritmos de aprendizaje automático que controlan directamente el proceso de entrenamiento y tienen como objetivo mejorar el rendimiento de los modelos. Es crucial seleccionar una técnica de Optimización de Hiperparámetros (OH) adecuada para detectar la configuración óptima de hiperparámetros. Para darle solución a los distintos problemas de OH existen técnicas que aplican un enfoque de optimización que minimiza o maximiza una función objetivo.

Se han hecho esfuerzos para automatizar la configuración de los hiperparámetros. Por ejemplo, Kotthoff *et al.*, (2017) definen la biblioteca CASH, del inglés, *Combined Algorithm Selection and Hyperparameter Optimization* con base en la plataforma WEKA para abordar el problema de seleccionar simultáneamente un algoritmo de aprendizaje automático y establecer la configuración de los hiperparámetros. Los autores demuestran que el proceso de selección puede verse como un problema de optimización jerárquica de hiperparámetros, en donde los avances recientes de las técnicas de Optimización Bayesiana obtienen mejores resultados de desempeño y con un mínimo de recursos computacionales y humanos.

El objetivo de este artículo consiste es presentar la teoría de optimización matemática como un enfoque de configuración semiautomático de hiperparámetros de modelos predictivos. Además, resumir y analizar algunos métodos de OH. Esto como parte del desarrollo de la investigación*: Optimización de Hiperparámetros en Modelos de Aprendizaje Automático para la Predicción de Enfermedades Cardiovasculares*. La principal aportación científica es el análisis y la aplicación de las técnicas de optimización que determinan la mejor configuración hiperparámetros en algoritmos específicos y diferentes conjuntos de datos de ECV.

El resto del artículo está organizado en: la sección 2 contiene algunos trabajos que hacen énfasis en la importancia de la optimización de los hiperparámetros. En la sección 3 se presenta la teoría de optimización matemática y el enfoque OH propuesto para el desarrollo de la investigación. Posteriormente, en la sección 4, el análisis de las técnicas de OH y los avances actuales de la investigación. Finalmente, en la sección 5 se discuten las conclusiones y los trabajos futuros.

## 2. TRABAJO RELACIONADO

Mantovani *et al.,* (2015) estudian la importancia de la configurar los hiperparámetros. Los autores utilizan propiedades de la tarea de aprendizaje, conocidas como metacaracteristicas, para predecir si la configuración de hiperparámetros conducirá a mejores resultados que los modelos que utilizan la configuración de hiperparámetros por defecto. (Lavesson & Davidsson, 2006) muestran que la configuración de los hiperparámetros es a menudo más importante que la elección del algoritmo de aprendizaje automático. Por otro lado, Weerts *et al.,* (2018) estudian la importancia de ajustar determinados hiperparámetros, más que la importancia de afinarlos en su totalidad. Van Rijn & Hutter, (2018) analizan la importancia de determinados hiperparámetros, así como las interacciones entre los mismos. Los autores definen los hiperparámetros importantes como los parámetros que explican la mayor parte de la varianza del rendimiento en múltiples conjuntos de datos. La varianza explicada se determina mediante un marco de ANOVA funcional. Una de las limitaciones de este enfoque es que los resultados no se traducen directamente en indicaciones sobre qué hiperparámetros particulares son importantes de afinar.

 ISSN en trámite

## 3. ANTECEDENTES

En esta sección, se discute la optimización matemática y las técnicas de optimización en modelos de aprendizaje automático más utilizadas.

### *3.1 Optimización Matemática*

Yang & Shami, (2020) plantea que los problemas de optimización pueden clasificarse como problemas con o sin restricciones. La mayoría de los problemas de optimización de la vida real contienen un conjunto de restricciones. La variable de decisión $x$ para este tipo de problemas debe estar sujeta a ciertas restricciones que pueden ser igualdades o desigualdades matemáticas. Espinosa *et al*., (2016) proponen la definición:

**Definición 1:** Un problema de optimización es, en general, un problema de decisión. A partir del valor de una función objetivo (diseñada para cuantificar el rendimiento y medir la calidad de la decisión) se obtienen valores para cierto número de variables, relacionadas entre sí mediante expresiones matemáticas, de manera que minimicen o maximicen la función objetivo y, por lo general, teniendo en cuenta una serie de restricciones que limitan la elección de esos valores. Un problema de optimización con restricciones puede expresar como:

$$\min/\max_x f(x)$$

con respecto a:

$$g_i(x) \leq 0, i = 1,2,\dots,m.$$

$$h_i(x) = 0, j = 1,2,\dots,p. \quad x \in X$$

donde $g_i(x) \leq 0, i = 1,2,\dots,m.$ son las funciones de restricción de desigualdad; $h_i(x) = 0, j = 1,2,\dots,p.$ son las funciones de restricción de igualdad y $X$ es el dominio de $x$.

El objetivo de las restricciones es limitar los posibles valores de la solución óptima a ciertas áreas del espacio de búsqueda, denominadas *región factible*. Así, la región factible $D$ de $x$ puede ser representada como:

$$R_f = \{x \in X \mid g_i(x) \leq 0, h_i(x) = 0\}$$

Es el conjunto de todos los puntos posibles (soluciones factibles) de un problema de optimización que satisfacen las restricciones del problema (Espinosa *et al*., 2016). En los problemas de optimización hay que distinguir dos tipos de soluciones; es común describirlos en términos de optimización local y optimización global. Un *óptimo global* es una solución para el problema global de optimización. Un *óptimo local*, en cambio, es óptimo sólo con respecto a las soluciones factibles cercanas a ese punto de $R_f$ (Stephen P. Bradley, 1977). Ver Figura 1.

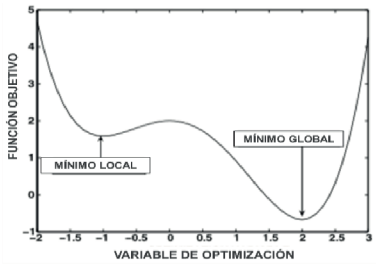



***Figura 1*** *Mínimo y máximo local de* $f(x)$

Cabe mencionar que una función objetivo puede tener muchos óptimos locales y globales. Sólo se garantiza que un óptimo local sea el óptimo global en las funciones convexas (Bubeck, 2015). En matemática, $f(x)$ es una función convexa (ver Figura 2) en un intervalo $(a, b)$, si la cuerda que une dos puntos cualesquiera en el gráfico queda por encima de la función (Espinosa *et al*., 2016). Dicho de manera formal, $f(x)$ es una función convexa si para $\forall x, y \in C, \forall t \in [0,1]$:

$$f(tx + (1 - t)y) \leq tf(x) + (1 - t)f(y),$$

donde $X$ es el dominio de las variables de decisión, y $t$ es un coeficiente en el rango de [0,1].

Un problema de optimización es convexo sólo cuando la $f(x)$ es una función convexa y la región factible $C$ es un conjunto convexo. Por otro lado, las funciones no convexas tienen múltiples óptimos locales, pero sólo uno de ellos es el óptimo global. La mayoría de los problemas en aprendizaje automático y OH son problemas de optimización no convexos. Por lo tanto, utilizar métodos de OH inadecuados sólo puede dar lugar a un óptimo local en lugar de uno global (Bubeck, 2015).

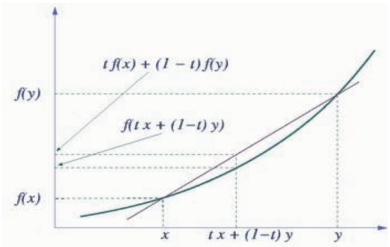



***Figura 2*** *Función convexa de un punto x a y*

### *3.2 Optimización de Hiperparámetros*

El proceso de OH cuenta con cuatro elementos principales: i) un regresor o un clasificador con una función objetivo, ii) un espacio de búsqueda o configuración, iii) un método de búsqueda u optimización, utilizado para encontrar combinaciones de hiperparámetros, y iv) una métrica de evaluación para comparar el rendimiento de las diferentes configuraciones de hiperparámetros (Yang & Shami, 2020). Para problemas de OH, el objetivo es obtener:

$$x^* = \arg\min_{x \in X} f(x)$$

Donde $f(x)$ es la función objetivo a minimizar, la cual puede ser la tasa de error o el error medio cuadrado (para problemas de clasificación y regresión, respectivamente), $x^*$ es la configuración de hiperparámetros que produce el valor óptimo de $f(x)$; y $x$ es un hiperparámetro que puede tomar cualquier valor en el espacio de búsqueda $X$.

La Figura 3 muestra cada una de las actividades involucradas en el proceso de ajuste de hiperparámetros a partir de un enfoque de OH. Consiste en encontrar la combinación óptima de los hiperparámetros para el proceso de aprendizaje de los algoritmos utilizando técnicas de optimización, cabe mencionar que es necesario establecer una métrica de desempeño, dependiendo de la estructura de los datos o el interés del investigador sobre el modelo; por ejemplo: interés en predecir la clase positiva, negativa, o ambas (*accuracy*). La OH trata el

 ISSN en trámite

ajuste de los hiperparámetros como un problema de optimización, en donde la función objetivo es maximizar el rendimiento del algoritmo de aprendizaje, es decir, minimizar los errores de los algoritmos, tratando los hiperparámetros como variables de decisión (Elgeldawi *et al.,* 2021).

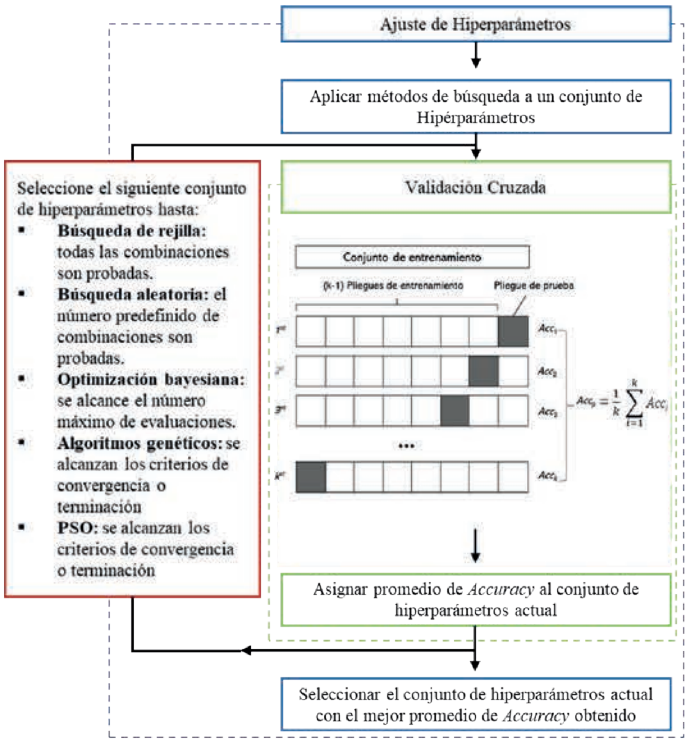



***Figura 3*** *Proceso de ajuste de Hiperparámetros (Elgeldawi et al., 2021).*

Una función de costo determina lo bien que se comporta un modelo de aprendizaje supervisado o no supervisado. Esta función compara las predicciones del modelo con la clase real para determinar el nivel de error del algoritmo. Al tratarse de una formulación matemática, la función de costo expresa el nivel de error de forma numérica, lo que permite mantener los errores bajos (John Paul Mueller & Luca Massaron 2016). En el aprendizaje supervisado, el objetivo es encontrar una función de mapeo óptima que minimice la función de pérdida de las muestras de entrenamiento (Sun *et al.,* 2020). Kotthoff *et al.,* (2017) establecen una definición para el problema de selección de algoritmos y proponen la definición 2.

**Definición 2:** Sea $A$ un conjunto de algoritmos y un conjunto de datos de entrenamiento $D = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$, se determina rendimiento de generalización óptimo de un algoritmo $A^*$ dividiendo $D$ en conjuntos disjuntos de entrenamiento $D_{train}^{(i)}$ y validación $D_{valid}^{(i)}$, funciones de aprendizaje $f_i$ mediante la aplicación de $A^*$ a $D_{train}^{(i)}$, y evaluando el rendimiento predictivo de estas funciones en $D_{valid}^{(i)}$. El problema de selección de algoritmos se puede expresar como:

$$A^* \in \arg\min \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{k} C(A, D_{train}^{(i)}, D_{valid}^{(i)}),$$

donde $C(A, D_{train}^{(i)}, D_{valid}^{(i)})$ es la función de costo lograda mediante A cuando se entrena con $D_{train}^{(i)}$ y se evalúa en $D_{valid}^{(i)}$.

Cabe mencionar que a cada algoritmo de aprendizaje automático adopta la operación para medir el error de predicción por cada instancia, simplemente la ecuación anterior muestra el promedio de los errores, independientemente de cómo lo calcule el algoritmo.

### *3.3 Hiperparámetros en algoritmos de Aprendizaje Supervisado*

Para incrementar el desempeño de los modelos mediante OH, en primer lugar, hay que identificar los hiperparámetros clave que se deben modificar para ajustar los modelos o conjuntos de datos específicos. Para fines del problema de clasificación de ECV, se han seleccionado 3 algoritmos de aprendizaje automático (Bosques Aleatorios, Máquinas de Soporte Vectorial y Aumento extremo del gradiente), a partir de la revisión del estado del arte (Allah *et al.*, 2022; Ayon *et al.,* 2020; Caballé-Cervigón *et al.,* 2020; Uddin *et al.,* 2019; Sánchez *et al.,* 2022). Los estudios indican que estos algoritmos presentan mejores en sus métricas de evaluación.

Los Bosques Aleatorios son una modificación del proceso de *bagging* que consigue mejores resultados gracias a que decorrelaciona los árboles de decisión generados en el proceso. En este algoritmo, los árboles básicos se construyen sobre muchos subconjuntos generados aleatoriamente, y la clase con la mayoría de los votos se seleccionará para ser el resultado final de la clasificación. Por otro lado, las Máquinas de Soporte Vectorial se basan en el concepto de mapear los puntos de datos de un espacio de baja dimensión a uno de alta dimensión para hacerlos linealmente separables; entonces se genera un hiperplano como límite de clasificación para dividir los puntos de datos. El hiperplano es simplemente una línea que divide un plano en dos partes en un espacio bidimensional, donde cada clase se encuentra a ambos lados de la línea. Finalmente, el algoritmo de Aumento extremo del gradiente (XGBoost) se basa en árboles de decisión y supone una mejora sobre otros métodos, como el bosque aleatorio y refuerzo de gradientes. Funciona bien con datos extensos y complejos al utilizar varios métodos de OH.

En la Tabla 1 se describen los hiperparámetros relevantes de los algoritmos antes mencionado. Según el trabajo Yang & Shami, (2020), estos hiperparámetros afectan directamente el entrenamiento del modelo.

***Tabla 1*** *Hiperparámetros relevantes de RF, SVM y XGBoost*

| Alg. | Hiperparámetros |
|---|---|
| Bosque aleatorio | **1.** Función de medición (calidad de las divisiones de los nodos) |
| | **2.** Número de árboles de decisión que hay que combinar |
| | **3.** Número de características a considerar al buscar la mejor división |
| | **4.** Número mínimo de puntos de datos para dividir un nodo de decisión |

 ISSN en trámite

| | |
|---|---|
| | **5.** Número mínimo de puntos de datos para estar en un nodo hoja |
| | **6.** Profundidad máxima del árbol |
| **SVM** | **1.** Parámetro C para la penalización del término de error |
| | **2.** *Kernel*: se utiliza para obtener la función de mapeo; es usado para medir la similitud entre dos puntos de datos *x* e *y*. |
| **XGBoost** | **1.** Profundidad máxima del árbol |
| | **2.** Número de árboles de decisión que hay que combinar |
| | **3.** Tasa de reducción mínima de pérdidas para una división |
| | **4.** Proporción de submuestreo de las instancias |
| | **5.** Proporción de submuestreo de las características. |

### *3.4 Técnicas de Optimización de Hiperparámetros*

El ajuste manual de los hiperparámetros es un enfoque ineficaz ante el gran número de hiperparámetros e interacciones no lineales de la mayoría de los algoritmos, así como la complejidad y el tiempo de evaluación. Estos factores han inspirado investigadores a diseñar y aplicar técnicas de optimización que minimicen el error de predicción de los modelos (Yang & Shami, 2020). A continuación, abordamos las técnicas más utilizadas.

#### *3.4.1 Métodos teóricos de decisión*

La búsqueda de rejilla, del inglés *Grid Search (GS)* funciona evaluando el producto cartesiano de un conjunto finito de valores definido por el usuario. Es fácil ejecutar GS en paralelo porque cada ensayo se ejecuta individualmente y el resultado es independientes de los de otros ensayos. Sin embargo, GS sufre la maldición de la dimensionalidad porque el consumo de recursos informáticos aumenta exponencialmente cuando hay hiperparámetros. Además, un rango de muestreo limitado es aceptable para GS porque no es deseable que haya demasiadas configuraciones (Yu & Zhu, 2020). Por otro parte, la búsqueda aleatoria, del inglés, *Random Search* (RS) en lugar de probar todos los valores en el espacio de búsqueda, como es el caso de GS, RS toma aleatoriamente un número predefinido de valores de los límites superior e inferior del espacio de búsqueda como valores de hiperparámetros candidatos, y luego entrena estos candidatos hasta agotar el presupuesto definido. La base teórica de la RS es que, si el espacio de configuración es lo suficientemente grande, se pueden detectar los óptimos globales, o al menos sus aproximaciones (Yang & Shami, 2020).

#### *3.4.2 Optimización Basada en el Gradiente*

La Optimización Basada en el Gradiente *(OG)* calcula el gradiente de ciertos hiperparámetros para identificar la dirección prometedora y moverse hacia el óptimo. Después de seleccionar aleatoriamente un punto de datos, la técnica se mueve hacia la dirección opuesta al mayor gradiente para localizar el siguiente punto de datos. Por lo tanto, se puede alcanzar un óptimo local después de la convergencia (ver Figura 4). El óptimo local es también el óptimo global para las funciones convexas (Bengio, 2000). Los algoritmos basados en el gradiente tienen una velocidad de convergencia más rápida para alcanzar el óptimo local que los GS y RS.

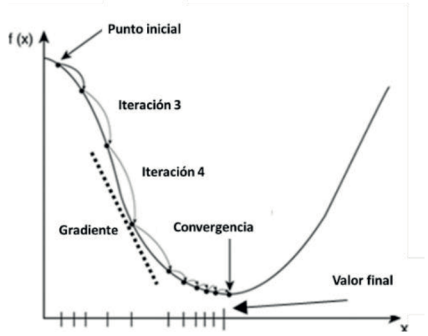



***Figura 4*** *Optimización con base en gradiente*

#### *3.4.3 Optimización Bayesiana*

La Optimización Bayesiana (OB) determina la siguiente configuración de hiperparámetros utilizando dos componentes clave: *un modelo sustituto* y *una función de adquisición* (Injadat et al., 2018). El primer componente tiene como objetivo ajustar todos los puntos observados actualmente a la función objetivo. Después de obtener la distribución predictiva de este componente, la función de adquisición determina el uso de los diferentes puntos equilibrando el compromiso entre la exploración y la explotación. La exploración consiste en muestrear las instancias en las áreas que no han sido muestreadas, mientras que la explotación consiste en muestrear en las regiones actualmente prometedoras donde es más probable que se produzca el óptimo global, basándose en la distribución posterior (Hazan & Klivans, 2017).

## 4. DISCUSIÓN DE LAS TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN

Como trabajo de investigación se ha propuesto la aplicación de una serie de técnicas de optimización, que a partir de la revisión de algunos trabajos Gambella *et al.*, (2021), Injadat *et al.,* (2018), Kotthoff *et al.,* (2017) y Yang & Shami, (2020) se observó una mejora en las métricas de rendimiento de los modelos predictivos aplicado en distintos dominios. El análisis los métodos de optimización identificados en la literatura se presenta en esta sección.

La técnica GS no suele ser capaz de detectar el óptimo global de los parámetros continuos, ya que requiere un conjunto predefinido y finito de valores de hiperparámetros. GS puede implementarse y paralelizarse fácilmente. Sin embargo, su principal inconveniente es la maldición de la dimensionalidad; ya que muestra ineficiencia para el espacio de configuración de hiperparámetros de alta dimensionalidad, esto se debe a que el número de evaluaciones se incrementa (exponencialmente) a medida que crece el número de hiperparámetros a optimizar. Por lo tanto, sólo cuando el espacio de configuración de los hiperparámetros es pequeño, GS puede ser un método eficaz de OH. La técnica RS es más eficiente que GS y puede trabajar con todos los tipos de hiperparámetros. En la práctica, usar RS para evaluar los valores de los hiperparámetros seleccionados aleatoriamente brinda a los analistas la posibilidad de explorar un gran espacio de búsqueda. Sin embargo, RS no tiene en cuenta los resultados previamente probados, por lo que puede implicar muchas evaluaciones innecesarias, lo que disminuye su eficiencia. (Yang & Shami, 2020).

 ISSN en trámite

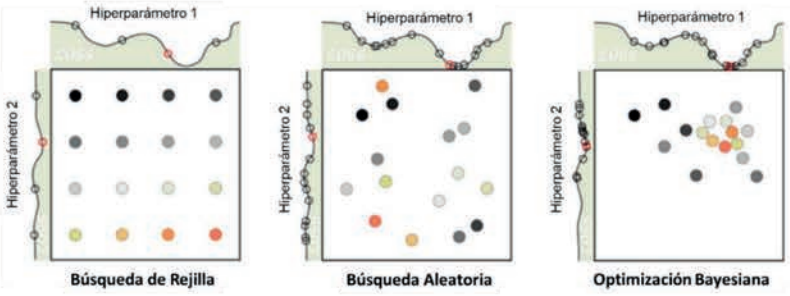



***Figura 5*** *Recorrido del espacio de hiperparámetros con diferentes técnicas de búsqueda. El gradiente de color de los puntos, de negro a amarillento a naranja, indica el orden de la búsqueda* (Passos & Mishra, 2022).

Las técnicas de OG sólo admiten hiperparámetros continuos porque otros tipos, como los categóricos, no tienen direcciones de gradiente. Además, la OG sólo son eficientes para las funciones convexas, ya que para las funciones no convexas se puede alcanzar el óptimo local en lugar del global. Por lo tanto, la OG sólo pueden utilizarse en algunos casos en los que es posible obtener el gradiente de los hiperparámetros; por ejemplo, optimizar la tasa de aprendizaje en redes neuronales.

Los métodos de OB son eficaces para muchos problemas de OH, incluso si la función objetivo es estocástica, no convexa o no continua. Sin embargo, el principal inconveniente de los métodos OB es que, si no consiguen el equilibrio entre exploración y explotación, puede que sólo alcancen un óptimo local en lugar de uno global. RS no tiene esta limitación, ya que no se centra en ninguna zona específica. Además, es difícil paralelizar las técnicas de OB, ya que sus resultados intermedios dependen unos de otros (Decastro-García *et al.*, 2019).

Si bien la OH sobre un modelo de predicción refleja una gran mejora en la calidad de los resultados y la exactitud de los modelos, no podemos pasar por alto la complejidad computacional para implementar estas técnicas. Es un tema crítico porque obtener un buen rendimiento aplicando técnicas de OH podría requerir varias evaluaciones de funciones y recursos computacionales costosos (Decastro-García et al., 2019).

El proyecto de investigación sobre optimización de modelos de aprendizaje automático para la predicción de ECV se estructura, específicamente, sobre la base de conjuntos de datos que presentan esencialmente registros de pacientes (que contienen algunos factores de riesgo) a los que se les diagnosticó una ECV. Los conjuntos de datos que se están contemplando en el desarrollo de la investigación provienen de repositorios públicos de aprendizaje automático de la Universidad de California, Invirne (UCI, 2022). Estos datan del 1988: Cleveland, Hungría, Suiza y Long Beach V. Cada conjunto contiene 76 características, incluido el atributo de predicción, pero todos los experimentos publicados hacen referencia a la utilización de un subconjunto de 14 de ellos (Ver Tabla 2).

Actualmente, en la investigación se está trabajando en el análisis exploratorio del conjunto de datos Cleveland. Las actividades son para verificar la distribución de los datos, identificar datos faltantes y atípicos, etc. En la Figura 6 vemos la distribución de clases del conjunto de datos. Aproximadamente el 54,13% de las instancias están etiquetados con ECV, mientras que el 45,87% no presentan la afección. De este procedimiento, se concluye que el conjunto de datos Cleveland no tiene una distribución equitativa en la clase objetivo, ya que existen más registros de pacientes que no presentan ECV.

***Tabla 2*** *Características relevantes del conjunto de datos de Cleveland*

| Características |
|---|
| Age: edad del paciente en años, sexo-(1 = hombre; 0 = mujer). |
| Sex: sexo del paciente. |
| Cp: tipo de dolor torácico. |
| Trestbps: tensión arterial en reposo (en mm Hg al ingreso en el hospital). El rango normal es de 120/80. |
| Chol: colesterol sérico muestra la cantidad de triglicéridos presentes. |
| Fbs: sangre en ayunas. |
| Restecg: resultados electrocardiográficos en reposo. |
| Talach: frecuencia cardíaca máxima alcanzada. |
| Exang: angina inducida por el ejercicio (1 sí). |
| Oldpeak: depresión del ST inducida por el ejercicio en relación con el reposo. |
| Slope: pendiente del segmento ST máximo del ejercicio. |
| Ca: número de vasos mayores (0-3) coloreados por fluoroscopia. |
| Thal: talasemia (3 normales; 6 defectos fijos; 7 defectos reversibles). |
| Target: -sin enfermedad = 0 y con enfermedad = 1,(estado de la enfermedad angiográfica). |

Se analizaron las distribuciones de las características cuantitativas (*age, tresbps, chol, thalach y oldpeak.*) mediante histogramas de frecuencia (ver en la Figura 7) y se aplicó la prueba de normalidad *Kolmogorov-Smirnov* (KS).

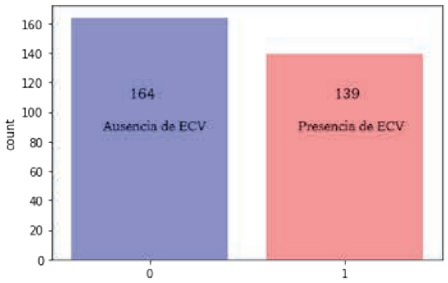
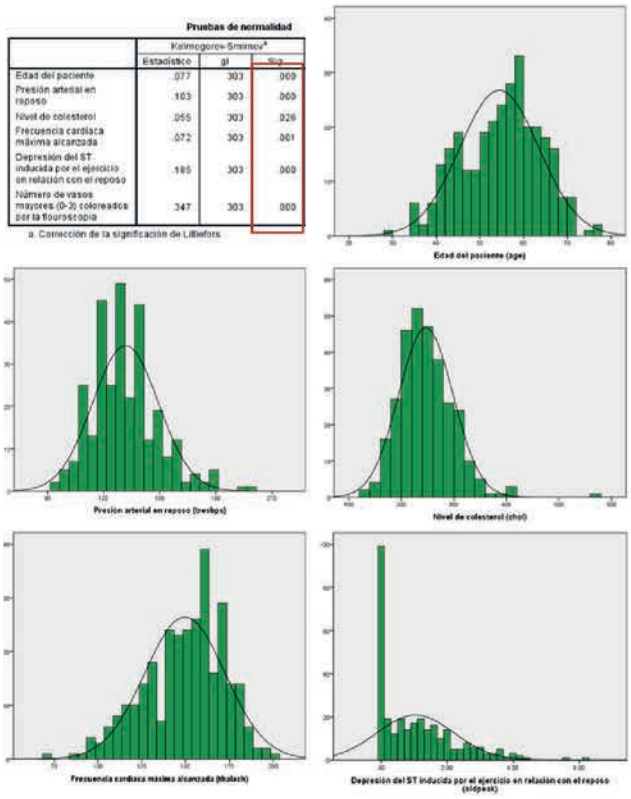



***Figura 6*** *Distribución de clases*

 ISSN en trámite

Los resultados de la prueba señalan que las características (numéricas) no siguen una distribución normal. Para identificar los valores atípicos se crearon diagramas de cajas y bigotes. Las características que presentan datos atípicos son: *tresbps, chol, thalach y oldpeak* (ver en la Figura 8).



Pruebas de normalidad

| | Kolmogorov-Smirnov[a] | | |
|---|---|---|---|
| | Estadístico | gl | Sig. |
| Edad del paciente | .077 | 303 | .000 |
| Presión arterial en reposo | .103 | 303 | .000 |
| Nivel de colesterol | .055 | 303 | .026 |
| Frecuencia cardíaca máxima alcanzada | .072 | 303 | .001 |
| Depresión del ST inducida por el ejercicio en relación con el reposo | .185 | 303 | .000 |
| Número de vasos mayores (0-3) coloreados por la flouroscopia | .347 | 303 | .000 |

a. Corrección de la significación de Lilliefors



*Figura 7 Histogramas de age, tresbps, chol, thalach y oldpeak*

Los datos médicos son en su mayoría discretos, por lo que normalizarlos es esencial para hacer converger las características de estos. La normalización *Z-Score* es uno de los métodos más populares para la estandarización de datos, que explota la media y la desviación estándar de la característica para realizar el proceso. La normalización también es necesaria para que algunos algoritmos modelen los datos correctamente. Considerando $\mu_i$ y $\sigma_i$ como la media y la desviación estándar de la $i$-ésima característica, se calcula el puntaje z ($Z_{ij}$) como está representada en la siguiente ecuación.

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \mu_i}{\sigma_i}$$

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo, se ha discutido la optimización matemática el cual funciona como enfoque de configuración de hiperparámetros. Además, se describieron algunas técnicas para diferentes modelos de aprendizaje automático. Ha quedado claro que la optimización constituye un aspecto fundamental de muchos modelos de aprendizaje automático, donde el entrenamiento de estos modelos se puede plantear como un problema de optimización. Para aplicar las técnicas de optimización, los tipos de hiperparámetros son la principal preocupación para la selección adecuada del método OH.

Antes del proceso de modelado, la selección de características relevantes es una actividad que no debe omitirse, sobre todo si en nuestro conjunto de datos existen características que no aportan información al problema que intentamos resolver. Para fines de la investigación, en la fase de selección de características se realizará de dos formas; i) aplicar un filtro natural, donde un médico especialista pueda determinar las características que son de más relevancia para el diagnóstico de una ECV y ii) aplicar un conjunto de técnicas de selección de atributos, por ejemplo: *Sequential Feature Selection* (SFS), *Recursive Feature Elimination* (RFE) o con base en algún estimador.

Se ha identificado en los trabajos de Gambella *et al.*, (2021), Injadat *et al.,* (2018), Kotthoff *et al.,* (2017) y Yang & Shami, (2020), que la técnica de Optimización Bayesiana, en general, es la opción recomendada para optimizar un modelo de aprendizaje automático, si los subconjuntos seleccionados aleatoriamente son altamente representativos del conjunto de datos dado, ya que puede optimizar de forma eficiente todos los tipos de hiperparámetros. Sin embargo, existen otras técnicas de optimización que se deben estudiar, por ejemplo: los algoritmos genéticos (GA, del inglés, *Genetic Algorithm*) y la optimización de enjambre de partículas (PSO, del inglés, *Particle Swart Optimization*).

Además, se continuará con el análisis de los hiperparámetros de los algoritmos seleccionados. Esta fase ayudará a obtener el conocimiento para establecer un espacio de búsqueda adecuado para el proceso de optimización, que es uno de los componentes necesarios de cualquier técnica de optimización. Para abordar los problemas de OH, existen muchas bibliotecas de código abierto que contienen la mayoría de las técnicas. *Sklearn, Spearmint, BayesOpt, Hyperopt, SMAC, BOHB, Optunity* son las bibliotecas más populares de Python. Estas bibliotecas se utilizarán para el desarrollo de los modelos de predicción de ECV. Por último, en la fase de evaluación de los modelos se aplicarán las distintas métricas de desempeño: *sensitivity, specificity, precision,* y *accuracy* para identificar la configuración óptima de hiperparámetros que dan a un modelo buenos resultados de predicción a partir de su entrenamiento con un conjunto de datos de ECV en particular.

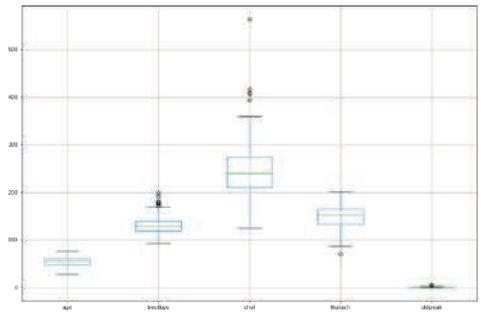


***Figura 8*** *Diagrama de cajas y bigotes de age, tresbps, chol, thalach y oldpeak.*

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) así como al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET).

REFERENCIAS

Allah, E. M. A., El-Matary, D. E., Eid, E. M., & Dien, A. S. T. El. (2022). Performance Comparison of Various Machine Learning Approaches to Identify the Best One in Predicting Heart Disease. *Journal of Computer and Communications*, *10*(02), 1–18. https://doi.org/10.4236/jcc.2022.102001

Ayon, S. I., Islam, M. M., & Hossain, M. R. (2020). Coronary Artery Heart Disease Prediction: A Comparative Study of Computational Intelligence Techniques. *IETE Journal of Research*, *0*(0), 1–20. https://doi.org/10.1080/03772063.2020.1713916

Bengio, Y. (2000). Gradient-Based Optimization of Hyperparameters. *Neural Computation*, *12*(8), 1889–1900. https://doi.org/10.1162/089976600300015187

Bubeck, S. (2015). Convex optimization: Algorithms and complexity. *Foundations and Trends in Machine Learning*, *8*(3–4), 231–357. https://doi.org/10.1561/2200000050

Caballé-Cervigón, N., Castillo-Sequera, J. L., Gómez-Pulido, J. A., Gómez-Pulido, J. M., & Polo-Luque, M. L. (2020). Machine Learning Applied to Diagnosis of Human Diseases: A Systematic Review. *Applied Sciences*, *10*(15), 5135. https://doi.org/10.3390/app10155135

Decastro-García, N., Muñoz Castañeda, Á. L., Escudero García, D., & Carriegos, M. V. (2019). Effect of the Sampling of a Dataset in the Hyperparameter Optimization Phase over the Efficiency of a Machine Learning Algorithm. *Complexity*, *2019*. https://doi.org/10.1155/2019/6278908

Elgeldawi, E., Sayed, A., Galal, A. R., & Zaki, A. M. (2021). *Hyperparameter Tuning for Machine Learning Algorithms Used for Arabic Sentiment Analysis*. 1–21.

Espinosa Paredes, G., & Vázquez Rodríguez, A. (2016). Aplicaciones de programación no lineal. *Aplicaciones de Programación No Lineal*. https://doi.org/10.3926/oss.21

Gambella, C., Ghaddar, B., & Naoum-Sawaya, J. (2021). Optimization problems for machine learning: A survey. *European Journal of Operational Research*, *290*(3), 807–828. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.08.045

Hazan, E., & Klivans, A. (2017). *Hyperparameter Optimization : A Spectral Approach*.

Injadat, M., Salo, F., Nassif, A. B., Essex, A., & Shami, A. (2018). Bayesian Optimization with Machine Learning Algorithms Towards Anomaly Detection. *2018 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2018 - Proceedings*. https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2018.8647714

Kotthoff, L., Thornton, C., Hoos, H. H., Hutter, F., & Leyton-Brown, K. (2017). Auto-WEKA 2.0: Automatic model selection and hyperparameter optimization in WEKA. *Journal of Machine Learning Research*, *18*, 1–5. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05318-5_4

Lavesson, N., & Davidsson, P. (2006). Quantifying the impact of learning algorithm parameter tuning. *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, *1*(1), 395–400.

Mantovani, R. G., Rossi, A. L. D., Vanschoren, J., Bischl, B., & Carvalho, A. C. P. L. F. (2015). To tune or not to tune: Recommending when to adjust SVM hyper-parameters via meta-learning. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, *2015-Septe*. https://doi.org/10.1109/IJCNN.2015.7280644

Nawaz, M. S., Shoaib, B., & Ashraf, M. A. (2021). Intelligent Cardiovascular Disease Prediction Empowered with Gradient Descent Optimization. *Heliyon*, *7*(5), e06948. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06948

Passos, D., & Mishra, P. (2022). A tutorial on automatic hyperparameter tuning of deep spectral modelling for regression and classification tasks. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *223*(January). https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2022.104520

Sánchez E., Hernández Y. & Ortiz J. (2022). Breve revisión de la literatura sobre Modelos Predictivos para la Detección de Enfermedades Cardiovasculares. Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada. Vol. 5. Num 1

Stephen P. Bradley, A. C. H. and T. L. M. (1977). Mathematical Programming: An Overview. *Applied Mathematical Programming*, 1–37.

Sun, S., Cao, Z., Zhu, H., & Zhao, J. (2020). A Survey of Optimization Methods from a Machine Learning Perspective. *IEEE Transactions on Cybernetics*, *50*(8), 3668–3681. https://doi.org/10.1109/TCYB.2019.2950779

UCI Machine Learning Repository, "Heart disease data set," 2020, http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/heart+disease.

Uddin, S., Khan, A., Hossain, M. E., & Moni, M. A. (2019). Comparing different supervised machine learning algorithms for disease prediction. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, *19*(1), 281. https://doi.org/10.1186/s12911-019-1004-8

Van Rijn, J. N., & Hutter, F. (2018). Hyperparameter importance across datasets. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, *August*, 2367–2376. https://doi.org/10.1145/3219819.3220058

Weerts, H. J. P., Müller, A. C., & Vanschoren, J. (2018). *Importance of Tuning Hyperparameters of Machine Learning Algorithms*.

Yang, L., & Shami, A. (2020). On hyperparameter optimization of machine learning algorithms: Theory and practice. *Neurocomputing*, *415*, 295–316. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.07.061

Yu, T., & Zhu, H. (2020). *Hyper-Parameter Optimization: A Review of Algorithms and Applications*. 1–56. http://arxiv.org/abs/2003.05689.

 ISSN en trámite

# Experimento para capturar datos fisiológicos e interpretar estados cognitivos en evaluaciones UX

**Edgar Omar Bañuelos Lozoya, Gabriel González Serna y Nimrod González Franco**

*TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México;*
*edgar.banuelos19ca@cenidet.edu.mx,*
*{gabriel.gs, nimrod.gf}@cenidet.tecnm.mx*

**Resumen:** La evaluación de la experiencia de usuario es de naturaleza subjetiva, por lo que se busca utilizar datos inherentes al usuario para interpretar sus estados cognitivos e identificar la relación que tienen con los elementos gráficos y de interacción que se muestran en la interfaz. En este artículo se presenta un experimento para capturar datos fisiológicos y conformar un conjunto de datos para probar flujos de procesamiento de aprendizaje automático que detecten la carga de trabajo del usuario y complementen las evaluaciones tradicionales.

*Palabras clave:* UX, mental state, cognitive state, workload, physiological data

## 1. INTRODUCCIÓN

La experiencia de usuario, del inglés *user experience* (UX), se refiere a las percepciones y respuestas de un usuario que resultan del uso o uso anticipado de un sistema, producto o servicio (ISO, 2010); involucra varias facetas y es consecuencia del estado interno del usuario, las características del sistema o aplicación y el contexto donde la interacción ocurre (Hassenzahl y Tractinsky, 2006).

Los mecanismos tradicionales de evaluación UX son de naturaleza subjetiva porque se basan en técnicas que dependen de lo reportado por los usuarios y del análisis del evaluador, influenciados por su percepción y criterio, entre otros factores (Law y Van Schaik, 2010; van de Laar *et al.*, 2013; Law *et al.*, 2014). Se han propuesto varios enfoques que complementan estas técnicas con inferencias de estados mentales a partir de datos fisiológicos y de comportamiento del usuario (p. ej., Lasa *et al.* (2015); Matthews *et al.* (2020)), sin embargo, estos enfoques se han centrado en el análisis de estados emocionales del modelo de afecto presentado por Posner *et al.* (2005).

Heard *et al.* (2018) describen la carga de trabajo como la relación entre los recursos necesarios para lograr una tarea y los recursos que la persona tiene disponibles para conseguirlo. Vidulich y Tsang (2012) convergen en que la carga de trabajo, o carga de trabajo mental, es una función de la oferta y demanda de recursos atencionales o de procesamiento; además de que puede ser expresada como una experiencia subjetiva, con variaciones en el rendimiento de la tarea y con manifestaciones fisiológicas.

La carga de trabajo ha sido detectada a partir de tecnologías como electroencefalograma (EEG) y seguimiento ocular, debido a su relación con datos de la señal de la actividad eléctrica cerebral y de la variación de la dilatación de la pupila (p. ej., Yang *et al.* (2019); Jimenez-Molina *et al.* (2018)) y ha sido sido estudiada en contextos tan diversos como: juegos virtuales, conducción, control de tráfico aéreo, entre otros (p. ej., Aricò *et al.* (2016); Yokoyama *et al.* (2018)). Sin embargo, la relación entre la carga de trabajo que presenta el usuario al interactuar con un producto digital y la influencia en su percepción de la experiencia aún no se comprende adecuadamente; aunado a que las soluciones propuestas deben cumplir con los requerimientos demandados por la industria del software (Léger *et al.*, 2019).

En este artículo se describe un primer experimento para construir un conjunto de datos que permita realizar pruebas de clasificación de carga de trabajo con modelos de aprendizaje automático. El objetivo de nuestra investigación es complementar la experiencia de usuario con base en la interpretación de estados cognitivos a partir de datos de electroencefalograma, respuesta galvánica en piel (GSR), fotopletismografía (PPG) y diámetro de pupila.

## 2. SELECCIÓN DEL ESTÍMULO COGNITIVO

Se analizaron estímulos para inducir estados cognitivos en diversas investigaciones:

 ISSN en trámite

- Huang *et al.* (2016) emplean una aplicación que presenta preguntas aritméticas con opciones de respuesta acomodadas de manera aleatoria, con varios niveles de dificultad agregando una barra de tiempo para inducir estrés.
- Frey *et al.* (2016) inducen carga de trabajo mental a través de un juego de laberinto virtual con cuatro niveles de dificultad y tareas con interacción con teclado o toque.
- González Franco (2017) utiliza videos consistentes a los gustos y preferencias de cada sujeto para inducir motivación y una prueba de coeficiente intelectual para inducir estrés cognitivo.
- Jimenez-Molina *et al.* (2018) analizan carga cognitiva a través del seguimiento ocular al navegar libremente por un sitio web ficticio.
- Lim *et al.* (2018) presentan un experimento para generar carga de trabajo mental con actividades del test de capacidad simultánea o SIMKAP del *Vienna Test System*, las cuales consisten en identificar coincidencias de números mientras se realizan preguntas aritméticas o relacionadas con eventos o datos de una agenda ficticia.
- Shojaeizadeh *et al.* (2019) estimulan demanda en una tarea con preguntas matemáticas del test estandarizado *Graduate Record Examination*, usado para el ingreso a los programas de posgrado en Estados Unidos.
- Arana Llanes (2020) describe en su tesis doctoral una serie de pruebas para generar estados de concentración y atención tales como: prueba de cinco dígitos, D2, prueba de caras, prueba de patrones visuales, entre otras.
- Gjoreski *et al.* (2020) emplean una serie de pruebas cognitivas con diferente dificultad para la construcción del primer conjunto de datos, para el segundo conjunto de datos hacen uso del tradicional juego de "vibora" variando la dificultad a través de la velocidad.

De los anteriores se seleccionó el estímulo para inducir carga de trabajo mental utilizado en *CogLoad* (Gjoreski *et al.*, 2020) e implementado inicialmente por Haapalainen *et al.* (2010), el cual consiste en seis pruebas cognitivas que cubren aspectos de percepción visual y factores espaciales como flexibilidad de cierre, velocidad de cierre y velocidad de percepción; aspectos que también son experimentados por un usuario al interactuar con un producto digital (Gwizdka, 2004; Turpin *et al.*, 2016; Lallé *et al.*, 2017).

## 3. EXPERIMENTO

### *3.1 Software*

Se utilizaron varias herramientas de software cuyas funciones principales fueron las siguientes:

- PruebasCognitivas: registrar datos de los participantes y de las plantillas de pruebas; aplicar las pruebas y almacenar resultados, marcadores de segmentos y respuestas de auto-reportes NASA-TLX y estrés; enviar flujo de datos de marcadores hacia la herramienta de grabación; calcular valores de carga de trabajo y exportar archivos de resultados de las pruebas.
- ShimmerCapture: calibrar dispositivo Shimmer GSR+, capturar datos y enviarlos hacia la herramienta de grabación.
- Consensys: configurar dispositivo Shimmer GSR+.
- Gazepoint Control: calibrar dispositivo Gazepoint GP3, capturar datos y publicarlos para otras herramientas mediante conexiones de red.
- GazepointGP3-LSL: interfaz con Gazepoint Control para recibir los datos del dispositivo de seguimiento ocular y enviarlos hacía la herramienta de grabación.
- LabRecorder: herramienta de grabación de flujos de datos mediante el sistema LSL (del inglés *Lab Streaming Layer*).

Consensys, Gazepoint Control y LabRecorder se utilizaron tal cual son proporcionadas por sus desarrolladores.

PruebasCognitivas y GazepointGP3-LSL se desarrollaron para esta investigación; para la primera se consideró el estímulo cognitivo adaptado; para la segunda se tomó como base el código Python [1] que consume la Open Gaze API y se implementó una versión con interfaz gráfica de usuario. PruebasCognitivas también permite definir tareas genéricas para interactuar con un sitio web o aplicación de escritorio, ya que despliega las instrucciones en una ventana sobrepuesta para que el usuario pueda leer y dar seguimiento a cada uno de los pasos.

ShimmerCapture [2] es una herramienta publicada por el fabricante con permiso para redistribución y uso, por lo que se modificó para agregar la funcionalidad de transmitir los datos capturados utilizando el sistema LSL.

El proceso de captura de datos fisiológicos y de comportamiento se fundamentó en el sistema LSL [3], el cual es un sistema para la adquisición y sincronización de datos multimodales para experimentos relacionados con interfaces humano-computadora y de otros tipos. Actualmente consiste en una librería base y una serie de herramientas que incluyen el programa de grabación LabRecorder, importadores de archivo y aplicaciones para trabajar con datos diversos (EEG, fNIRS, seguimiento ocular, GSR, etc.) y de varios fabricantes (Emotiv, BrainVision, SMI, Tobii, iMotions, etc.), las cuales son mantenidas por los propios fabricantes o desarrolladas por miembros de la comunidad *open source*. Junto con LSL, fue diseñada la especificación de archivo XDF (del inglés *Extensible Data Format*), este formato es utilizado para almacenar en forma binaria los datos capturados y estructurar los metadatos en un esquema XML.

[1] Publicado por el usuario Moein Razavi en GitHub: https://bit.ly/3nl8WBp
[2] Código disponible en: https://github.com/ShimmerEngineering/Shimmer-C-API
[3] Documentación disponible en: https://labstreaminglayer.readthedocs.io/index.html

 ISSN en trámite

Se utilizó el software EmotivPRO para la calibración, captura y envío de datos de electroencefalograma hacia la herramienta de grabación, sin embargo se descartó la obtención de estos datos debido a que se presentaron problemas con los primeros participantes para calibrar y adquirir una señal de buena calidad a través del gorro y el dispositivo EPOC Flex.

### *3.2 Equipo y datos recolectados*

Todos los datos fueron transmitidos y recolectados dentro de una misma computadora. Para la captura de datos fisiológicos y de comportamiento se utilizaron tres dispositivos comerciales (tabla 1), aunque finalmente EPOC Flex fue descartado por problemas de calibración.

Tabla 1. Dispositivos de captura de datos.

| | Shimmer3 GSR+ | Gazepoint GP3 | Emotiv EPOC Flex |
|---|---|---|---|
| Datos | GSR y tasa de latidos a través de PPG | Seguimiento ocular y pupila | EEG |
| Tasa de muestreo | 102 Hz | 60 Hz | 128 Hz |
| Ubicación de sensores | Dos dedos de una mano y clip en oreja | Frente al usuario, entre el teclado y el monitor | Gorro de 32 canales colocado en la cabeza |
| Conexión | Bluetooth | USB | Bluetooth |

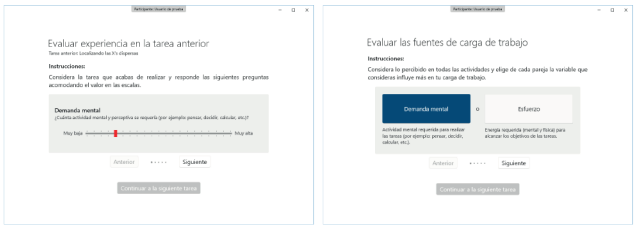
El participante utilizaba un monitor externo al cual se le compartía el escritorio en modo extendido y el experimentador supervisaba algunos parámetros a través del monitor de la computadora portátil. Aunque no representa un dispositivo físico, PruebasCognitivas transmite también los datos de inicio y fin de cada segmento con una tasa de muestreo irregular.

### *3.3 Estímulos*

El experimento consistió de dos sesiones de pruebas con tareas presentadas al usuario a través de la herramienta de software PruebasCognitivas.

En la primera sesión se despliegan a pantalla completa tres bloques con seis tareas cognitivas cada uno y con una tarea de relajación entre cada bloque (respiración guiada). Las actividades de cada bloque tienen una misma dificultad, intercalando los bloques en dificultad baja, alta y media. Antes de cada tarea se muestran las instrucciones para llevarla a cabo y después de cada tarea se solicita contestar el cuestionario de autoevaluación NASA-TLX/Estrés (figura 1a). Previo a finalizar la prueba se solicita contestar también el cuestionario de comparaciones entre subescalas NASA-TLX para identificar las fuentes de carga de trabajo (figura 1b).

Los estímulos de tareas cognitivas son similares a los utilizados por Gjoreski *et al.* (2020) pero agregando una barra de tiempo límite. Los seis tipos de tareas cognitivas se describen a continuación:




(a) Autoevaluación NASA-TLX/Estrés. (b) Comparaciones NASA-TLX.

Figura 1. Cuestionarios de autoevaluación.

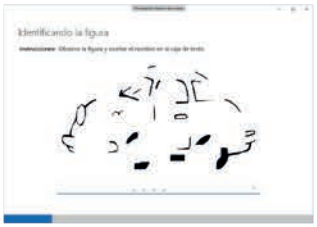
1. Identificando la figura (figura 2a): observar trazos incompletos de un dibujo y tratar de identificarlo, niveles de dificultad variando la complejidad de las imágenes.
2. Encontrando las A's (figura 2b): encontrar las palabras que incluyan la letra "a", variando la dificultad aumentando la longitud de las palabras.
3. Comparando números (figura 2c): comparar dos números y decidir si son o no el mismo, la dificultad es manipulada incrementando el número de dígitos y el número de dígitos que tienen que comparar para identificar la primer diferencia.
4. Buscando los caminos (figura 2d): seguir visualmente lineas e identificar su destino en el lado opuesto, dificultad añadida al agregar puntos de cruce y longitud a las lineas.
5. Encontrando el patrón oculto (figura 2e): identificar los trazos de una imagen dentro de otra, se utilizan ocho imágenes para comparación aumentando la complejidad en cada nivel de dificultad.
6. Localizando las X's dispersas (figura 2f): encontrar "x" distribuidas junto con otras letras en la pantalla, el criterio de dificultad considera el número de letras, la proximidad o distribución de las mismas y la existencia de letras de forma similar o rotadas.

La segunda sesión de pruebas consiste de tres tareas para realizar actividades guiadas dentro de sitios web. De manera similar se muestran las instrucciones y el cuestionario de autoevaluación NASA-TLX/Estrés antes y después de cada tarea, respectivamente, con un ejercicio de relajación entre ellas. Las tareas se realizan en un navegador web y la descripción de cada paso se muestra en una ventana con configuración "siempre al frente" posicionada en la esquina superior derecha. En este caso no se aplica el cuestionario de comparaciones NASA-TLX ya que los resultados se toman de las respuestas de la primera sesión.

El objetivo de cada una de las tres tareas "tipo web" es el siguiente:

1. Conociendo el sitio (figura 3a): identificar la estructura de la página principal del TecNM Cenidet y algunos otros elementos del sitio.
2. Conociendo el Chat bot (figura 3b): interactuar con el asistente virtual *chat bot* del sitio web del Sistema

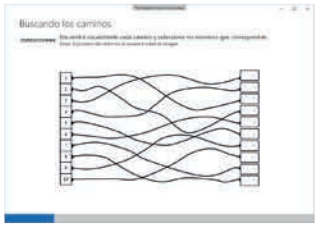
 ISSN en trámite



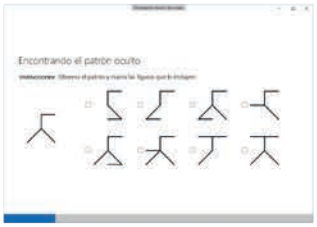

(a) Identificando la figura.

(b) Encontrando las A's.

(c) Comparando números.




(d) Buscando los caminos.




(e) Encontrando el patrón oculto.

(f) Localizando las X's dispersas.

Figura 2. Tareas cognitivas.

(a) Conociendo el sitio.

(b) Conociendo el Chat bot.

(c) Conociendo el Sistema de Registro.

Figura 3. Tareas web.

de Registro de Aspirantes del TecNM Cenidet y conocer algunos detalles de los programas de estudio y requisitos.

3. Conociendo el Sistema de Registro (figura 3c): recorrer las secciones principales del sitio web del Sistema de Registro de Aspirantes del TecNM Cenidet.

### *3.4 Participantes*

Se capturaron datos de 22 participantes, 9 mujeres y 13 hombres, con una media de edad de 23.7 años. El 55 % fueron reclutados de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales del TecNM Parral y el resto de círculos sociales. Del total de los participantes, 15 son estudiantes y el resto son egresados de diversas carreras. A los estudiantes del TecNM Parral se les compensó en su nota de calificaciones de la materia de Sistemas Programables. Todos los participantes llenaron previamente y en-línea un formulario con sus datos personales, datos escolares, condiciones de salud preexistentes, entre otros, que permitieron determinar su idoneidad para el experimento y definir la agenda; una vez en el lugar de la prueba se les solicitó firmar un consentimiento escrito.

La mayor parte del experimento fue realizado en instalaciones del TecNM Parral, con previa autorización de la dirección y atendiendo las recomendaciones del Comité de Higiene y Seguridad de la institución.

## 4. PREPARACIÓN DEL CONJUNTO DE DATOS

Esta etapa consistió en realizar actividades de preprocesamiento del conjunto de datos y generar una versión inicial para la experimentación con modelos de aprendizaje automático. Se llevó a cabo en un entorno local de desarrollo utilizando el IDE Visual Studio Code v.1.63.2 con soporte para Jupyter *notebooks* y un kernel Python v.3.9.5 64-bit, además de las librerías `pandas` y `numpy` para manejo de datos en general, `pyxdf` para lectura y procesado inicial de archivos XDF, además de `os` y `glob` para manejo de directorios y extensiones de archivo.

El código generado tiene como entrada la ruta de la carpeta que contiene los archivos XDF con los datos grabados por LabRecorder (un archivo por participante) y el archivo separado por comas (extensión CSV) de la exportación de resultados de PruebasCognitivas. Presenta como salidas un archivo CSV de datos procesados por participante y otro con todos los datos en su conjunto.

El siguiente flujo de tareas se repite para las dos carpetas con los datos de cada una de las sesiones de prueba realizadas:

 ISSN en trámite

1. Obtener valores de etiquetado.
2. Para cada archivo XSD dentro de la carpeta:
   *a*) Leer archivo.
   *b*) Separar flujos de datos.
   *c*) Conjuntar los datos Shimmer y Gazepoint.
   *d*) Adicionar marcadores de segmento.
   *e*) Agregar participante y sesión.
   *f*) Etiquetar datos.
   *g*) Exportar datos del participante.
   *h*) Adicionar datos al conjunto completo de prueba.
3. Exportar datos del conjunto completo de prueba.

Para terminar el preprocesamiento inicial del conjunto de datos, se concatenaron los datos de ambas sesiones de prueba y se generó un solo archivo separado por comas con un tamaño de 4 GB y un total de 8,569,549 registros.

## 5. CONCLUSIONES

Este artículo presenta la descripción de un experimento donde se capturan datos fisiológicos de usuarios en un contexto de evaluación UX. El experimento se divide en dos sesiones de prueba, la primera sesión para realizar un conjunto de tareas cognitivas y la segunda sesión para interactuar con el producto digital a evaluar; definiendo esta estructura para que los datos obtenidos en la primera sesión permitan identificar el comportamiento fisiológico-cognitivo del usuario y sean la base para entrenar modelos de aprendizaje para predecir diferentes niveles de carga de trabajo en la sesión de evaluación.

Como trabajo futuro se analizará la correlación entre las respuestas de los cuestionarios de autoreporte y la carga de trabajo esperada considerando la dificultad de cada tarea, esto con la finalidad de realizar ajustes a la complejidad, estructura y duración de la primera sesión.

## AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación.

## REFERENCIAS

Arana Llanes, J.Y. (2020). *Explotación de estados cognitivos en entornos e-learning a partir de BCI no invasivas*. Tesis de doctorado, TecNM/CENIDET.

Aricò, P., Borghini, G., Di Flumeri, G., Colosimo, A., Bonelli, S., Golfetti, A., Pozzi, S., Imbert, J.P., Granger, G., Benhacene, R., y Babiloni, F. (2016). Adaptive automation triggered by EEG-based mental workload index: A passive brain-computer interface application in realistic air traffic control environment. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10(OCT2016). doi:10.3389/fnhum.2016.00539.

Frey, J., Daniel, M., Castet, J., Hachet, M., y Lotte, F. (2016). Framework for Electroencephalography-Based Evaluation of User Experience. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, 2283–2294. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. doi:10.1145/2858036.2858525.

Gjoreski, M., Kolenik, T., Knez, T., Luštrek, M., Gams, M., Gjoreski, H., y Pejović, V. (2020). Datasets for Cognitive Load Inference Using Wearable Sensors and Psychological Traits. *Applied Sciences*, 10(11), 3843. doi:10.3390/app10113843.

González Franco, N. (2017). *Metodología UXEeg para la evaluación de la Experiencia del Usuario en personas con discapacidad a partir de Interfaces Cerebro Computadora*. Tesis de doctorado, TecNM/CENIDET.

Gwizdka, J. (2004). Email Task Management Styles: The Cleaners and the Keepers. In *CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '04, 1235–1238. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. doi:10.1145/985921.986032.

Haapalainen, E., Kim, S., Forlizzi, J.F., y Dey, A.K. (2010). Psycho-Physiological Measures for Assessing Cognitive Load. In *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Ubiquitous Computing*, UbiComp '10, 301–310. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. doi:10.1145/1864349.1864395.

Hassenzahl, M. y Tractinsky, N. (2006). User experience - A research agenda. *Behaviour and Information Technology*, 25(2), 91–97. doi:10.1080/01449290500330331.

Heard, J., Harriott, C.E., y Adams, J.A. (2018). A survey of workload assessment algorithms. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 48(5), 434–451. doi:10.1109/THMS.2017.2782483.

Huang, M.X., Li, J., Ngai, G., y Leong, H.V. (2016). StressClick: Sensing Stress from Gaze-Click Patterns. In *Proceedings of the 24th ACM International Conference on Multimedia*, MM '16, 1395–1404. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. doi:10.1145/2964284.2964318.

ISO (2010). ISO 9241-210:2010 Ergonomics of human-system interaction - Part 210: Human-centred design for interactive systems. Technical report, International Organization for Standardization.

Jimenez-Molina, A., Retamal, C., y Lira, H. (2018). Using Psychophysiological Sensors to Assess Mental Workload During Web Browsing. *Sensors*, 18(2), 458. doi:10.3390/s18020458.

Lallé, S., Conati, C., y Carenini, G. (2017). Impact of Individual Differences on User Experience with a Real-World Visualization Interface for Public Engagement. In *Proceedings of the 25th Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization*, UMAP '17, 369–370. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. doi:10.1145/3079628.3079634.

Lasa, G., Justel, D., y Retegi, A. (2015). Eyeface: A new multimethod tool to evaluate the perception of conceptual user experiences. *Computers in Human Behavior*, 52, 359–363. doi:10.1016/j.chb.2015.06.015.

Law, E.L.C., van Schaik, P., y Roto, V. (2014). Attitudes towards user experience (UX) measurement. *Inter-*

ISSN en trámite

*national Journal of Human-Computer Studies*, 72(6), 526–541. doi:10.1016/j.ijhcs.2013.09.006.

Law, E.L. y Van Schaik, P. (2010). Modelling user experience - An agenda for research and practice. *Interacting with Computers*, 22(5), 313–322. doi:10.1016/j.intcom.2010.04.006.

Léger, P.M., Courtemanche, F., Fredette, M., y Sénécal, S. (2019). A Cloud-Based Lab Management and Analytics Software for Triangulated Human-Centered Research. In F.D. Davis, R. Riedl, J. vom Brocke, P.M. Léger, y A.B. Randolph (eds.), *Information Systems and Neuroscience*, 93–99. Springer International Publishing, Cham. doi:10.1007/978-3-030-01087-4_11.

Lim, W.L., Sourina, O., y Wang, L.P. (2018). STEW: Simultaneous Task EEG Workload Data Set. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(11), 2106–2114. doi:10.1109/TNSRE.2018.2872924.

Matthews, O., Davies, A., Vigo, M., y Harper, S. (2020). Unobtrusive arousal detection on the web using pupillary response. *International Journal of Human-Computer Studies*, 136, 102361. doi:10.1016/j.ijhcs.2019.09.003.

Posner, J., Russell, J.A., y Peterson, B.S. (2005). The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology. *Development and Psychopathology*, 17(3), 715–734. doi:10.1017/S0954579405050340.

Shojaeizadeh, M., Djamasbi, S., Paffenroth, R.C., y Trapp, A.C. (2019). Detecting task demand via an eye tracking machine learning system. *Decision Support Systems*, 116, 91–101. doi:10.1016/j.dss.2018.10.012.

Turpin, L., Kelly, D., y Arguello, J. (2016). To Blend or Not to Blend? Perceptual Speed, Visual Memory and Aggregated Search. In *Proceedings of the 39th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, SIGIR '16, 1021–1024. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. doi:10.1145/2911451.2914739.

van de Laar, B., Gürkök, H., Bos, D.P.O., Nijboer, F., y Nijholt, A. (2013). Brain-Computer Interfaces and User Experience Evaluation. In B.Z. Allison, S. Dunne, R. Leeb, J. Del R. Millán, y A. Nijholt (eds.), *Towards Practical Brain-Computer Interfaces: Bridging the Gap from Research to Real-World Applications*, 223–237. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-29746-5_11.

Vidulich, M.A. y Tsang, P.S. (2012). Mental workload and situation awareness. In G. Salvendy (ed.), *Hanbook of Human Factors and Ergonomics*, chapter 8, 243–273. John Wiley & Sons, Inc., cuarta edi edition.

Yang, S., Yin, Z., Wang, Y., Zhang, W., Wang, Y., y Zhang, J. (2019). Assessing cognitive mental workload via EEG signals and an ensemble deep learning classifier based on denoising autoencoders. *Computers in Biology and Medicine*, 109, 159–170. doi:10.1016/j.compbiomed.2019.04.034.

Yokoyama, H., Eihata, K., Muramatsu, J., y Fujiwara, Y. (2018). Prediction of Driver's Workload from Slow Fluctuations of Pupil Diameter. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 1775–1780. doi:10.1109/ITSC.2018.8569279.

 ISSN en trámite

# Extensión del metamodelo de almacén de datos común CWM mediante puntos de vista que representen preferencias de usuarios

**Castro Soto Juan V.*.González García Moisés.**. Fragoso Díaz Olivia G.*****

**Cuernavaca, Morelos, México*
*Mex (e-mail: juanvicst@gmail.com).*
***Cuernavaca, Morelos, México*
*Mex (e-mail: moises.gg@cenidet.tecnm.mx).*
****Cuernavaca, Morelos, México Mex*
*(e-mail: olivia.fd@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: Una de las practicas utilizadas en el almacenamiento de datos es recopilar información durante el desarrollo de los proyectos y posteriormente utilizarla para realizar estimaciones al inicio del desarrollo o para soporte a la toma de decisiones. Un proceso de toma de decisiones involucra a usuarios expertos y/o novatos que manipulan distintos tipos de conocimiento. Debido a esto, cada usuario tiene distinto punto de vista sobre la información y su análisis puede diferir entre los miembros del equipo. Actualmente el metamodelo de almacén de datos común (CWM) no permite registrar metadatos de las preferencias de los usuarios sobre los datos contenidos en un almacén de datos. En este trabajo extendemos CWM para registrar metadatos de las preferencias (puntos de vista) de los usuarios. Además, CWM se implementa para lograr un correcto intercambio de metadatos entre las fases y procesos que integran el almacén de datos.

*Keywords:* CWM, toma de decisiones, punto de vista, metadatos, almacén de datos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la mayoría de las empresas almacenan información y uno de sus propósitos es la toma de decisiones basadas en esa información. Por lo tanto, es necesario que se recopile y almacenen los datos generados de sus procesos. El hecho de solo estar constantemente recabando datos causa diferentes tipos de problemas. Entre ellos, por mencionar algunos: la recopilación de datos de la empresa deriva en grandes volúmenes al estar conformada por diversas áreas. También algunas empresas se dedican a recopilar información sin hacer algún tipo de análisis. Con lo anterior, es probable que los datos no se encuentren correctamente estructurados y por consecuencia se genera información deficiente o errónea; lo cual conduce a la toma de malas decisiones (Connolly, Begg and Begg, 2005). El proceso para integrar datos resulta complejo cuando se capturan los datos ya que se tiende a utilizar diversas herramientas y recursos para capturarlos: documentos de texto, documentos separados por comas (o algún otro tipo de carácter), hojas de cálculo, formularios en linea, entre otros. Todos son diferentes en su estructura interna y en su forma de preservar datos (Lubas, Jackson and Schneider, 2013). Para que estos interoperen de forma efectiva deben ser capaces de compartir datos fácilmente. Para compartir datos se requiere una estructura común sobre estos (organización y tipo). Generalmente los datos se definen por metadatos, tener una definición común de metadatos es necesario para lograr la integración de datos. El metamodelo de almacén común (CWM por sus siglas en inglés) es un estándar de interoperabilidad que define un lenguaje común y diversos mecanismos para intercambio de metadatos (Poole *et al.*, 2002). Proporciona un metamodelo común para describir el almacenamiento de datos. Adicionalmente la toma de decisiones se realiza por uno o más usuarios y manejan diferentes contextos, preferencias y objetivos, es decir, tienen diferentes puntos de vista. A pesar de que el estándar CWM trata de ser general no cubre por completo este u otros tipos de conceptos.

El principal objetivo de este trabajo es crear una forma de preservar los puntos de vista de cada usuario y permitir el intercambio de datos. Debido a esto, en este artículo se propone una extensión CWM para representar las preferencias de los usuarios en un almacén de datos.

## 2. TRABAJOS RELACIONADOS

La tabla 1 muestra los trabajos referentes al modelado de preferencias de usuario (puntos de vista) mediante un metamodelo. La columna “Punto de vista de usuario” valida si el aporte del trabajo hace referencia al modelo como el punto de vista de un usuario. La mayoría de estos se enfocan en diferente dominio, pero ninguno precisa la implementación de su modelo. La principal diferencia entre los trabajos relacionados y este trabajo es que el modelo desarrollado (como extensión del estándar CWM) se implementa para lograr un intercambio de metadatos entre los procesos que integran al almacén.

 ISSN en trámite

**Tabla 1 Comparativa de trabajos relacionados**

| Trabajo | Dominio | Marco de trabajo y/o herramientas utilizadas | Aporte | Punto de vista de usuario | Metamodelo |
|---|---|---|---|---|---|
| (Demraoui *et al.*, 2016) | Toma de decisiones | Eclipse Modeling Framework | Modelo punto de vista | ✓ | CWM |
| (Soler *et al.*, 2008) | Seguridad | No se menciona | Modelo de seguridad y auditoría | × | CWM |
| (Medina and Trujillo, 2002) | Toma de decisiones | No se menciona | Modelos multidimensionales | × | CWM |
| (Tounsi *et al.*, 2012) | Cadenas de suministro industriales | No se menciona | Modelo de conocimiento multiagente | ✓ | ArchMDE |
| (Berti and van der Aalst, 2020) | Minería de datos | PM4Py | Modelos multi punto de vista | ✓ | No se menciona |
| (Stock, Wortmann and Mayer, 2010) | Análisis de negocio | No aplica | Marco de trabajo basado en puntos de vista | ✓ | No se menciona |
| (Bennani *et al.*, 2019) | Toma de decisiones | Heterogeneous Matching and Consistency Management Suite | Modelos políticas de codecisión | × | MMCollab |
| (Hicham Behja, 2010) | E-learning | Resource Description Framework | Modelo punto de vista y vista | ✓ | No se menciona |
| (Dias *et al.*, 2008) | Almacén de datos | Zachman Framework | Discusión sobre la arquitectura de almacén de datos mediante puntos de vista | ✓ | No se menciona |
| (Zhao and Huang, 2010) | Almacén de datos | No aplica | Formalización de metadatos y metamodelo CWM | × | CWM |
| (Qin, Huang and Wang, 2018) | Almacén de datos | No se menciona | Modelo de contenido de metadatos | × | CWM |
| (Pei, Xu and Wang, 2010) | Proceso ETL | No se menciona | Modelo ETL | × | CWM |
| (Tahir and Brézillon, 2011) | Proceso ETL | Contextual Graphs | Modelo ETL con puntos de vista | ✓ | No se menciona |
| (Guo Yong *et al.*, 2013) | Almacén de datos | No se menciona | Integración de metadatos mediante servicio web | × | CWM |
| Este trabajo | Tomas de decisiones | Eclipse Modeling Framework y Acceleo | Modelo punto de vista y su implementación | ✓ | CWM |

## 3 ANÁLISIS DE LA ARQUITECTURA DEL ALMACÉN DE DATOS

La extensión al CWM consiste en organizar los metadatos de manera unificada para sistemas de soporte a decisiones de proyectos de software, con los elementos necesarios para representar las preferencias de consulta de los usuarios mediante puntos de vista y almacenando sus metadatos en un repositorio de metadatos basado en CWM. La arquitectura del almacén está constituida por los procesos de extracción y transformación, carga y consulta.

### 3.1 EXTRACCIÓN Y TRANSFORMACIÓN

En la extracción el usuario debe seleccionar la fuente de donde se obtendrán los datos y mediante consultas SQL (previamente programadas) se realiza este proceso. Los datos son obtenidos y se analizan por medio de expresiones regulares (de acuerdo al tipo de dato al que pertenezcan). Mediante este análisis se realiza la transformación, si los datos presentan inconsistencias se les aplican una serie de reglas para eliminarlas, en caso contrario, se almacenan temporalmente en tablas Java. Por último, una vez finalizado el proceso de transformación, se generan ontologías y

 ISSN en trámite

archivos CSV con los datos almacenados temporalmente. En la ilustración 1 se muestra, de forma general, el flujo de los procesos que integran esta fase (flechas contorno azul marino sin color de relleno). Se selecciona una de las fuentes deseadas desde el repositorio FLOSSmole y sus datos son extraídos para ser transformados; posteriormente se crea una ontología y archivos CSV mediante la herramienta Database to Ontology (DB2O). En el análisis de estos procesos se observó que el flujo entre FLOSSmole y DB2O (flecha azul marino con color de relleno) no cuenta con metadatos que relacionen los datos entre sí. De modo que cuando los datos son transformados se pierde la información sobre el origen, reglas aplicadas, fecha en la que se realizó el proceso, tablas y columnas consultadas, tipos de datos, entre otros atributos.

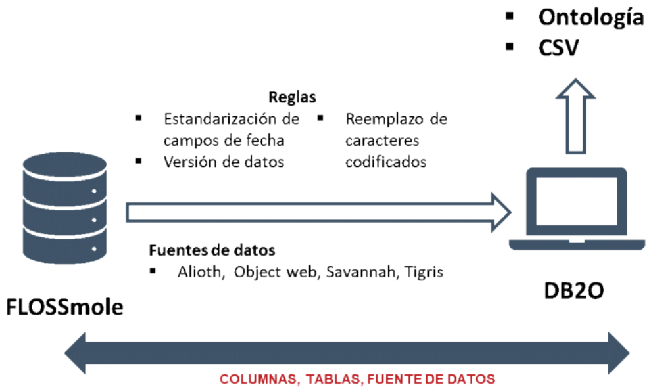



**Ilustración 1 Vista general del proceso de extracción y transformación**

3.2 CARGA Y CONSULTA

Para realizar el proceso de carga y consulta al almacén de datos se utiliza una herramienta llamada ODS. En la carga de datos el usuario selecciona uno o varios archivos CSV generados en la extracción y transformación. Adicionalmente, la herramienta cuenta con un módulo especial para realizar consultas en el almacén de datos. En la ilustración 2 se muestra, de forma general, el flujo de los procesos en esta fase (flechas contorno azul sin color de relleno). Se selecciona uno o varios archivos CSV, se extraen sus datos, se cargan, y se realizan consultas al almacén. En el análisis de estos procesos se observó que el intercambio de datos entre FLOSSmole, la herramienta ODS y almacén de datos (flecha sólida de color azul) no cuentan con metadatos que los relacionen. De modo que, una vez los datos son cargados al almacén, se pierde la información sobre el origen, fecha en la que se realizó el proceso, tablas y columnas consultadas. En consecuencia, generar futuras recomendaciones de consultas a los usuarios se verá afectado al no existir una relación entre la fuente de datos y los datos en el almacén.

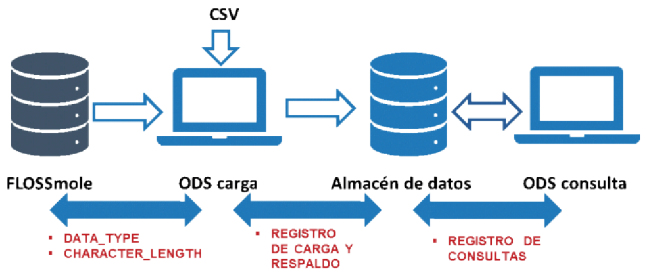



**Ilustración 2 Vista general del proceso de carga y consulta**

4. DETERMINAR UNA FORMA PARA UTILIZAR PUNTOS DE VISTA

El nombre y significado de punto de vista varía de acuerdo al dominio donde se aplique. Vista, descripción, preocupación, requerimiento, opinión, entre otros, son algunos de los nombres con los que se ha trabajado. En 1996, se abrió la premisa de clasificarlo en tres áreas donde ha tenido mayor auge: puntos de vista como opiniones, como requerimientos, y como servicios (Oquendo et al., 2016). En la primera, el autor explica que antes de definir y desarrollar un software en un cierto dominio, existe un paso de negociación; en el cual, participan diferentes interesados que definen premisas, prioridades, y recursos. Cada uno de ellos con diferentes experiencias personales, gustos y creencias, haciendo que el desarrollo del sistema tome diferentes formas y niveles de dificultad. En la segunda, enfatiza el uso de puntos de vista en la ingeniería de requerimientos, como una forma de detectar problemas de inconsistencia. Y la última área, propone la idea de construir un sistema mediante diferentes puntos de vista. Sin embargo, el problema reside en cómo construirlo, ya que se toman en cuenta diversos agentes que tienen diferentes puntos de vista. Por otra parte, en base de datos federadas, el punto de vista se enfoca a la descripción múltiple para representar diferentes abstracciones del mismo universo del dominio. Creando esquemas de base datos que comparten una descripción básica, así, cada parte del esquema describe un aspecto o parte de los datos (Benchikha et al., 2001). En cuanto a arquitectura de software, el estándar ISO/IEC 42010 (2014) define cuatro componentes para la descripción de arquitectura. Entre estos conjuntos se encuentra el punto de vista, el cual sirve como enfoque de visualización para estructurar, interpretar y analizar una o más vistas de arquitectura. A su vez, (Tekinerdogan & Sözer, 2012) representa las preocupaciones de variabilidad para dirigirla dentro de vistas en arquitectura. Para este trabajo de investigación, el término punto de vista se basa en los conceptos de los trabajos (Oquendo et al., 2016) y (Demraoui *et al.*, 2016) para representar las preferencias de usuario sobre ciertos datos presentes en el almacén. Con el objetivo de generar un histórico de preferencias para el usuario.

 ISSN en trámite

## 5. DISEÑAR METAMODELO PUNTO DE VISTA

La ilustración 3 muestra, de forma detallada, el modelo punto de vista. El punto de vista se extendió de los paquetes núcleo e información del negocio mediante la técnica de herencia; las clases con fondo gris son propias de CWM (en inglés); mientras que las clases con fondo blanco son las propuestas en este trabajo (en español). Las clases ModelElement, Namespace, Attribute, Class, Package se ubican en el paquete núcleo de la capa de modelo de objetos; mientras que la clase ResponsibleParty se ubica en el paquete información del negocio en la capa fundación. El modelo definido muestra la clase ResponsibleParty relacionada con la clase Role que representan las categorías de usuarios que utilizan el almacén de datos basado en el estándar CWM. La clase PaquetePuntosDeVista representa una especialización de Package, tiene relación con la clase PuntoDeVista y representa un conjunto de clases de punto de vista. Las clases Contexto, Objetivo, Preferencia (resaltadas con borde azul) se encuentran asociados fuertemente al PuntoDeVista. El cual está asociado a los usuarios del almacén de datos. Un punto de vista se compone de un contexto que representa el entorno en el que se llevó a cabo la consulta, un objetivo que presenta el objetivo de la consulta del usuario y una preferencia sobre los datos más consultados que representa sus preferencias. Esto amplía el estándar CWM con nuevos elementos de modelado basados a una perspectiva de representación del conocimiento.

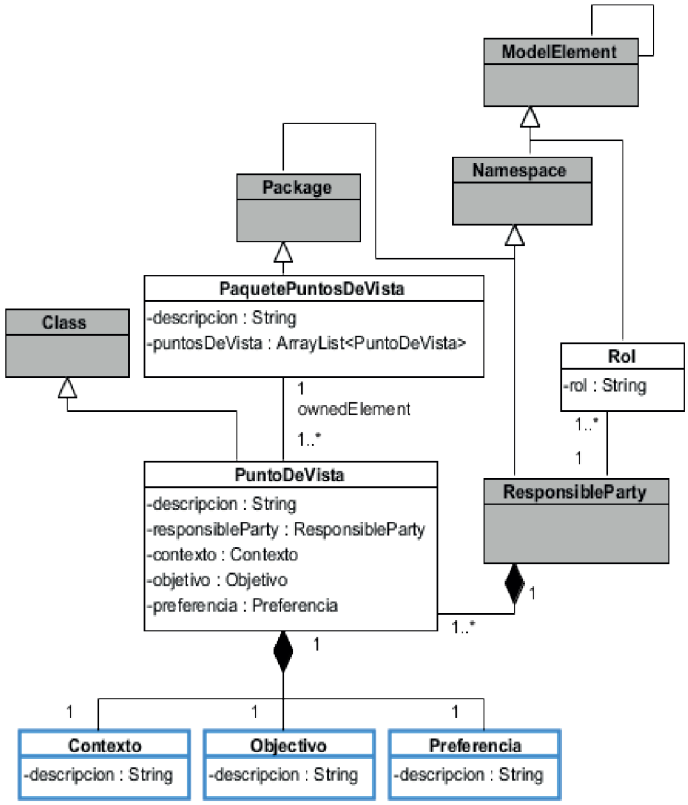



**Ilustración 3 Extensión CWM con punto de vista**

## 6. IMPLEMENTACIÓN DE METAMODELO PUNTO DE VISTA

La implementación del metamodelo consistió en tres etapas: extensión a CWM con el metamodelo punto de vista, generación de código, y creación del repositorio de metadatos. Para la extensión del punto de vista se utilizó el archivo rational rose con extensión .mdl, proporcionado por la OMG en su página web, que contiene CWM en su forma base. Las herramientas utilizadas para implementación fueron: Eclipse Modeling Framework para extender CWM con el modelo punto de vista. Y acceleo (Babczynski, 2021) para generar código Java a partir del archivo .mdl. Con el código generado se creó una herramienta gestora para el repositorio de metadatos (basado en CWM).

### 6.1. EXTENSIÓN A CWM

Para la extensión de CWM se utilizó eclipse modeling framework (EMF). Mediante esta herramienta se tomó como entrada el archivo CWM.mdl. Debido a la incompatibilidad con algunas características de EMF con el modelo de rational rose utilizado en este trabajo se optó por trabajar en la vista basada en árbol. En el editor, se creó el paquete viewpoint en la capa de análisis de CWM. Y se agregaron las clases ViewPointAttribute, Context, Objective, Preference, ViewPoint y ViewPointPackage para el punto de vista. La ilustración 4 muestra (en una vista basada en árbol) un fragmento de la extensión punto de vista a CWM.

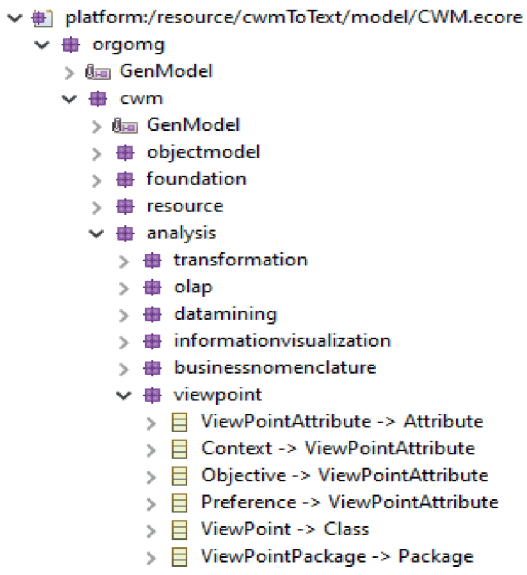



**Ilustración 4 Extensión CWM con punto de vista (fragmento)**

 ISSN en trámite

6.2. GENERACIÓN DE CÓDIGO A PARTIR DEL MODELO CWM

Gracias a que EMF interpreta los modelos como diagramas de clase UML se puede generar código Java, pero existen fuertes dependencias hacia los tipos de datos (manejados por EMF). De modo que para compilar y ejecutar el código generado se necesitan dependencias adicionales. Para generar código y librarse de las dependencias hacia los tipos de datos EMF se utilizó Accelo. Una de las formas de especificar código, y utilizada en este trabajo, son mediante plantillas de código. La ilustración 5 muestra una plantilla acceleo que genera clases en código Java a partir de las clases ubicadas en el archivo rational rose CWM.mdl.

```
[template public generateClass(class : EClass)]
[comment @main/]
[file ('com/'+class.ePackage.nsPrefix.toString().substituteAll('.',
package [class.ePackage.nsPrefix/];

[generateImportSuperType(class)/]
[generateImportJavaList(class)/]
[generateImportReferences(class)/]

public [getAbstractAtttribute(class)/]class [class.name/] [generat
    /** attributes*/
    [generateAttributes(class)/]
    [generateRelationshipAttributes(class)/]
}
[/file]
[/template]
```

**Ilustración 5 Plantilla para generar código desde un modelo mediante acceleo**

6.3. CREACIÓN REPOSITORIO DE METADATOS

El repositorio de metadatos basado en CWM se creó manualmente mediante un script SQL (ilustración 6) en una base de datos relacional.

```
-- eliminaci6n de la bd si existe
drop database if exists cwm_repository;
-- creaci6n de la bd
create database cwm_repository;
-- selecci6n de la bd
create table class_map(
id int primary key,
_name varchar(256)
);
```

**Ilustración 6 Fragmento del script para crear repositorio de metadatos**

7. CONCLUSIONES

Con el propósito de crear e implementar el metamodelo de punto de vista en el almacén de datos se tuvieron que realizar diversos cambios en su arquitectura debido a que no se implementaron metadatos adecuadamente. Esto provocó que el flujo de los datos no tuviera un registro de linaje (historial del origen de los datos, así como las reglas aplicadas en la transformación). De modo que la información (origen, tipo, fecha de limpieza, entre otros) sobre algún dato era desconocida. Las ilustraciones 2 y 3 muestran el intercambio de datos entre los procesos del almacén de datos. En ellas se observan que el flujo de los metadatos es secuencial (flecha sólida de color azul). Entre cada componente se necesita un intercambio de metadatos para mantener el linaje de los datos. Por ejemplo, las herramientas de consulta necesitan saber el origen de los datos para realizar sugerencias sobre datos relacionados que le puedan interesar al usuario. Después de realizar casos de prueba en los procesos (extracción, transformación, carga, consulta) y el repositorio de metadatos del almacén se obtuvo una correcta integración de metadatos. De este modo, la gestión de metadatos es más sencilla y se mantiene el linaje de datos. Así, el estándar de metamodelo de almacén común no solo sirvió para implementar el metamodelo de punto de vista; sino también para solucionar el intercambio de metadatos. En la ilustración 7 se puede observar que el intercambio de metadatos ya no se realiza de forma secuencial (flechas en azul marino con color de relleno), en su lugar se implementa un repositorio basado en CWM que provee metadatos a cada uno de los componentes.

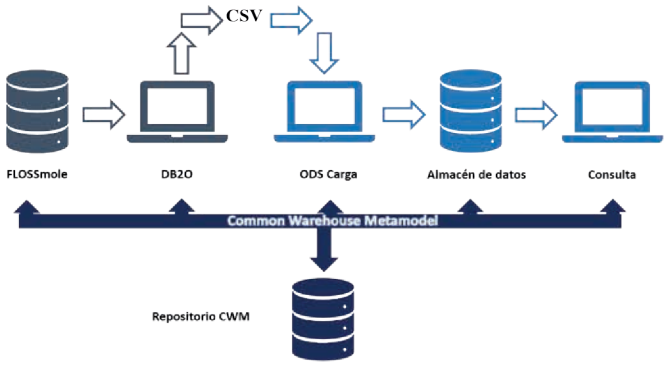



**Ilustración 7 Almacén de datos con CWM**

REFERENCIAS

Connolly, T., Begg, C., & Begg, C. (2005). Database Systems a Practical Approach to Design, Implementation, and Management. www.booksites.net/connbegg,

Babczynski, T. (2021). Acceleo/Getting Started. https://wiki.eclipse.org/Acceleo/Getting_Started

Benchikha, F., Boufaida, M., & Seinturier, L. (2001). Integration of the viewpoint mechanism. In federated databases. Proceedings of the 2001 ACM Symposium on Applied Computing - SAC 01, pp. 280–284.

Bennani, S. et al. (2019). A Collaborative Decision Approach for Alignment of Heterogeneous Models. In Proceedings - 2019 IEEE 28th International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises, WETICE 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 112–117.

Berti, A. and van der Aalst, W. (2020). Extracting multiple viewpoint models from relational databases. In Lecture Notes in Business Information Processing, 379 LNBIP, pp. 24–51.

ISSN en trámite

Demraoui, L. et al. (2016). A viewpoint based extension of the common warehouse metamodel to support the user's viewpoint approach. In International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies, 11(3), p. 137.

Dias, M.M. et al. (2008). Data warehouse architecture through viewpoint of information system architecture. In 2008 International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation, CIMCA 2008, pp. 7–12.

Guo Yong et al. (2013). Research and Application on Metadata Integration for Data Warehouses.

Hicham Behja, E.M.Z. (2010). Viewpoint-based annotations for Knowledge Discovery in Databases. IEEE.

Lubas, R. L., Jackson, A. S., & Schneider, I. (2013). The Metadata Manual. The Metadata Manual. https://doi.org/10.1533/9781780633954

Medina, E. and Trujillo, J. (2002). A standard for representing multidimensional properties: The Common Warehouse Metamodel (CWM). In Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2435(May), pp. 232–247.

Oquendo, F., Leite, J., & Batista, T. (2016). Viewpoints for Describing Software Architectures. pp. 236.

Pei, Y., Xu, J. and Wang, Q. (2010). One CWM-based Data Transformation Method in ETL Process.

Poole, J. et al. (2002). Common Warehouse Metamodel.

Qin, D., Huang, L. and Wang, Y. (2018). Construction of Railway Metadata Management System Based on Metadata Content Model and CWM Exchange Mechanism.

Soler, E. et al. (2008). An extension of the relational metamodel of CWM to represent secure data warehouses at the logical level. In IEEE Latin America Transactions, 6(4), pp. 355–362.

Stock, D., Wortmann, F. and Mayer, J.H. (2010). Use cases for business metadata - A viewpoint-based approach to structuring and prioritizing business needs. In Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 6105 LNCS(May), pp. 546–549.

Tahir, H. and Brézillon, P. (2011). A shared context approach for supporting experts in Data ETL (Extraction, Transformation and Loading) processes.

Tekinerdogan, B., & Sözer, H. (2012). Variability Viewpoint for Introducing Variability in Software Architecture Viewpoints. Proceedings of the WICSA/ECSA 2012 Companion Volume, 163–166.

Tounsi, J. et al. (2012). A multi-agent knowledge model for SMEs mechatronic supply chains. In Journal of Intelligent Manufacturing, 23(6), pp. 2647–2665.

Zhao, X. and Huang, Z. (2010) Inconsistency Checking and Resolving of CWM Metadata Based on Description Logics.

 ISSN en trámite

# Propuesta de un Patrón de Seguridad para Arquitecturas de Microservicios

**Karen M. Hernández- Guzmán *. Juan C. Rojas-Pérez *, René Santaolaya Salgado*. Mario Guillén Rodríguez***

** Departamento de Ciencias Computacionales, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos*
*México (Tel: +52 55266938765; e-mail: m21ce060@cenidet.tecnm.mx, juan.rp@cenidet.tecnm.mx, rene.ss@cenidet.tecnm.mx, mguillen@innel.mx).*

**Resumen:** Actualmente la arquitectura de microservicios está siendo adoptada por empresas de carácter global, su uso y adopción se encuentra en auge, ya que cuenta con innumerables beneficios como escalabilidad y débil acoplamiento, los cuales podrían sugerir el remplazo de algunas arquitecturas monolíticas. La arquitectura de microservicios es un tipo de arquitectura de software relativamente nueva, que al ser adoptada de forma muy radical cuenta con una serie de problemas endebles de seguridad como integridad y confidencialidad, las cuales no han sido atendidas de manera oportuna dejando a los microservicios expuestos a ataques diversos. En este trabajo se presenta una propuesta para abordar un problema de seguridad específico para arquitecturas de microservicios. Se propone la implementación de los mecanismos de seguridad JWT y HASH en el patrón Api Gateway.

*Keywords:* microservicios, seguridad, Api Gateway, patrones de seguridad, patrones de microservicios, AMS, JWT, hash

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el uso de microservicios se encuentra en un punto crucial de adopción ya que cuentan con innumerables ventajas por su modelo arquitectural, este tipo de modelo está siendo adoptado por empresas de carácter global, por su tipo de implementación, qué parte de servicios autónomos, flexibles, poco acoplados y escalables (Pereira-Vale *et al.*, 2019), (Gómez Suárez, Anaya and Cano, 2017). Chris Richardson definió como microservicio a "un repositorio de código pequeño, autónomo y desplegado independientemente de los demás". El cual cuenta con características específicas, como son: Independencia, autonomía, agilidad, versatilidad de tecnologías, aislamiento resiliencia y escalabilidad (Richardson, 2017).

La arquitectura de microservicios es un tipo de arquitectura de software que conlleva una serie de beneficios y una serie de retos de adopción, los cuales se reflejan directamente en la seguridad, tales como la confidencialidad y privacidad de usuarios, ya que al ser adoptadas de forma radical, los retos de seguridad aumentan de forma considerable (Yu *et al.*, 2019a), (Hannousse and Yahiouche, 2021). La seguridad en sistemas de software es una necesidad tan grande e importante como la de la compañía misma, ya que toda la información sensible de una empresa puede ser corrompida (Fernandez-Buglioni, 2013). Los patrones de microservicios son aquellos que cuentan con estándares, probados y validados, para resolver problemas puntuales. Estos pueden ser de estructuración, creación o de comportamiento (Tenev and Tsvetanov, 2020), (Verdier, Diego Rodriguez, 2020), (Hasselbring and Steinacker, 2017). Existen diversos patrones que han sido diseñados y creados para arquitecturas de software específicas (Alexander, Ishikawa and Silverstein, 1977), los cuales es posible que no resulten convenientes para aplicarse a una arquitectura de microservicios.

En este artículo se propone la adaptación de un mecanismo de seguridad para una arquitectura de microservicios, a través del patrón Api Gateway.

Este documento se estructura de la siguiente manera: la sección 2 presenta los trabajos relacionados de las distintas formas de asegurar una arquitectura de software. La sección 3 muestra los elementos preliminares para la creación de un patrón. La sección 4 informa los componentes antecesores para la creación o adaptación de un patrón como son patrón predecesor, patrón sucesor y patrón propuesto. La sección 5 describe el enfoque propuesto y en la sección 6 se presentan las conclusiones.

## 2. TRABAJOS RELACIONADOS

Dentro de los trabajos relacionados se identificaron una serie de problemas de seguridad en las arquitecturas de microservicios y las propuestas de solución. En estos se abordan diversas problemáticas de seguridad, en los que proponen algunas formas de mitigar los problemas de seguridad latentes, las cuales se presentan conforme al tipo de análisis que realiza el autor. También en estos trabajos se muestran una serie de posibles soluciones a problemas de seguridad que se han presentado en otras arquitecturas de software y se han propuesto para aplicarse a la arquitectura de microservicios. En las siguientes secciones se presentan clasificados los trabajos relacionados.

### 2.1 Seguridad aplicable en distintas arquitecturas de software hacia microservicios

 ISSN en trámite

En esta sección se presentan las propuestas de seguridad, las cuales han sido aplicadas a distintas arquitecturas de software y han sido propuestas para microservicios.
En el trabajo de (Barabanov and Makrushin, 2020) proponen patrones descentralizados como Mtls y SDK. Así como en el trabajo (Falou, Ceccanti and Hardt, 2017) presentan estrategias de autenticación, para arquitecturas de microservicio, a través de Servicios SSO y Cross-origin, resource sharin (CORS). En el trabajo (Banati *et al.*, 2018) plantean modelos de seguridad basados en gestión de identificación y un proceso de fondo OAuth2.0 a través de AUTH2 y JSON Web Token. El autor de (Yarygina and Bagge, 2018) sugiere unikernerls y expone los problemas de seguridad por etapas, y soluciones tras la reusabilidad de arquitecturas SOA por medio de Domain Driven Design, OAuth 2.0. En la investigación (Pahl and Donini, 2019) muestran un modelo de arquitectura enfocada a seguridad directamente en microservicios, desde el desarrollo hasta la implementación a través de certificados X.509v3 y executable Hash; mientras que en la investigación de (Laigner *et al.*, 2021) presentan la implementación de patrones de seguridad en un sistema gestor de base de datos orientado a microservicios con DBMS y BACK-END for FRONT- END (BFF). En trabajo de (Esposito *et al.*, 2017) presentan la implementación de una orquestación de APIS por medio de MVC, DDS y OMG. En la investigación de (Lapagna *et al.*, 2018) describen el uso de protocolos de comunicación Segura como TLS, funciones criptográficas y protocolos de contraseña remota segura. En el trabajo de (Torkura *et al.*, 2018) presentan formas distintas de mitigar los problemas de seguridad como sustituir los Api Gateway por contenedores e implementación de WASC. En el trabajo (Martín Gómez and Romero Palencia, 2019) proponen una implementación de distintos parámetros de seguridad aplicables específicamente en las diferentes capas de arquitectura de software con Web-Tier y Business Tier. Por último en (Das, Laigner and Zhou, 2021) proponen una implementación de detección de violaciones de integridad del microservicio, a través de una interfaz en java que permita desedificaciones de aplicación con protocolos.

2.2 Análisis y sugerencias de aplicación en el uso, desarrollo, implementación y migración de microservicios seguros.

En este apartado se presentan artículos relacionados con análisis y sugerencias de aplicación en el uso, desarrollo, implementación y migración de microservicios seguros como el trabajo de (Verdier, Diego Rodriguez, 2020) donde proponen la implementación de patrones en microservicios a través de relaciones predecesoras, sucesoras y alternativas. Así como en (Balalaie *et al.*, 2015) donde se sugiere un marco de reutilización, con las características de un patrón en específico aplicable a microservicios con RESTFull APIs. A su vez en (Mateus-Coelho, Cruz-Cunha and Ferreira, 2021) exponen una implementación de arquitectura SOA, a través de cortafuegos de carácter local y perimetral.

2.3 Propuestas de seguridad, algunas orientadas a patrones de seguridad de microservicios.

En este apartado se muestran propuestas de seguridad, algunas orientadas a patrones de seguridad de microservicios. En el trabajo de (Tenev and Birov, 2018) proponen la implementación de SaaS, PaaS y IaaS. Mientras que en el trabajo de (Nkomo and Coetzee, 2019) siguieren mejorar las prácticas de programación; así como en el trabajo de (Chondamrongkul, Sun and Warren, 2020) donde exponen el uso de herramientas de análisis extensible y enfoques específicos de seguridad con técnicas de comprobación de modelos con herramientas de modelado OWL o ADL. En el trabajo de (Yu *et al.*, 2019b) presentan la implementación de estándares abiertos de acceso controlado como Oauth y Spring Cloud Security framework. En la investigación de (Torkura, Sukmana and Meinel, 2017) donde se presentan el uso de puntos de aplicación de seguridad con Api Gateway, Meath Monitoring Pattern y solicitudes GET. Por último en el trabajo de (Marquez and Astudillo, 2018) proponen la implementación de patrones de seguridad por su modo de aplicación como DevOps patterns y Front-End, Back-End.

## 3. ELEMENTOS PRELIMINARES PARA LA CREACIÓN DE UN PATRÓN

3.1 Patrón: En (Alexander, Ishikawa and Silverstein, 1977) definen que "Cada patrón describe un problema que ocurre una y otra vez en nuestro entorno, y luego describe el núcleo de la solución a ese problema, de tal manera que se puede utilizar esta solución un millón de veces, sin hacerlo nunca de la misma manera dos veces."

3.2 Seguridad: Según la IEEE la seguridad consta de mantener la integridad de la información, tanto como del servicio de software, la protección de los elementos del sistema contra el acceso, el uso, la modificación, la destrucción o la divulgación (IEEE, 2012).

3.3 Adaptación: Es la modificación de un producto con características y condiciones determinadas, en un entorno modificable, las cuales deben mantener el ritmo de cambios en el entorno. Existen dos tipos de procesos de adaptación: clásico, que involucra toma de decisiones y subsecuencia de adaptación y por componentes, que consta de activación, planificación, realización y reconfiguración de la adaptación (IEEE, 2012), (Kouame and McHeick, 2018).

3.4 Consideraciones base para la creación de un patrón. Para la creación del patrón de seguridad propuesto en este trabajo se consideraron elementos preliminares. Alexander propone en (Alexander, Ishikawa and Silverstein, 1977) elementos como son patrón, problema, restricciones y solución, mientras que (Gamma *et al.*, 1994) propone que un patrón consta de cuatro

 ISSN en trámite

elementos específicos como son: nombre del patrón, problema, solución y consecuencias, a continuación se muestran las consideraciones tomadas de creación de patrones, para el patrón propuesto (observe Tabla 1).

**Tabla 1 Consideraciones base para la creación de un patrón**

| Consideraciones base para la creación de un patrón | | | |
|---|---|---|---|
| 1 \| PATRÓN | 2 \| PROBLEMA | 3 \| SOLUCIÓN | 4 \| RESTRICCIONES |
| Microservice pattern security Api Gateway | Seguridad | Adaptacion de un Api Gateway con la Implementación de un JWT y algoritmo de codificación hash | Patrón de seguridad específico, aplicable a microservicios |

3.5 Selección del patrón a adaptar. Tomando en cuenta las consideraciones para la creación de un patrón, se determinó abordar un problema específico de seguridad en microservicios, para el cual se analizó el patrón de microservicios Api Gateway, este es un patrón para arquitecturas de microservicios que actúa como una puerta de enlace y un proxy inverso que enruta y monitorea las solicitudes a los servicios siendo el único punto de entrada para consumir un microservicio (Microsoft, 2022), (IBM, 2022), (Richardson, 2017).

## 4. COMPONENTES PARA LA ADAPTACIÓN DE UN PATRÓN

Como toda evolución tecnológica parte de un elemento específico a mejorar, a continuación, en la Figura 1, se muestra el esquema de adaptación del patrón fachada antecedente del patrón de Api Gateway y la adaptación del patrón de seguridad para microservicios.

**Figura 1 Esquema de adaptación de patrón**

### 4.1 Patrón predecesor.

El patrón fachada es considerado un patrón de diseño estructural, el cual reduce la complejidad de un servicio por medio de la interface de usuario, definiendo una serie de interfaces para objetos ya existentes, que oculta la funcionalidad de un sistema y proporciona una interface amigable, el cual permite que la interface sea independiente para una respuesta oportuna, a continuación se muestra el diagrama de clases del patrón fachada, donde se observa la estructura de este patrón de diseño (observe Figura 2) (Richardson, 2017), (Andreas, 2018), (Java Design Pattern, 2022).

### 4.2 Patrón sucesor

Api Gateway: Este es un enrutador de servicios y clientes que actúa como front end de un API, que tiene similitudes al patrón fachada, ya que monitorea y gestiona las tareas que se realizan, así como el enrutamiento y supervisión de los servicios. A continuación, se muestra el diagrama de clases de un patrón Api Gateway donde se muestra su estructura a nivel de clases, para hacer la comparativa y notar la diferencia entre este y el patrón predecesor (observe Figura 3). (Montesi and Weber, 2016; Richardson, 2017), (Java Design Patterns, 2022).

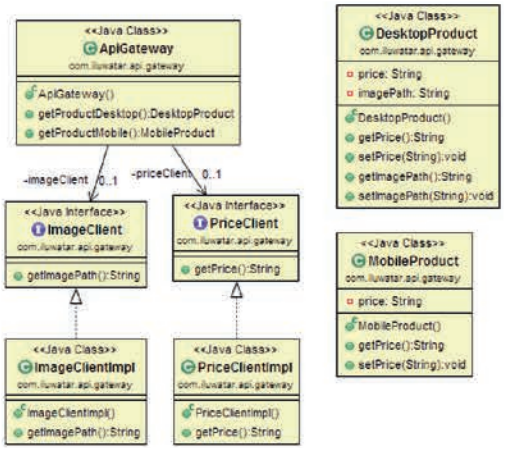



**Figura 3 Diagrama de clases de Api Gateway de un comercio electrónico (Java Design Patterns, 2022).**

### 4.3 Adaptación de patrón de seguridad

Para esta propuesta se analiza el patrón sucesor Api Gateway, en el cual se pretende implementar elementos de seguridad como JSON Web Token (JWT) y algoritmos de codificación

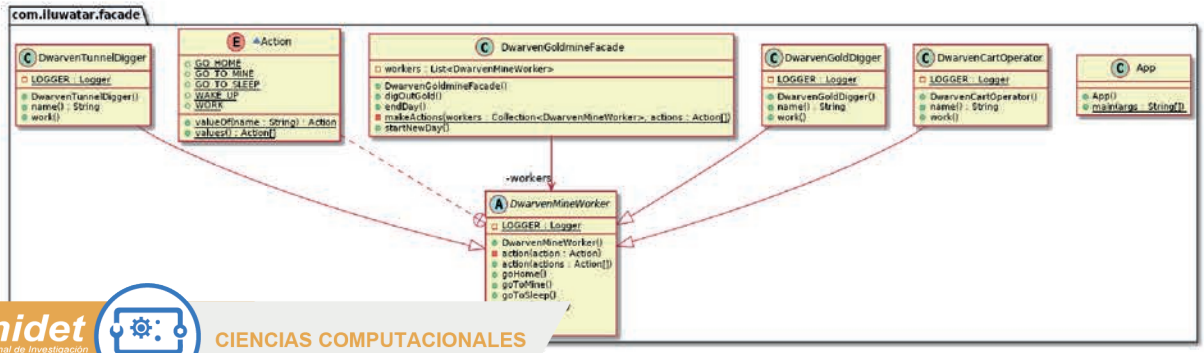



**Figura 2 Diagrama de clases patrón fachada (Java Design Patterns, 2022).**

 ISSN en trámite

hash.

## 5. ENFOQUE PROPUESTO.

Con fundamento a lo anterior se analizan las características que debe contener un patrón como son: distintivo, el cual dará el indicio de que es lo que hace o como se identifica, problemática todas las razones por las que se está implementando el patrón; solución, donde se propone el medio de resolver el problema y los elementos que no se atienden con el patrón (Alexander, Ishikawa and Silverstein, 1977), (Gamma *et al.*, 1994). El patrón de solución propuesto se denomina Microservice pattern security Api Gateway.

### 5.1 Visión general

El siguiente patrón de seguridad está directamente enfocado a la arquitectura de software de microservicios. Este describe una pauta para la protección de la puerta de enlace de las APIs en microservicios frente amenazas externas en el proceso de comunicación de microservicios. Microservice pattern security Api Gateway permite la protección de la puerta de enlace de los microservicios, contra las posibles vulnerabilidades en la comunicación.

### 5.2 Desafíos típicos:

- Dado que los microservicios se caracterizan por su débil acoplamiento aumenta la complejidad de protección.
- Los end-points quedan expuestos por la cantidad de interacciones para los múltiples consumidores del recurso, los cuales se aprovechan por clientes internos o públicos.
- Dado que una arquitectura de microservicios (AMS) proporciona una holgura de desarrollo más rápida y ágil, suelen presentarse una serie de fallas lógicas difíciles de controlar por sus sistemas distribuidos.

### 5.3 Solución propuesta

Implementación de JWT con algoritmo de codificación Hash a un Api Gateway. JWT es un medio de intercambio de datos que utiliza un JSON, lo cual permite proteger de forma digital la connexion. A continuación se muestra la estructura de un JWT (observe Figura 4), (Jones, Campbell and Mortimore, 2015).

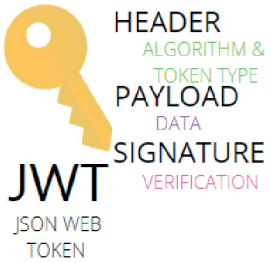



**Figura 4 Estructura de un JWT**

Algoritmo Hash: Es un algoritmo de reducción criptográfico, que se implementa para el uso de contraseñas y sistemas de verificación de datos, este es un algoritmo que transforma una serie de elementos de longitud fija, en una función de otro elemento, la cual recibe elementos de entrada que se convierten en un rango de salida finito como: Secure Socket Layer (SSL). SHA-0, SHA-1, SHA-2 y SHA-3 (observe Figura 5) (3rd and Jones, 2001).

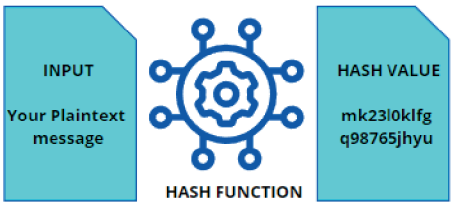



**Figura 5 Función Hash**

Estas medidas de seguridad serán adaptadas al patrón de microservicios Api Gateway, para que crear un patrón de seguridad, diseñado específicamente para una arquitectura de microservicios y proporcionar una medida de seguridad, como se muestra gráficamente a continuación (observe Figura 6).

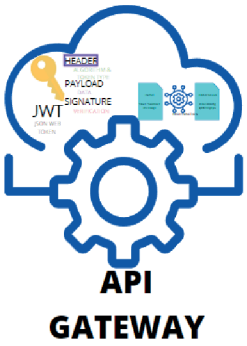



**Figura 6 Implementación de Api Gateway con JWT y Algoritmo Hash**

Tomando como referencia la Figura 3, se procede a realizar la adaptación dentro de java class Api Gateway, donde se incrementan las soluciones de seguridad propuestas, creando

 ISSN en trámite

una clase que contenga el JWT y el algoritmo de codificación hash.

Esto se aplicará en la única puerta de entrada, denominada front-end, en donde se aplican las políticas de seguridad cuando se implemente el JWT y el algoritmo hash, que pasaran al back-end del sistema y regresaran las respuestas del cliente, a través de un login; lo cual proporcionará la funcionalidad de autenticación y autorización segura.

Mediante esta propuesta en el diagrama de clases Api Gateway de un comercio electrónico se realizan dos llamados a los microservicios como son ImageCliente y PriceClientImple donde un cliente visualiza datos del producto, estos datos son el precio y la imagen de referencia.

En el caso de que el cliente desee agregar una compra e ingrese sus datos, el sistema lo rectificará y continuará con su compra.

Esta autenticación devuelve los detalles del cliente con detención del lado del servidor, en donde se efectúa la generación del token con public funtion invoke(): response { $token = $this->jwtEncoder->encode y el hash SHA256 creando la clase hash con un String password = "SHA-256";

De tal forma se propone la adaptación del patrón Api Gateway con medidas de seguridad.

## 6. CONCLUSIONES

A lo largo de esta investigación se hallaron distintas propuestas de seguridad, que son aplicadas a arquitecturas de software diversas. Con ello se notó que no existen patrones de seguridad diseñados específicamente para una arquitectura de microservicios. Se realizó un análisis de propuestas de seguridad aplicables a diversas arquitecturas de software, donde se presentan diversos mecanismos para mantener una arquitectura de software segura. Además, se analizaron los mecanismos más utilizados para favorecer la seguridad.

Se analizaron diversos trabajos que abordan el problema de seguridad en microservicios, sin embargo, todos estos trabajos son propuestas de solución en seguridad basadas en arquitecturas no orientadas a servicios, además estas propuestas no han sido probadas, por lo que no se han reportado resultados que pudieran dar un indicio de solución a problemas de seguridad en microservicios. La propuesta de solución de este trabajo se fundamenta en el análisis de diversos mecanismos de seguridad y en el análisis del patrón para microservicios Api Gateway. Actualmente esta propuesta se encuentra en la etapa de desarrollo por lo que resta en trabajos futuros implementar el patrón y probarlo en distintos repositorios de microservicios.

Dado que esta arquitectura de microservicios ya está siendo empleada por diversas organizaciones, esta propuesta abre una pauta para mantener este tipo de arquitecturas seguras, además de dar un punto de partida para la creación de patrones de seguridad para arquitecturas de software especificas a microservicios.

## 7. REFERENCIAS

3rd, D.E. and Jones, P. (2001) 'US Secure Hash Algorithm 1 (SHA1)'. Available at: https://doi.org/10.17487/RFC3174.

Alexander, C., Ishikawa, S. and Silverstein, M. (1977) 'PATTERNS LANGUAGES', p. 1171. Available at: https://doi.org/10.1186/s40410-017-0073-1.

Andreas, P. (2018) *Design Patterns — A quick guide to Facade pattern. | by Andreas Poyias | Medium*. Available at: https://medium.com/@andreaspoyias/design-patterns-a-quick-guide-to-facade-pattern-16e3d2f1bfb6 (Accessed: 14 September 2022).

Balalaie, A. *et al.* (2015) 'Microservices Migration Patterns', *Software: Practice and Experience*, 48(11). Available at: https://doi.org/10.1002/spe.2608.

Banati, A. *et al.* (2018) 'Authentication and authorization orchestrator for microservice-based software architectures', *2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2018 - Proceedings*, pp. 1180–1184. Available at: https://doi.org/10.23919/MIPRO.2018.8400214.

Barabanov, A. and Makrushin, D. (2020) 'Authentication and Authorization in Microservice-Based Systems: Survey of Architecture Patterns', *Voprosy kiberbezopasnosti*, (4(38)), pp. 32–43. Available at: https://doi.org/10.21681/2311-3456-2020-04-32-43.

Chondamrongkul, N., Sun, J. and Warren, I. (2020) 'Automated Security Analysis for Microservice Architecture', *Proceedings - 2020 IEEE International Conference on Software Architecture Companion, ICSA-C 2020*, pp. 79–82. Available at: https://doi.org/10.1109/ICSA-C50368.2020.00024.

Das, P., Laigner, R. and Zhou, Y. (2021) *HawkEDA: A tool for quantifying data integrity violations in event-driven microservices*, *DEBS 2021 - Proceedings of the 15th ACM International Conference on Distributed and Event-Based Systems*. Association for Computing Machinery. Available at: https://doi.org/10.1145/3465480.3467838.

Esposito, C. *et al.* (2017) 'Security and Privacy for Cloud-Based Data Management in the Health Network Service Chain: A Microservice Approach', *IEEE Communications Magazine*, 55(9), pp. 102–108. Available at: https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700089.

Falou, A. Al, Ceccanti, A. and Hardt, M. (2017)

'Authentication and Authorization of End User in Microservice Architecture'. Available at: https://doi.org/10.1088/1742-6596/910/1/012060.

Fernandez-Buglioni, E. (2013) *Security Patterns in Practice*. reimpresa, *book*. reimpresa. Edited by John Wiley & Sons.

Gamma, E. *et al.* (1994) *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software (Addison Wesley professional computing series)*, *Applied Object-Oriented Patterns*. Edited by Pearson Education.

Gómez Suárez, K.T., Anaya, R. and Cano, A.F. (2017) 'Un acercamiento a los microservicios', *Unaciencia*, 10(19), p. 11. Available at: https://revistas.unac.edu.co/ojs/index.php/unaciencia/article/view/235/214.

Hannousse, A. and Yahiouche, S. (2021) 'Securing microservices and microservice architectures: A systematic mapping study', *Computer Science Review*. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100415.

Hasselbring, W. and Steinacker, G. (2017) 'Microservice architectures for scalability, agility and reliability in e-commerce', *Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Software Architecture Workshops, ICSAW 2017: Side Track Proceedings*, pp. 243–246. Available at: https://doi.org/10.1109/ICSAW.2017.11.

IBM (2022) *API Gateway*. Available at: https://www.ibm.com/docs/en/b2b-integrator/6.1.1?topic=help-api-gateway&mhsrc=ibmsearch_a&mhq=api gateway (Accessed: 16 October 2022).

IEEE (2012) 'International Standard International Standard - ISO 527-1', *IEEE Software*, 2012. Available at: https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9238526.

Java Design Pattern (2022) *Facade*. Available at: https://java-design-patterns.com/patterns/facade/ (Accessed: 15 October 2022).

Java Design Patterns (2022) *API Gateway*. Available at: https://java-design-patterns.com/patterns/api-gateway/ (Accessed: 15 October 2022).

Jones, M., Campbell, B. and Mortimore, C. (2015) 'JSON Web Token (JWT) Profile for OAuth 2.0 Client Authentication and Authorization Grants'. Available at: https://doi.org/10.17487/RFC7523.

Kouame, K.M. and McHeick, H. (2018) 'Overview of Software Adaptation Techniques; Guide Adaptation Pattern', *2018 International Conference on Computer and Applications, ICCA 2018*, (June), pp. 141–148. Available at: https://doi.org/10.1109/COMAPP.2018.8460397.

Laigner, R. *et al.* (2021) 'Data management in microservices: State of the practice, challenges, and research directions', *Proceedings of the VLDB Endowment*, 14(13), p. 3348. Available at: https://doi.org/10.14778/3484224.3484232.

Lapagna, K. *et al.* (2018) 'Dokspot: securely linking healthcare products with online instructions', *Digitalcollection.Zhaw.Ch*, (c), pp. 55–64. Available at: https://doi.org/10.21256/zhaw-5000.

Marquez, G. and Astudillo, H. (2018) 'Actual Use of Architectural Patterns in Microservices-Based Open Source Projects', *Proceedings - Asia-Pacific Software Engineering Conference, APSEC*, 2018-Decem(December), pp. 31–40. Available at: https://doi.org/10.1109/APSEC.2018.00017.

Martín Gómez, S. and Romero Palencia, E. (2019) *Patrones de Seguridad Software en el Contexto de la Arquitectura Multicapa para la Plataforma J2EE*. Universidad Complutense de Madrid.

Mateus-Coelho, N., Cruz-Cunha, M. and Ferreira, L.G. (2021) 'Security in microservices architectures', *Procedia Computer Science*, 181(2019), pp. 1225–1236. Available at: https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.320.

Microsoft (2022) *API gateways - Azure Architecture Center | Microsoft Learn*. Available at: https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture/microservices/design/gateway (Accessed: 16 October 2022).

Montesi, F. and Weber, J. (2016) 'Circuit Breakers, Discovery, and API Gateways in Microservices'. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.05830.

Nkomo, P. and Coetzee, M. (2019) *Software Development Activities for Secure Microservices*, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Springer International Publishing. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-24308-1_46.

Pahl, M.O. and Donini, L. (2019) 'Giving IoT services an identity and changeable attributes', *2019 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management, IM 2019*, (section II), pp. 455–461.

Pereira-Vale, A. *et al.* (2019) 'Security mechanisms used in microservices-based systems: A systematic mapping', *Proceedings - 2019 45th Latin American Computing Conference, CLEI 2019* [Preprint], (June). Available at: https://doi.org/10.1109/CLEI47609.2019.235060.

Richardson, C. (2017) *Microservices patterns : with examples*

 ISSN en trámite

*in Java*. Edited by MANNING. NEW YORK. Available at: https://learning.oreilly.com/library/view/microservices-patterns/9781617294549/.

Tenev, T. and Birov, D. (2018) 'SECURITY PATTERNS FOR MICROSERVICES LOCATED ON DIFFERENT VENDORS', *Journal of the Technical University - Sofia Plovdiv branch, Bulgaria "Fundamental Sciences and Applications"*, 24, p. 4. Available at: https://scholar.google.com/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=SECURITY+PATTERNS+FOR+MICROSERVICES+LOCATED+ON+DIFFERENT+VENDORS&btnG=.

Tenev, T. and Tsvetanov, S. (2020) 'Recommendations for Enhancing Security in Microservice Environment Altered in an Intelligent Way'. Available at: https://doi.org/10.23919/SoftCOM50211.2020.9238277.

Torkura, K.A. *et al.* (2018) *CAVAS: Neutralizing application and container security vulnerabilities in the cloud native era*, *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*. Springer International Publishing. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01701-9_26.

Torkura, K.A., Sukmana, M.I.H. and Meinel, C. (2017) 'Integrating continuous security assessments in microservices and cloud native applications', *UCC 2017 - Proceedings of the10th International Conference on Utility and Cloud Computing*, pp. 171–180. Available at: https://doi.org/10.1145/3147213.3147229.

Verdier, Diego Rodriguez, G. (2020) *Implementación de Patrones de Microservicios*. Universidad de la República Montevideo, uruguay. Available at: https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/25418.

Yarygina, T. and Bagge, A.H. (2018) 'Overcoming Security Challenges in Microservice Architectures', *Proceedings - 12th IEEE International Symposium on Service-Oriented System Engineering, SOSE 2018 and 9th International Workshop on Joint Cloud Computing, JCC 2018*, pp. 11–20. Available at: https://doi.org/10.1109/SOSE.2018.00011.

Yu, D. *et al.* (2019a) 'A survey on security issues in services communication of Microservices-enabled fog applications', *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 31(22), pp. 1–19. Available at: https://doi.org/10.1002/cpe.4436.

Yu, D. *et al.* (2019b) 'A survey on security issues in services communication of Microservices-enabled fog applications', *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. Available at: https://doi.org/10.1002/cpe.4436.

 ISSN en trámite

# Refactorización de Módulos Colaborativos con Carencia de Abstracción.

**Fernando Sánchez Rogel*. René Santaolaya Salgado. ***
**Blanca Dina Valenzuela Robles. * Humberto Hernández García***

**Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México. (e-mail: {m20ce088, rene.ss, blanca.vr, Humberto.hg} @cenidet.tecnm.mx)*

**Resumen:** En el desarrollo de software se producen sistemas de software o unidades de programa que en algunas ocasiones quedan a deber en calidad, para efectos de mantenimiento y reuso. A esto se le denomina "Deuda Técnica". Una dimensión de deuda técnica radica en arquitecturas de software carentes de abstracción, impidiendo el polimorfismo, haciendo que estas arquitecturas sean rígidas a cambios de comportamiento y dificulte su extensión a nuevas funcionalidades. En este artículo se presenta un método de refactorización de software legado en lenguaje Java, el cual aplica los principios de abierto – cerrado e inversión de dependencias para conseguir mejores condiciones de flexibilidad y extensibilidad dentro de las arquitecturas de Software. Dicho método ha sido probado sobre tres arquitecturas de software obtenidas de repositorios como GitHub. El resultado de aplicar el método muestra la mejora en el nivel de abstracción y de polimorfismo en dichas arquitecturas.

*Keywords: Deuda Técnica, Clases Abstractas, Interfaces, Refactorización.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de software bajo el paradigma orientado a objetos demanda una gran capacidad de imaginación, abstracción y creatividad, con la finalidad de analizar y plantear soluciones correctas a problemas informáticos que se tengan en el desarrollo de software. En algunas ocasiones, estas capacidades para el ser humano son difíciles de desarrollar.

Cuando un desarrollador carece de experiencia y habilidad en el diseño y construcción de software, suelen producirse sistemas o unidades de programa que técnicamente generan deuda técnica (DT). Adicionalmente, debido a que en la gestión de proyectos de software se emplean marcos de desarrollo ágil y en su afán de entregar software funcionando en el menor tiempo posible, renuncian a actividades relacionadas con el diseño y producción de código de calidad, como son: la aplicación de criterios y principios de diseño, el uso de buenas prácticas de codificación, definiciones de diseño y arquitecturas completas, cobertura de pruebas y documentación, entre otros. Esto a largo plazo causa la acumulación de DT que se vuelve perjudicial para el éxito y la calidad de los proyectos.

La DT acumulada por carencia de habilidades, experiencias, presiones de tiempo y costo en el desarrollo de sistemas de software y unidades de programa, conduce a la práctica y decisiones incorrectas de diseño, que, finalmente, derivan en la producción de código desagradable, el cual tiene efectos colaterales como fragilidad, rigidez, e inmovilidad del software, que impiden su reuso y dificultan su mantenimiento. Asimismo, se encarece la producción de software y el control de su evolución en el tiempo.

En este artículo se plantea "la carencia de abstracción" como una causa que produce código desagradable en arquitecturas de clases de objetos. Este código desagradable se genera cuando las clases cliente solicitan servicios a clases servidoras concretas o específicas. En arquitecturas con esta carencia no hay relaciones de herencia de la clase concreta hacia una clase abstracta o interfaz, por lo tanto, no puede haber asociación dinámica de tipos ni polimorfismo. Las arquitecturas que carecen de la propiedad de abstracción son "rígidas", esto es que no pueden cambiar dinámicamente su comportamiento; no son "extensibles" a nuevos comportamientos por funcionalidades requeridas porque no obedecen a los principios de "abierto-cerrado" e "inversión de dependencias". Un efecto colateral se presenta cuando hay necesidad de cambios en los requerimientos iniciales, ya sea porque estos cambian o porque surgen nuevos requerimientos. En sistemas rígidos, la única manera de hacer cambios es romper con el principio de "abierto-cerrado" al modificar el código para adaptarlo a los cambios, el efecto es que se produce fragilidad en el software.

Un trabajo de investigación que antecede al referido en este artículo fue el proyecto de tesis de maestría de Ricardo Federico Tello Díaz con título "*Método de refactorización de arquitecturas de software con carencia de abstracciones*". En este trabajo se planteó un modelo de objetos basado en estructuras dinámicas para capturar información del código del proyecto de software sujeto de refactorizar, información utilizada para fines de cálculo de métricas de calidad, para la refactorización del código original para satisfacer la carencia de abstracción. Este trabajo planteó 13 escenarios, sin embargo, no

 ISSN en trámite

contempla los escenarios de introducir abstracción a arquitecturas de software por medio de interfaces.

Con el fin de mejorar el nivel de abstracción y polimorfismo dentro de los módulos de programa que colaboran en una arquitectura de software, en el desarrollo tecnológico que se presenta en este artículo, se extiende el modelo de objetos y se resuelve el escenario de generación de Interfaces dentro de arquitecturas de software que no fue trabajado en el trabajo de Ricardo F Tello D. Específicamente, en este proyecto de investigación se transforman las abstracciones en interfaces mediante un proceso de refactorización.

El objetivo general del desarrollo que se presenta en este artículo es mejorar el diseño de arquitecturas de componentes de software existentes en lenguaje Java, disminuyendo la deuda técnica en sus dimensiones de flexibilidad y extensibilidad, mejorando su modularidad en las dimensiones de asociación dinámica de tipos y polimorfismo, a través de una extensión al método de refactorización por carencia de abstracción del trabajo de antecedente mencionado.

Para el desarrollo del método, en primer lugar, se efectúa la captura de información del código fuente original bajo estudio, mediante un análisis estático en las arquitecturas de software seleccionadas. Se continua con la medición de los factores de abstracción (FA) y polimorfismo (FP) para decidir si es necesaria la intervención de refactorización. Un valor con tendencia a cero en estas métricas implica la necesidad o la sugerencia de que sea necesaria la refactorización. Un valor con tendencia a 1 implica que no es necesaria la refactorización. Se continua con el proceso de refactorización si así fuera decidido, transformando las clases abstractas con todos sus métodos abstractos en interfaces, abarcando los escenarios o puntos de vista observados. Una vez efectuada la refactorización se vuelven a medir los factores de abstracción y de polimorfismo, para efectos de comprobar una mejora en estas dimensiones. Por último, se genera el código refactorizado comprobándose que la funcionalidad sea equivalente el código original. De esta forma se complementa el diseño e implementación del método de refactorización de arquitecturas de software original con esta nueva capacidad, corrigiendo correcta y lógicamente la abstracción funcional con interfaces lógicas entre las unidades o módulos de software en arquitecturas de clases.

## 2. MATERIALES y MÉTODO DE SOLUCIÓN.

Anteriormente se mencionó, que cuando unidades de software o sistemas no son conformes a los principios de “abierto-cerrado” y de “inversión de dependencias”, exhiben problemas de rigidez, fragilidad, inmovilidad y no extensibilidad. Por lo que, la solución presentada en este trabajo es la construcción de un sistema de refactorización de alta escala, que permite detectar, automatizar y corregir, de una manera eficiente, el código desagradable que se encuentra presente en sistemas de software legados.

### *2.1 Análisis de Escenarios o puntos de vista.*

Los escenarios son circunstancias o eventos que pueden ocurrir en la vida real. En estos se especifica como el sistema debe ser usado, y resultan ser contenedores de la mayoría de los requisitos del sistema de software. Muchas de las buenas prácticas o prácticas recomendadas en el proceso de desarrollo de software, se basan en la existencia de un documento de requisitos a partir de escenarios ya construidos.

En este proyecto de investigación, se analizaron cinco escenarios posibles que pueden aparecer en las arquitecturas de software orientadas a objetos. En las figuras 1 y 2 se presentan los escenarios más representativos.

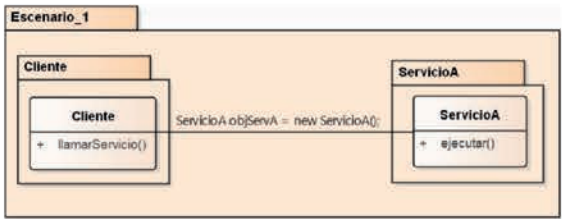



Figura 1 Arquitectura rígida a cambios de comportamientos.

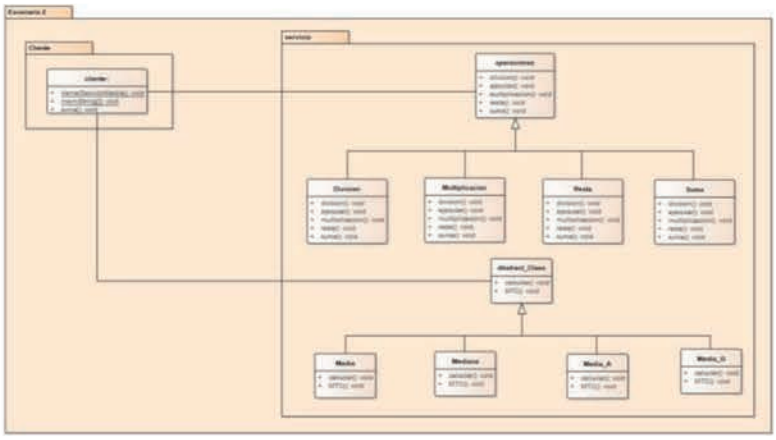


Figura 2 Arquitectura de clases con dos clases abstractas definidas correctamente con métodos públicos.

En la Figura 1 se muestra una arquitectura que es rígida a cambios de comportamiento, lo cual hace que esté atada a comportamientos específicos, causando que no se pueda extender a nuevas funcionalidades o comportamientos y violentan los principios de “abierto–cerrado” e “inversión de dependencias”.

Asimismo, el escenario de la Figura 2 consiste en que, si existen clases abstractas definidas correctamente con métodos públicos abstractos, la solución práctica para ello es transformarlas en Interfaces.

 ISSN en trámite

*2.2 Arquitectura de Clases del Modelo de Objetos.*

El modelo de objetos de este trabajo de investigación representa a un sistema de software desde una perspectiva especifica, nos permite fijarnos en un aspecto distinto del sistema. En éste se tienen que incluir los elementos que tengan más relevancia y omitir los que no son interesantes para el nivel de abstracción que se ha elegido.

En el modelo inicial del trabajo que antecede a este proyecto con título: "*Método de refactorización de arquitecturas de software con carencia de abstracciones*", se genera una lista de clasificadores. En esta lista originalmente no se tomaron en cuenta las clases abstractas e interfaces que pudiera contener un proyecto. Es por ello que se extendió dicho modelo de objetos agregando cada uno de estos tipos de clasificadores presentados anteriormente. En la Fig. 3 se muestra el Modelo de Objetos extendido.

En este modelo de objetos se identifican los archivos sobre los cuales se hace el análisis y se seleccionan aquellas clases abstractas o clases concretas que deban ser refactorizadas a interfaces, estos archivos tienen clasificadores los cuales permiten hacer este análisis y elegir aquellas clases a refactorizar tomando en cuenta también la secuencia de métodos para saber si la clase puede ser refactorizada.

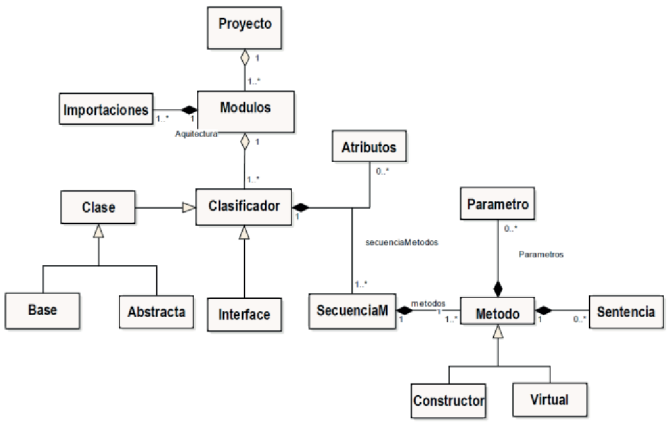



Figura 3 Modelo de objetos de la arquitectura de un proyecto de software.

*2.3 Proceso de Refactorización*

BPMN (Business Process Modeling Notation), es un lenguaje de modelado ampliamente utilizado para crear flujos de trabajo de procesos. "En BPMN los procesos de negocio involucran la captura de una secuencia ordenada de actividades e información de apoyo." (HITPASS, 2012).

El propósito de utilizar la notación BPMN en este trabajo es de identificar específicamente la secuencia de actividades del proceso de refactorización.

La Figura 4 muestra el proceso del método de refactorización para la detección, automatización y corrección de software.

El proceso de refactorización consiste en los siguientes subsistemas:

- Cliente: usuario, encargado de seleccionar el proyecto o sistema de software, escrito en lenguaje Java para llevar a cabo el análisis.
- Analizador sintáctico: derivado de ANTLR (Terence Parr, 2012), analiza el código fuente a través de tokens para capturar la información relacionada a las clases abstractas candidatas a refactorizar.
- Cálculo de Métricas: Encargado de la ejecución de la métrica de Factor Abstracción y Factor de Polimorfismo.
  - Factor Abstracción[1]: métrica desarrollada en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) para medir la abstracción en los paquetes de cada sistema mediante la formula:

$$AF = \frac{TCA}{TC}$$

  - Factor Polimorfismo[2]: es una métrica que se define como "la proporción entre el número real de posibles situaciones polimórficas diferentes para una clase, entre el máximo número posible de situaciones polimórficas." (Abreu y Melo, 1996).

$$PF = \frac{\sum_{TC}^{i=1} M_o\,(C_i)}{\sum_{TC}^{i=1}[M_n(C_i) \times DC(C_i)]}$$

- Refactorización: recibe como entrada una lista de clases abstractas a refactorizar, con la finalidad de transformar la abstracción a través del uso de interfaces.

Generación de código: última fase del proceso de refactorización toma como entrada las clases abstractas ya refactorizadas y produce como resultado un código equivalente del proyecto inicial.

[1] Abstracción, es una propiedad del paradigma orientado a objetos para generalizar el comportamiento funcional de una entidad de software.
[2] Polimorfismo es la propiedad del paradigma orientado a objetos de especificar un comportamiento abstracto. Esta propiedad es habilitada por la abstracción.

ISSN en trámite

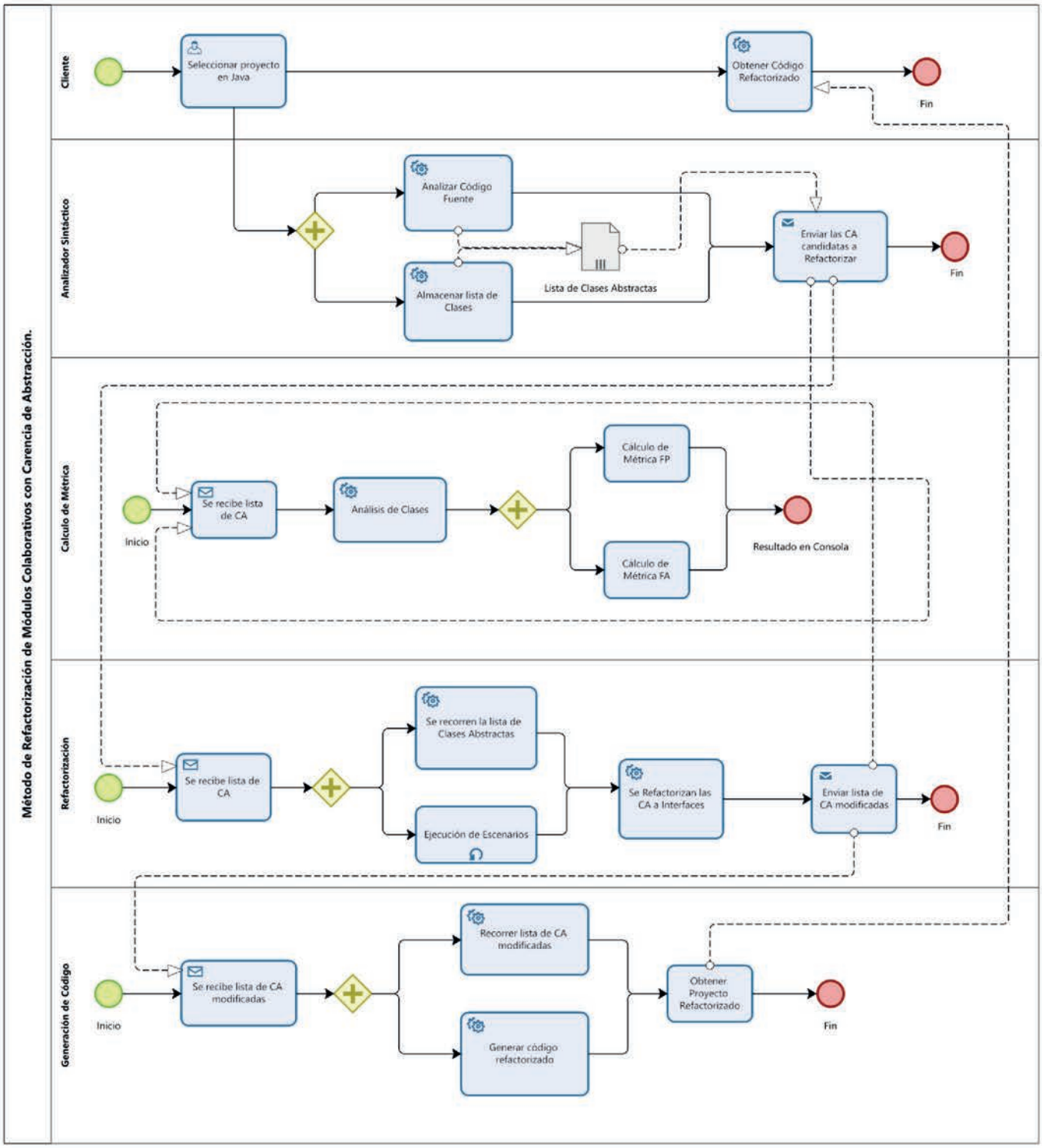



Figura 4 Modelo BPMN

 ISSN en trámite

*2.4 Análisis Sintáctico*

El análisis sintáctico, tiene la finalidad de reconocer las sentencias de un lenguaje. Para esta fase utilizamos la herramienta ANTLR (Terence Parr, 2012). Este es el software que realiza la lectura de archivos con la finalidad de realizar un proceso de extracción de información del programa o sistema en estudio para cumplir con un objetivo específico.

En la Figura 5, se muestra una parte de la estructura contenedora de los módulos que se obtiene durante el proceso de análisis sintáctico:

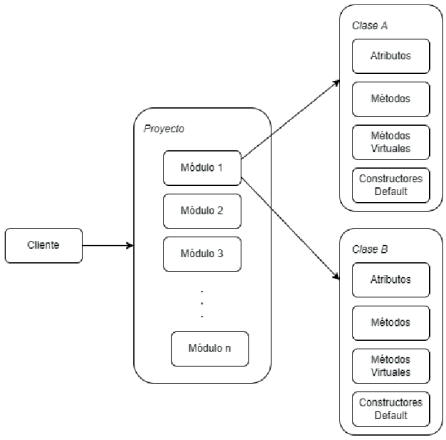



Figura 5 Estructura contenedora parcial que contiene la información extraída del código fuente original.

El objetivo es extraer la información necesaria de los módulos de software para realizar la refactorización de Clases Abstractas a Interfaces y para obtener los datos necesarios para el cálculo de las métricas AF y PF.

La información que se recaba durante este proceso y que sustenta la realización del proceso de refactorización se muestra a continuación:

**Cliente:** Actor humano encargado de seleccionar el proyecto a refactorizar.

**Proyecto:** Código fuente del proyecto de software existente que se requiere analizar, el cual debe contener los módulos que serán evaluados para obtener las clases abstractas a refactorizar.

**Clases:** Dentro de estas se recaba la información necesaria para aplicar la refactorización. Esta información incluye métodos públicos abstractos, métodos virtuales y constructores por default que puedan estar contenidos en una clase.

*2.5 Refactorización.*

La intención de refactorizar el código no solamente es mejorar las cosas desde un punto de vista estético o perfeccionista, más bien, es una estrategia que está bien definida y se encuentra compuesta por un conjunto de técnicas simples que se enfocan en qué buscar exactamente en el código, y a través de esta búsqueda, hallar exactamente cómo mejorar el código legado.

Martin Fowler en su libro "Refactoring: Improving the Design of Existing Code" (2018) define el término de refactorización como:

*"El proceso de cambiar un sistema de software mejorando su estructura interna, pero sin alterar el comportamiento externo del código."*

Esto quiere decir, que, si un sistema es ejecutado antes y después de aplicar la refactorización, su comportamiento debe ser el mismo, y la salida deberá ser la misma, mostrando el mismo comportamiento que ejecutaba antes de la refactorización.

3. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL MÉTODO.

Se realizaron pruebas sobre dos sistemas de software que se obtuvieron de repositorios en la plataforma GitHub, los cuales son un Sistema de Banco en el cual se pueden dar de alta clientes para llevar el control de sus cuentas, y el otro de ellos es un sistema de punto de Venta en donde se lleva el control de una tienda, así también se realizaron pruebas sobre el sistema PSPCenidet, encargado de medir los tiempos de un usuario que realiza tareas cotidianas y/o tareas específicas al desarrollar un software.

Con la finalidad de visualizar la mejora en los sistemas de software elegidos, como casos de prueba, se realizó un conteo del número de clases de objetos (TC) y de líneas de código del sistema (LOC). En la tabla 1 se observa un incremento de los factores de abstracción y polimorfismo, derivados de la aplicación de la refactorización.

Tabla 1 Comparación de los resultados obtenidos antes y después de refactorizar.

| Proyecto | Proyecto Inicial | | | | Proyecto refactorizado | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | LOC | TC | FA | FP | LOC | TC | FA | FP |
| ISRMCCA05-01 Sistema de Banco | 658 | 15 | 0.13333334 | 0.7 | 686 | 17 | 0.23529412 | 0.7777778 |
| ISRMCCA05-02 Sistema de Punto de Venta | 6240 | 61 | 0.0 | 0.0 | 6554 | 75 | 0.18666667 | 1.0 |
| ISRMCCA05-03 PSP CENIDET | 3597 | 81 | 0.09876543 | 0.8484849 | 3597 | 81 | 0.09876543 | 0.8484849 |

 ISSN en trámite

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de la refactorización; en cuanto a los sistemas 01 y 02 obtenidos de la plataforma GitHub. Se observa un incremento en las líneas de código y en el total de clases. La aplicación de las métricas Factor Abstracción y Factor Polimorfismo antes y después de la refactorización permiten destacar la mejora de los resultados. Cuando las métricas FA y FP tienen un valor de 1 o cercano a 1, indica que no es necesario refactorizar. Cuando las métricas FA y FP del código refactorizado de un proyecto tienen una tendencia a 1 indica una mejora en el problema de la carencia de abstracción. Un valor cercano a 0 de estas métricas indivan la ausencia del mecanismo de abstracción en arquitecturas orientadas a objetos.

Sobre el sistema PSP Cenidet, se visualiza que los valores quedan idénticos antes y después de refactorizar, durante el análisis de los paquetes de este sistema se identificó solo una clase abstracta con un método público y un constructor por defecto, por tanto, al refactorizar está clase a una interfaz la abstracción sigue siendo la misma ya que una interfaz al igual que una clase abstracta implementa métodos abstractos, por lo cual los valores no se alteran.

Con la refactorización realizada a estos casos de prueba se respeta los principios de "Inversión de Dependencias" y "Abierto - Cerrado", se habilita la abstracción y el polimorfismo. A través de estos cambios el sistema o proyecto de software, es más flexible a cambios de comportamiento en tiempo de ejecución y es posible extender a nuevas funcionalidades o comportamientos.

## 4. CONCLUSIONES.

Los resultados de las pruebas realizadas muestran que el método de refactorización propuesto cumple de manera satisfactoria con los objetivos establecidos para este desarrollo, destacando que la refactorización es capaz de introducir abstracción y polimorfismo en arquitecturas que carecen de estas características.

El método de refactorización lleva a cabo correctamente la transformación de clases abstractas por interfaces, con la finalidad de obtener un código más flexible y extensible, respetando los principios de inversión de dependencias y abierto – cerrado. Así pues, la aplicación del método sobre arquitecturas de software hace que éstas dejen de ser rígidas y dejen de estar atadas fuertemente a comportamientos específicos.

Finalmente, durante el análisis de este desarrollo se detectó que, si la firma de los métodos que fueron generados en las interfaces son idénticas a otros servicios, posiblemente sea necesario utilizar una misma interfaz como servicio en lugar de tener 2 interfaces, de está forma se estaría respetando el principio de "*No repetición*".

## 5. REFERENCIAS

Brito e Abreu, F., & Melo, W. (1996). Evaluating the impact of object-oriented design on software quality. International Software Metrics Symposium, Proceedings, 90–99.

Christopoulou, A., Giakoumakis, E. A., Zafeiris, V. E., & Soukara, V. (2012). Automated refactoring to the Strategy design pattern. Information and Software Technology, 54(11), 1202–1214.

Dirk, R. (1999). Working with Java Interfaces and Classes - How to maximize design and code reuse in the face of inheritance. Friedrich-Alexander-University of Erlangen-Nürnberg.

Fowler, M. et al. (1999) Refactoring: Improving the Design of Existing Code. 1st Edition. Addison-Wesley.

Fowler, M. (2018) Refactoring: Improving the Design of Existing Code. 2nd Edition. Addison-Wesley Professional.

Genero, M., Piattini, M., & Jiménez, L. (2001). Empirical validation of class diagram complexity metrics. Proceedings - International Conference of the Chilean Computer Science Society, SCCC, 2001-Janua, 95–104.

Garro, A. (2014, 15 abril). Constructores | Java. Arkaitzgarro. https://www.arkaitzgarro.com/java/capitulo-13.html

Khatchadourian, R., & Masuhara, H. (2017). Automated Refactoring of Legacy Java Software to Default Methods. Proceedings - 2017 IEEE/ACM 39th International Conference on Software Engineering, ICSE 2017, 82–93.

Meyer, Bertrand. "Object Oriented Software Construction". 2nd Edition. PrenticeHall. 1997.

Nieva, G. (2020, 24 marzo). Interfaces en Java. dCodinGames. https://dcodingames.com/interfaces-en-java.

Robert C. Martin, (2000). Design Principles and Design Patterns.

Terence Parr, 2012 The defenitive ANTLR 4 reference. Editorial The Pragmatic Programmers.

Venners, B. (1998, 15 noviembre). artima - Designing with Interfaces https://www.artima.com/articles/designing-with-

 ISSN en trámite

# Generador Automático de Código Mixto Para Interoperar Lenguajes Fortran-C++ para Acceder a Base de Datos Relacionales desde Fortran

Mario Guillén-Rodríguez*, Humberto Hernández García*, Luis Enrique Altamirano Islas*, Julio Alberto Hernández Galicia*, Brenda Grissel Hernández Aguilar*

**Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Cuernavaca, Mor. México (Tel: 52-777-3623811; e-mail: {mguillen, hhg, leai, hgalicia, bgha}@ineel.mx).*

**Abstract:** Este artículo presenta una herramienta para generar el código en forma automática de las Interfaces Fortran-C++ y de las funciones de lectura y escritura requeridas para acceder a base de datos relacionales a partir de programación con lenguajes mixtos. Se utiliza el lenguaje Fortran interoperando con métodos y funciones escritos en lenguaje "C++". La interoperabilidad Fortran-C++ permite el reuso de código en ambas direcciones y utilizar las bondades de ambos lenguajes.

*Keywords:* Fortran, C++, lenguajes mixtos, interoperabildad y generación de código.

## 1 INTRODUCCIÓN

Fortran es un lenguaje de programación de alto nivel de propósito general, procedimental e imperativo, enfocado principalmente a la computación científica y al análisis numérico de alto rendimiento y al procesamiento en paralelo (Adams 1992, Chapman 2018). A menudo, cuando se escriben programas informáticos de ingeniería complejos, es necesario leer, escribir y organizar grandes cantidades de datos y almacenarlos en un formato adecuado con cierto tipo de relaciones de tal modo que los datos se pueden recuperar en un orden diferente al que se crearon. Una base de datos suele ser útil en esta situación, ya que permite al usuario especificar nombres de relaciones e identificar claves asociadas a cada registro. Estos nombres y claves se utilizan para recuperar datos en cualquier orden deseado. Actualmente, Fortran no ofrece facilidades estándares para trabajar con base de datos, por lo que se hace necesario utilizar otro lenguaje de programación para acceder a la base de datos, por lo que es necesaria la programación con la interoperabildad entre lenguajes.

La programación con interoperabilidad entre lenguajes le llamaremos código mixto o programación con lenguajes mixtos y definiremos como el proceso de creación de programas en los que el código fuente está escrito en dos o más lenguajes de programación. Lo que permite explotar las bondades que contempla un segundo lenguaje para realizar las tareas que un primer lenguaje base de programación no contiene o que se hace muy complicado su desarrollo. En la programación con código mixto, una rutina escrita en un lenguaje llama a una función, procedimiento o subrutina escrita en otro lenguaje. Por ejemplo, un programa Fortran puede necesitar llamar a una biblioteca compartida existente o a un procedimiento del sistema escrito en otro lenguaje como "C" o "C++". Para programar con lenguajes diferentes se requiere que los compiladores utilizados sean compatibles entre sí, por ejemplo, para Para Intel® Fortran, el complemento C admitido es Intel® C++ Compiler o Microsoft* Visual C++* Compiler en Windows*, e Intel® C++ Compiler o gcc* en Linux* y Mac OS* (IntelOneAPI 2022).

Para lograr la interoperabilidad de los lenguajes Fortran y C++, se utilizaron las características de Fortran 2003 para interactuar con C y C++, estas características han sido implementadas como extensiones de los compiladores Fortran actuales.

### *1.1 Antecedentes*

Fortran es el primer lenguaje de programación de alto nivel, nació a finales de 1956, "The IBM Mathematical Formula Translation System". Ha tenido una gran relevancia en el ámbito científico y de procesamiento paralelo, y se constituyó como pieza central en el desarrollo de software para la industria aeroespacial desde sus comienzos (ej: Misiones Mariner I y II). La primera versión del lenguaje, llamada FORTRAN I, comprendía un total de 32 instrucciones. Versiones posteriores aportaron características requeridas según el avance de los lenguajes de programación. FORTRAN II, III y IV incluyeron nuevos conceptos al lenguaje como la subrutina, la función y "el área común" no incluidas en la versión original (Curcic 2020, Chivers 2015, Metcalf 2018, Markus 2012, Subrata 2020). Con la especificación de FORTRAN 66 se logró alcanzar la primera publicación de un estándar ANSI. En los años '70 se publicó una nueva versión del estándar, llamada FORTRAN 77. En la primera mitad de la década de los '90 otra revisión del estándar resultó en la publicación de Fortran 90, en la cual se introdujeron cambios como la supresión del formato fijo de FORTRAN I, se permitió que los identificadores

 ISSN en trámite

superaran los 31 caracteres, se introdujo la instrucción END-DO para hacer más estructurados los ciclos, se introdujeron los punteros como nuevo tipo de dato y los Módulos pasaron a formar parte de la nueva versión del lenguaje. Hasta este momento todas las actualizaciones del estándar facultaban a los programadores a recompilar el código fuente escrito en versiones anteriores del mismo y éste era totalmente operativo en la nueva versión del lenguaje. Hacia el año 1995 una revisión menor al estándar de Fortran 90 fue publicada; esta versión es conocida como Fortran 95. Aunque se pudiera pensar en este punto que Fortran ya no tenía más utilidad o aplicación como lenguaje de programación, hacia fines de 2004 el comité de estandarización de Fortran decidió revisar nuevamente el estándar, publicando una nueva versión. Esta versión, conocida como Fortran 2003, incorporó nuevas características como: mecanismos de programación orientada a objetos, tipos de datos parametrizados, interoperabilidad con el lenguaje C, punteros a funciones, etc. Para fines de 2010, se publicó una nueva revisión del estándar de Fortran, denominada Fortran 2008, en el cual se incorporó un modelo de procesamiento paralelo (co-arrays). Fortran se ha convertido a lo largo de sus años de vida en uno de los lenguajes de programación más utilizados dentro del ámbito científico. Este aún se utiliza en áreas de las Ciencias de la Computación como por ejemplo High Performance Computing (Chapman 2018, Curcic 2020, Metcalf 2018, Subrata 2018).

## 2. MARCO CONCEPTUAL

El estándar del lenguaje Fortran 2003 proporciona un mecanismo estandarizado para interoperar con C. Se proporcionan métodos para que un subprograma Fortran acceda a estructuras de datos C e invoque funciones C y, a la inversa, para que una función C acceda a estructuras de datos Fortran e invoque subprogramas Fortran. Para que esto sea posible, es claro que cualquier entidad a la que se acceda desde ambos lenguajes de programación debe tener declaraciones equivalentes; debe haber un método para asignar la declaración de Fortran a la utilizada en C y viceversa.

### *2.1 Interoperabilidad de Tipos Intrínsecos*

Esto se logra mediante el uso del mecanismo *kind* introducido en Fortran 90. El lenguaje proporciona un nuevo módulo intrínseco, *iso_c_binding*. Este contiene constantes enteras con nombre, que son los tipos de datos de los valores que un tipo intrínseco de Fortran debe tener para interoperar con un tipo C. Algunos de los más importantes se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1. Tipos intrínsecos**

| Tipo Fortran | Valor Kind | Tipo C |
|---|---|---|
| Integer | c_int | int |
| Integer | c_short | short |
| Integer | c_long | long |
| Real | c_double | double |
| Character | c_char | char |

Por ejemplo, para una variable declarada en lenguaje *C*,

short numarea;
La declaración en lenguaje Fortran es:
use, intrinsic :: iso_c_binding
integer( c_short ) :: numarea

### *2.2 El Atributo Valor*

El lenguaje *C* pasa los argumentos por valor, lo que no era posible en lenguaje Fortran antes del estándar de 2003, ya que los pasaba por referencia. Sin embargo, el nuevo estándar permite que un programa especifique que un argumento se pasa por valor mediante el uso del atributo VALUE para argumentos ficticios escalares.

### *2.3 Invocar funciones de C desde Fortran*

Si un subprograma Fortran invoca una función C, la función debe ser interoperable, al igual que las variables. Para lograr esto, se debe tener una interfaz explícita en el alcance declarada con el atributo *bind*, por ejemplo:

```
interface
  Subroutine c_func( a, b, c ) Bind( C )
    Use, intrínsic :: iso_c_binding
    real ( c_double ), dimension ( * ) :: a
    Integer( c_int ), value :: b
    Type ( c_ptr ), value :: c
  End subrutina c_func
End Interface
```

La interface anterior, programada en Fortran, permite la interoperabilidad con la siguiente función en lenguaje C:
void c_func( doble *a, int b, void *c );

Hay que tener en cuenta que los dos últimos argumentos se pasan por valor. La invocación es entonces simplemente:

```
Real( c_doble ), dimension( 1:10 ) :: arreglo
integer (c_int) :: num
Type ( c_ptr ) :: dato
...
call c_func (arreglo, num, dato)
```

Se puede usar un mecanismo similar para invocar funciones C no nulas. En este caso la interfaz debe definir una función Fortran en lugar de una subrutina. La interoperabilidad entre Fortran y C incluye otros tópicos, que están fuera de este trabajo, como: Tipos de datos derivados; variables globales; paso de apuntadores; arreglos de caracteres; paso de arreglos unidimensionales y arreglos multidimensionales; entre otros.

## 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### *3.1 Formulación de la hipótesis*

Es posible generar en forma automática el código de Módulos, Interfaces y las funciones de lectura y escritura a base de datos relacionales, que permitan interoperar entre los lenguajes Fortran y C++, a partir de la especificación en lenguaje XML de las consultas y argumentos para las rutinas de lectura y a

 ISSN en trámite

partir de los metadatos del esquema de base de datos para las rutinas de escritura.

*3.2 Preguntas de investigación*

¿Se puede realizar en forma automática la generación de código en lenguaje Fortran y C++ que permita hacer declaraciones equivalentes en los dos leguajes para permitir la interoperabilidad?

¿Se puede realizar en forma automática la generación de código en lenguaje Fortran y C++ que permitan realizar las funciones de lectura y escritura a bases de datos relacionales?

*3.3 Formulación del Problema*

Se requiere de un generador automático de código en lenguajes Fortran y C++ que interoperen entre sí y que permitan acceder a base de datos relacionales.

*3.4 Justificación*

El desarrollo de esta investigación consistió en analizar diferente documentación de compiladores, libros y artículos que indicaran como se realiza la interoperabilidad entre los lenguajes Fortran y C++ (Adams 1992, Chapman 2018, Chivers 2015, Curcic 2020, Metcalf 2018, Markus 2012, Subrata 2018, IntelOneApi 2022).

Para realizar el generador de código se debe considerar lo siguiente:

- ¿Cómo se debe hacer?
- ¿Qué componentes deben usarse?
- ¿Qué elección de arquitectura y diseño?
- ¿Cuál es su Costo?
- ¿Cómo se integraría con otros productos?
- ¿Cuánto mantenimiento requeriría el código?

*3.5 Objetivos de la investigación*

*3.5.1 Objetivo General*

Proporcionar una herramienta que genere código en forma automática con lenguajes mixtos utilizando Fortran y C++, de tal forma que exista interoperabilidad entre estos lenguajes y que permitan leer y escribir a bases de relacionales.

*3.5.2 Objetivos Específicos*

- Analizar los requerimientos técnicos necesarios para la implementación del generador de código.
- Elaborar el diseño del generador.
- Describir la implementación del generador.
- Mostrar los resultados obtenidos.

*3.5.3 Alcances y Limitaciones*

Por limitaciones de tiempo solo se desarrollará un subconjunto de tipos de datos del lenguaje Fortran y arreglos de una dimensión para cumplir con los requerimientos solicitados.

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

La programación con lenguajes mixto es el proceso de combinar código creado por diferentes lenguajes de programación en un solo programa ejecutable. Hay dos formas posibles de que esto pueda ser logrado: mediante la creación de archivos de objetos con diferentes compiladores que están vinculados en un solo ejecutable (enlace estático); o creando una biblioteca de enlaces dinámicos con un idioma y llamando a procedimientos desde la biblioteca utilizando el otro idioma (enlace dinámico). El enlace estático mezcla las diferentes partes del lenguaje en un solo programa ejecutable que es autónomo.

Independientemente del método elegido para crear una aplicación de lenguaje mixto, dos problemas básicos deben ser superados:

- El primer problema involucra cómo un lenguaje nombra sus procedimientos y cómo esos nombres pueden ser reconocidos por el otro lenguaje.
- El segundo problema, para ser útiles, los procedimientos deben transferir información hacia adelante y hacia atrás de una manera que ambos lenguajes la puedan entender y utilizar. Esto involucra el paso de argumentos a una subrutina o función, pasando el resultado de una función entre lenguajes y la forma como se interpretan los tipos de datos. Si los argumentos no se pasan o no se interpretan correctamente, el resultado puede ser impredecible, y puede dar respuestas sin sentido.

Un concepto fundamental en este desarrollo es el uso de Módulos Fortran. Un Módulo en Fortran es una forma de agrupar funciones y subrutinas, permitiendo dividir programas en múltiples archivos y se utilizan para empaquetar subprogramas, datos y bloques de interface. Los datos globales pueden ser utilizados por más de una rutina, se pueden declarar variables que pueden estar disponibles dentro de cualquier rutina que se elija. De forma predeterminada, todas las variables y subrutinas de un módulo están disponibles para el programa que utilizan el código del Módulo mediante la declaración “USE” de Fortran. Sin embargo, se puede controlar la accesibilidad del código del módulo utilizando los atributos privados y públicos. Cuando se declara alguna variable o subrutina como privada, no está disponible fuera del módulo.

El generador de código propuesto, está formado por dos subsistemas, uno para lecturas y otro para escrituras de base datos relacionales.

*4.1 Generador de Lecturas*

El subsistema Generador de lecturas está realizado en lenguaje Java y se compone de dos aplicaciones, la primera genera un Módulo Fortran con la declaración de las Interfaces de las rutinas de lectura y otro Módulo Fortran con la implementación de dichas rutinas, de esta forma se implementa la comunicación Fortran-Fortran (Aplicativo-rutinas de lectura); la segunda aplicación genera un Módulo Fortran con la definición de las Interfaces de las rutinas de lectura en C++ y otro Módulo en C++ con la implementación de las rutinas de lectura a Base de Datos, implementando así la comunicación Fortran-C++.

 ISSN en trámite

El proceso es el siguiente, mediante un documento XML en el cual se define toda la información necesaria para generar las rutinas de lectura que debe contener cada uno de los elementos siguientes: id - identificador o nombre de la rutina, oper - operación DML a realizar, en este caso SELECT, sql - sentencia sql a realizar; y para cada argumento que recibirá la rutina se define: tipo.- tipo de dato, nombre - nombre de variable en Fortran, array - indica si es escalar o arreglo, nombre_c - nombre de variable en C++, nombre_campo - nombre del campo en la tabla de base de datos, posicion_campo - posición del campo en la consulta SQL, si se indica "0" el valor "0" significa que el campo es de control cómo el número de registros leídos y/o variable de error.

```
<subroutines>
        <subroutine id  = "LE_PE_030" oper = "SELECT" sql = "SELECT NOMARE,
        NOAREA FROM \030_AREAS\ ORDER BY NOMARE">
        <argumento>
                <tipo>char</tipo>
                <nombre>NOMARE</nombre>
                <array>SI</array>
                <nombre_c>NOMARE</nombre_c>
                <nombre_campo>NOMARE</nombre_campo>
                <posicion_campo>1</posicion_campo>
        </argumento>
        <argumento>
                <tipo>int</tipo>
                <nombre>NOAREA</nombre>
                <array>SI</array>
                <nombre_c>NOAREA</nombre_c>
                <nombre_campo>NOAREA</nombre_campo>
                <posicion_campo>2</posicion_campo>
        </argumento>
        <argumento>
                <tipo>int</tipo>
                <nombre>NMAREA</nombre>
                <array>NO</array>
                <nombre_c>NUM</nombre_c>
                <nombre_campo>---</nombre_campo>
                <posicion_campo>0</posicion_campo>
        </argumento>
        <argumento>
                <tipo>bool</tipo>
                <nombre>ERROR</nombre>
                <array>NO</array>
                <nombre_c>ERR</nombre_c>
                <nombre_campo>---</nombre_campo>
                <posicion_campo>0</posicion_campo>
        </argumento>
        </subroutine>
</subroutines>
```

Al ejecutar el generador de código de lecturas, éste procesa el archivo XML con la estructura antes descrita y genera los archivos que se mencionan a continuación, asimismo, se muestra el contenido de los mismos conforme al ejemplo propuesto.

**Archivo mod_fortran_ifaces-** Módulo Fortran donde se declara la interface de cada rutina de lectura, a continuación, se ilustra la rutina LE_PE_030_F del ejemplo:

```
MODULE mod_fortran_ifaces
    IMPLICIT NONE
    INTERFACE
      SUBROUTINE LE_PE_030_F ( NOMARE,  NOAREA,  NMAREA,  ERROR )
        CHARACTER (LEN=*) ,   DIMENSION ( : )  ::  NOMARE
        INTEGER,   DIMENSION ( : )  ::  NOAREA
        INTEGER                  ::  NMAREA
        LOGICAL                  ::  ERROR
      END SUBROUTINE
    END INTERFACE
  END MODULE mod_fortran_ifaces
```

**Archivo fortran_ifaces-** Módulo Fortran donde se implementa cada rutina de lectura, a continuación, se ilustra la rutina LE_PE_030_F del ejemplo:

```
SUBROUTINE LE_PE_030_F ( NOMARE, NOAREA, NMAREA, ERROR )
    use iso_c_binding, only: C_BOOL, C_PTR, C_LOC, C_INT, C_FLOAT
    use mod_fortran_ifaces
    CHARACTER (LEN=*) ,   DIMENSION ( : )  ::  NOMARE
    INTEGER,   DIMENSION ( : )  ::  NOAREA
    INTEGER                  ::  NMAREA
    LOGICAL (C_BOOL)                  ::  ERROR
    TYPE (C_PTR),   DIMENSION ( : ), ALLOCATABLE :: NOMARE_PTR
    CHARACTER(LEN=30),   DIMENSION ( : ), ALLOCATABLE :: NOMARE_STR
    INTEGER N
    ALLOCATE (NOMARE_PTR (SIZE (NOMARE)))
    ALLOCATE (NOMARE_STR (SIZE (NOMARE)))
    DO N=1, SIZE (NOMARE)
      NOMARE_STR (N) =""//char(0)
      NOMARE_PTR (N) = C_LOC ( NOMARE_STR (N) )
    END DO
    CALL LE_PE_030_F_C ( NOMARE_PTR, NOAREA,  NMAREA,  ERROR )
    DO N=1, NMAREA
      NOMARE(N) = TRIM (NOMARE_STR (N) )
    END DO
    RETURN
    END SUBROUTINE
```

**Archivo mod_fortran_c_ifaces-** módulo Fortran donde se implementa cada rutina de lectura que se implementa en C++ y que será consumida desde Fortran, a continuación, se ilustra la rutina LE_PE_030_F_C:

```
MODULE MOD_FORTRAN_C_IFACES
    IMPLICIT NONE
    INTERFACE
      SUBROUTINE LE_PE_030_F_C ( NOMARE,  NOAREA,  NMAREA,  ERROR )
      BIND ( C, NAME = 'LE_PE_030_F_C' )
        use iso_c_binding
        TYPE ( C_PTR ),   DIMENSION ( * )  ::  NOMARE
        INTEGER ( C_INT   ),   DIMENSION ( * )  ::  NOAREA
        INTEGER ( C_INT   )                  ::  NMAREA
        LOGICAL ( C_BOOL  )                  ::  ERROR
      END SUBROUTINE
    END INTERFACE
  END MODULE MOD_FORTRAN_C_IFACES
```

**Archivo fortran_c_ifaces-** archivo C++ donde se declara e implementa cada rutina de lectura a base de datos, a continuación, se ilustra la rutina LE_PE_030_F_C:

```
extern "C" int LE_PE_030_F_C (  char**  NOMARE,  int*  NOAREA,  int& NUM,
bool& ERR )   {
    string NOMARE_s ;
    ERR = false;
     string sqlSmt = " SELECT NOMARE, NOAREA FROM \"030_AREAS\" ORDER
     BY NOMARE ";
     NUM = 0;
     stmt = conn->createStatement(sqlSmt);
     ResultSet* rset = stmt->executeQuery();
     try {
       while (rset->next())
       {
       NOMARE_s = rset->getString( 1 );
       NOMARE_s = rtrim ( NOMARE_s );
       std::copy( NOMARE_s.begin(), NOMARE_s.end(), NOMARE [NUM] );
       NOAREA[NUM] = rset->getInt( 2 );
       cout << " NOMARE: " << NOMARE[NUM] << endl;
       cout << " NOAREA: " << NOAREA[NUM] << endl;
       cout << " NUM: " << NUM << endl;
       cout << " ERR: " << ERR << endl;
       NUM += 1;
      }
```

 ISSN en trámite

```
    }
    catch (SQLException ex)
    {
      ERR = true;
      cout << "Exception thrown for LE_PE_030_F_C " << endl;
      cout << "Error number: " << ex.getErrorCode() << endl;
      cout << ex.getMessage() << endl;
    }
    stmt->closeResultSet(rset);
    conn->terminateStatement(stmt);
    return 0;
  } //TERMINA SUBROUTINE
```

*4.2 Generador de Escritura*

El subsistema Generador de Escrituras esta realizado en lenguaje Java. Para propósito de este trabajo se utilizó el administrador de base de datos Oracle y utilizando el JDBC para acceder al administrador de la base de datos de Oracle Database Express 11.2, se consultan los metadatos, los cuales son la información que proporciona el administrador de base de datos sobre tablas, vistas, columnas y procedimientos que conforman un esquema de base de datos. Con esta información el generador obtiene para cada una de las tablas, su nombre, el nombre de sus columnas, tipo de datos y longitud, y genera un archivo de módulo Fortran con la definición de variables y cuatro subrutinas con los prefijos INI, ACT, ESC, FIN concatenado con el nombre de la tabla. A continuación se muestra el ejemplo del código generado para un módulo y posteriormente se describe el contenido de cada subrutina.

```
MODULE mod_030_AREAS
    IMPLICIT NONE
    SAVE
    INTEGER T_CONT
    LOGICAL T_ERROR
    CHARACTER ( LEN=30 ) ,  DIMENSION ( : ), ALLOCATABLE  ::  T_NOMARE
    INTEGER,                DIMENSION ( : ), ALLOCATABLE  ::  T_NOAREA
    CONTAINS
    SUBROUTINE INI_030_AREAS( )
       INTEGER T_CONT
       LOGICAL T_ERROR
       T_CONT = 0
       T_ERROR = .FALSE.
       ALLOCATE( T_NOMARE ( 999999 ) )
       ALLOCATE( T_NOAREA ( 999999 ) )
    END SUBROUTINE
    SUBROUTINE ACT_030_AREAS(  &
       NOMARE,   &
       NOAREA,   &
       ERROR )
       LOGICAL ERROR
       CHARACTER (LEN=30) NOMARE
       INTEGER NOAREA
       T_CONT = T_CONT + 1
       T_NOMARE (T_CONT) = NOMARE
       T_NOAREA (T_CONT) = NOAREA
       ! Si se alcanza la dimensión, realizar la inserción e iniciar nuevamente los vectores
       IF (T_CONT .GE. ( 99999 - 10 ) ) THEN
          CALL ESC_030_AREAS ( ERROR )
          CALL INI_030_AREAS ( )
      END IF
    END SUBROUTINE
    SUBROUTINE ESC_030_AREAS ( )
       use iso_c_binding
       IMPLICIT NONE
       INTEGER ICONT
      TYPE (C_PTR), DIMENSION ( : ), ALLOCATABLE  ::  NOMARE_PTR
      ALLOCATE (  NOMARE_PTR  ( 999999 ) )
      DO ICONT = 1, 999999
         T_NOMARE ( ICONT )  = TRIM ( T_NOMARE ( ICONT ) )// char(0)
         NOMARE_PTR (ICONT) = C_LOC (  T_NOMARE ( ICONT ) )
      END DO
      CALL ESC_030_AREAS_F_C ( &
         NOMARE_PTR, &
         T_NOAREA,   &
         T_ERROR )
         DEALLOCATE (  NOMARE_PTR )
         CALL FIN_030_AREAS( )
    END SUBROUTINE
    SUBROUTINE FIN_030_AREAS( )
      T_CONT = 0
      T_ERROR = .FALSE.
      DEALLOCATE( T_NOMARE )
      DEALLOCATE( T_NOAREA )
    END SUBROUTINE

  END MODULE mod_030_AREAS
```

En el bloque inicial se define para cada variable el nombre, el tipo de dato, si es escalar o es arreglo, se define asignable para asignar su memoria en forma dinámica. En el ejemplo anterior se definen cuatro variables, dos variables que se obtienen de los metadatos de la tabla y se les antepone el prefijo T_ quedando T_NOMARE y T_NOAREA y dos variables de control T_CONT y T_ERROR.

La subrutina INI_030_AREAS tiene como objetivo inicializar las variables de control y asignar en forma dinámica el tamaño del dimensionamiento que las variables requieren.
La subrutina *ACT_030_AREAS* tiene como objetivo almacenar en memoria las variables que se van a escribir en Base de Datos en arreglos temporales.
La subrutina *ESC_030_AREAS* tiene como propósito preparar y hacer compatibles con el lenguaje C++ las variables que se utilizan para escribir en base de datos, además invoca a una rutina implementada en lenguaje C++, llamada *ESC_030_AREAS_F_C* quien se encarga de escribir a base de datos.
La subrutina *FIN_030_AREAS* tiene como objetivo inicializar las variables de control que retornará a Fortran y de desasignar la memoria de variables temporales.
Asimismo, el generador de código genera un archivo en lenguaje C++ con la implementación de las rutinas de escritura a base de datos relacional en bloques de buffers de 1000 registros en cada inserción, permitiendo así disminuir el tiempo de escritura; las rutinas contenidas en este archivo son llamadas desde las subrutinas ESC de escritura de cada módulo como se mencionó anteriormente.

A continuación, se ilustra el ejemplo del código generado para la rutina de escritura ESC_030_AREAS_F_C.

```
extern "C" int ESC_030_AREAS_F_C ( char** NOMARE, int* NOAREA, int& NUM,
bool& ERR ) {
  char NOMARE_BUFF[1000][30];
  ub2 NOMARELen[1000];
  int NOAREA_BUFF[1000];
  ub2 NOAREALen[1000];
   string sqlStmt = "INSERT INTO PEGYT.\"030_AREAS\" ( NOMARE, NOAREA )
   VALUES ( :1, :2 ) ";
   stmt = conn->createStatement(sqlStmt);
  bool bcommit = "true";
  stmt->setAutoCommit(bcommit);
  ERR = false;
  int nreg = 1000;
  int nveces;
  int residuo;
  try {
    nveces = NUM / nreg;
```

 ISSN en trámite

```
    residuo = NUM % nreg;
    int k = 0;
    for (int j = 0; j < nveces; j++) {
      for (int i = 0; i < nreg; i++) {
        strcpy (NOMARE_BUFF[i],NOMARE[k]);
        NOAREA_BUFF[i] = NOAREA[k];
        k++;
      }
      for (int i = 0; i < nreg; i++) {
        NOMARELen[i] = strlen ( NOMARE_BUFF[i] ) + 1;
        NOAREALen[i] = sizeof ( NOAREA_BUFF[i] );
      }
      stmt->setDataBuffer( 1, NOMARE_BUFF, OCCI_SQLT_STR, sizeof (
      NOMARE_BUFF[0] ), NOMARELen);
      stmt->setDataBuffer( 2, NOAREA_BUFF, OCCIINT, sizeof ( NOAREA_BUFF[0] ),
      NOAREALen);
      stmt->executeArrayUpdate(nreg);
    }
    if (residuo != 0) {
      for (int i = 0; i < residuo; i++) {
        strcpy (NOMARE_BUFF[i],NOMARE[k]);
        NOAREA_BUFF[i] = NOAREA[k];
        k++;
      }
      for (int i = 0; i < residuo; i++) {
        NOMARELen[i] = strlen ( NOMARE_BUFF[i] ) + 1;
        NOAREALen[i] = sizeof ( NOAREA_BUFF[i] );
      }
      stmt->setDataBuffer( 1, NOMARE_BUFF, OCCI_SQLT_STR, sizeof (
      NOMARE_BUFF[0] ), NOMARELen);
      stmt->setDataBuffer( 2, NOAREA_BUFF, OCCIINT, sizeof ( NOAREA_BUFF[0] ),
      NOAREALen);
      stmt->executeArrayUpdate(residuo);
    }
  }
  catch (SQLException ex)
  {
    ERR = true;
    cout << "Exception thrown for 030_AREAS" << endl;
    cout << "Error number: " << ex.getErrorCode() << endl;
    cout << ex.getMessage() << endl;
  }
  conn->terminateStatement(stmt);
  return 0;

} //TERMINA SUBROUTINE
```

## 5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos con los casos de prueba definidos cumplen con los resultados esperados y superó las expectativas, tanto en tiempo de desarrollo, como en tiempo de ejecución. El código generado por la herramienta cumple con las especificaciones del lenguaje de Fortran, C++ y la librería OCCI de Oracle 11g.

Esta herramienta se utilizó en el desarrollo de un sistema donde se realizaron 211 rutinas de lectura y 146 rutinas de escritura, minimizando el tiempo de desarrollo en más de un 80% y aumentando la confiabilidad y consistencia de los mismos al utilizar los mismos criterios de generación de código.

Para las rutinas de escritura se utilizaron las características de la librería OCCI de Oracle que permite escribir en bloques de datos en vez de registro por registro. El código desarrollado escribe en bloques de buffers de 1000 registros en cada escritura, esto permitió disminuir el tiempo de escritura, por ejemplo, se realizaron pruebas de escritura registro por registro con una duración de 100 segundos para escribir 350,000 registros y utilizando los bloques se tuvo una duración de solo 8 segundos para el mismo número de registros. Sumando la reducción de tiempos de escritura de todas las subrutinas el tiempo total de ejecución de las aplicaciones se redujo de decenas de minutos a sólo minutos.

## 6. CONCLUSIONES

Fortran en su larga vida como lenguaje de programación aún sigue vigente pese a ser un lenguaje con algunos prejuicios. El espectro de aplicaciones que aún sigue ejecutándose y que ha sido escrito en este lenguaje es significativamente importante. Si bien se han utilizado herramientas automatizadas con el fin de mejorar los procesos de mantenimiento, implantación o migración de sistemas heredados escritos en Fortran, éstas no han tenido resultado importante en la contienda con este tipo de software.

Este artículo presenta una herramienta para generar el código en forma automática, de las Interfaces Fortran y de las funciones de lectura y escritura requeridas para acceder a base de datos relacionales en lenguaje C++. La herramienta permite a los desarrolladores de aplicaciones de Fortran enfocarse en la parte algorítmica y de lectura y escritura a BD y olvidarse de los detalles de interoperabilidad de los lenguajes Fortran y C++, mejorando potencialmente el acoplamiento entre los dos diferentes lenguajes en la misma aplicación, mejorando a su vez el tiempo de desarrollo y mantenimiento de las aplicaciones con la necesidad de utilizar código mixto.

## 7. REFERENCIAS

Adams J.C., Balnerd,W.S., and Other, (1992). *Fortran 90 Handbook,* page numbers. Intertext Publications McGraw-Hill Book Company, One Lincoln Plaza New York, NY 10023.

Chapman S.J., (2018). *Fortran for Scientists and Engineers,* page numbers. McGraw-Hill Education, 2 Penn Plaza, New York, NY 10121.

Chivers I., Sleightholme J., (2015). *Introduction to Programming with Fortran,* page numbers. Springer International Publishing Switzerland.

Curcic M., (2020). *Modern Fortran*, Manning Publications Co. 20 Baldwin Road PO Box 761 Shelter Island, NY 11964.

Metcalf M., Reid J., and Other, (2018). *Modern Fortran*, Oxford University Press 198 Madison Avenue, New York, NY 10016.

Markus A., (2012). *Modern Fortran in Practice*, Cambridge University Press 32 Avenue of the Americas, New York, NY 10013-2473.

Subrata R., (2020). *Fortran 2018 with Parallel Programming,* page numbers. CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742.

IntelOneAPI, https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/tools/oneapi/overview.html, fecha última visita nov., 2022.

 ISSN en trámite

# Arquitectura para Acceso a Datos Abiertos Públicos Mediante Software Intermediario y Asistente Virtual

**J. Guadalupe Ramos Díaz, Adrián Núñez Vieyra, Juan Jesús Ruiz Lagunas, Juan Carlos Olivares Rojas**

*Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico de Morelia*
*Departamento de Sistemas y Computación*
*Av. Tecnológico No. 1500, CP 58120*
*(e-mail:{jose.rd,adrian.nv,juan.rl,juan.or}@morelia.tecnm.mx)*

**Abstract:** Los datos abiertos constituyen un medio para que los gobiernos puedan publicar información acerca de su ejercicio, en los que la transparencia de la información es indispensable. Históricamente los datos abiertos se han puesto a disposición a través de formatos planos o semi estructurados (por ejemplo, empleando lenguajes de la Web Semántica, e.g., RDF, OWL, SPARQL). Para poder acceder e interpretar la información publicada se requiere el conocimiento de un lenguaje de consulta formal, lo que ha traído como consecuencia un bajo consumo ya que un ciudadano no posee el entrenamiento técnico para plantear consultas. En este trabajo en progreso, presentamos una arquitectura compuesta por un asistente virtual que recibe consultas de ciudadanos expresadas en lenguaje natural; el asistente las envía a servicios web localizados en la nube, que a su vez, llevan a cabo las consultas semánticas, obteniendo respuestas y regresándolas al ciudadano. También referimos la infraestructura técnica que se está empleando para desplegar el prototipo.

*Keywords:* Datos abiertos, gobierno abierto, Web Semántica, Middleware, Asistente Virtual

## 1. INTRODUCCIÓN

La transparencia de información en la ejecución de procesos públicos es una de las características de los gobiernos que mejor aprecian los ciudadanos. Con el fin de llevar a cabo la transparencia se ponen en marcha diversas estrategias. En este trabajo nos enfocamos en el uso de tecnología de la información para poder acceder de manera simple, para el ciudadano, a la información que generan los procesos públicos o acciones de gobierno.

En este sentido cabe decir, que existen sitios con abundante información emanada de gobierno, por ejemplo, el sitio https://datos.gob.mx/ del Gobierno de México, indica, al 9 de octubre de 2022, que cuenta con 40727 datos de 280 instituciones. La información que se puede encontrar en el sitio se encuentra en distintos formatos, e.g., CSV, JSON, KML, TXT. En otro ejemplo, en (Univ. Cantabria, 2022), podemos encontrar información disponible en formatos RDF/XML, JSON, CSV, y XML entre otros. Como podemos ver, hay una profusa oferta de información, sin embargo, un ciudadano común no posee el tiempo ni el conocimiento técnico para poder indagar o escudriñar entre la información disponible. En este contexto, consideramos que la ciudadanía requiere del diseño de soluciones de software integrales que puedan recibir peticiones o consultas en lenguaje natural y que sea el sistema quien realice la tarea de localizar la información requerida y quien la presente de manera sucinta en alguna interfaz amigable, incluso verbal hacia el usuario.

En este trabajo en progreso, presentamos la arquitectura de un sistema para la consulta de datos abiertos en lenguaje natural mediante asistentes virtuales, así como la infraestructura asociada para construir la solución.

## 2. ANTECEDENTES

En este apartado exponemos los conceptos: datos abiertos, Web Semántica y Asistentes Virtuales que conforman la base fundamental de nuestro proyecto.

Los denominados ***datos abiertos*** (Open Data Charter, 2015) son parte de una herramienta global para que una organización pueda publicar información acerca de sus procesos de forma meta etiquetada. La intención de los datos abiertos en una organización es publicar información acerca de algún contexto (o un proceso), para que esté disponible al mundo, con la finalidad de que los creadores de aplicaciones puedan construir interfaces que hagan una vista amigable de los datos y por tanto, que se incremente la transparencia y acceso a la información de la organización que los publica (Open Data Charter, 2015).

Citando la Carta Internacional de Datos Abiertos (Open Data Charter, 2015), los datos abiertos se refieren a "datos digitales que son puestos a disposición con las características técnicas y

 ISSN en trámite

jurídicas necesarias para que puedan ser usados, reutilizados y redistribuidos libremente por cualquier persona, en cualquier momento y en cualquier lugar". La Carta se compone de 6 principios que se desarrollaron en 2015 contando con la participación de gobiernos, la sociedad civil y expertos. A continuación, se enumeran:

1. Abiertos por defecto: Hay presunción de que los datos son públicos.

2. Oportunos y Exhaustivos: Los datos deben estar publicados de forma rápida y completa.

3. Accesibles y Utilizables: Los datos deben ser legibles por máquinas y gratuitos.

4. Comparables e Interoperables: La comparación y combinación de datos debe ser asequible.

5. Para mejorar la Gobernanza y la Participación Ciudadana: Deben propiciar la transparencia.

6. Para el Desarrollo Inclusivo y la Innovación: Al estar al alcance de todos se potencia sus derechos.

Una de las alternativas que posibilita el acceso a los datos abiertos es fundamentalmente tecnología de la Web Semántica o Web 3.0.

***Web Semántica***: La Web 3.0 es una frase que fue acuñada por John Markoff en el New York Times en 2006, que usualmente se simplifica como la Web para incluir contenido con etiquetas semánticas. De hecho, se le conoce como la Web Semántica término introducido en 2001 por Tim Berners-Lee. El fundamento de la Web Semántica es la integración de datos por medio de metadatos, las etiquetas de formateo de versiones previas se emplean o convierten en etiquetas descriptoras de significado (semántica). Los datos se convierten en información con significado que puede ser localizada, evaluada y recuperada por agentes de software.

La vertiente formal de la Web Semántica emplea estándares sofisticados que usan vocabularios formales llamados ontologías y se emplean lenguajes derivados del XML para escribir los documentos tales como RDF y RDFS (Yu, 2011). Adicionalmente a dichos estándares se inventaron lenguajes de consulta tales como el SPARQL que permite lanzar consultas a repositorios de información semántica.

***Asistente virtual***: La creciente oferta de productos y la confianza cada vez mayor de las personas hacia los medios digitales hace concebible el incremento de interfaces no humanas (virtuales). Una tendencia creciente, es pues, el desarrollo y uso de asistentes virtuales (Claessen et al, 2017). En el área de comercio electrónico los asistentes virtuales tienen la misión de hacer ciertas tareas más sencillas para las personas, se espera de ellos que asistan y reemplacen a los usuarios en la ejecución de actividades que consumen más tiempo, a partir de la recopilación de información (Chao et al., 2016).

En la literatura se emplean diferentes términos para referirse a este tipo de software: agentes virtuales o inteligentes, asistentes, avatares, bots o incluso agentes personales virtuales (véase McGoldrick, Keeling & Beatty 2008).

## 3. ARQUITECTURA E INFRAESTRUCTURA

En este trabajo proponemos un modelo de sistemas para consumo masivo de metadatos (datos abiertos) auxiliándonos de una arquitectura de software, que mostramos en la Fig. 1, y que posibilita la explotación de la información directamente por el usuario final, sin conocimientos técnicos y compuesta fundamentalmente de los siguientes tres elementos:

a) **Asistente** que recibe consultas (de un conjunto finito predefinido) en lenguaje natural y que las canaliza mediante invocaciones a los servicios de un intermediario (del inglés middleware). El asistente puede recibir cualquier expresión en lenguaje natural, pero a partir de sus capacidades de aprendizaje automático (del inglés *machine learning*) determina a qué consulta, dentro de un conjunto finito, se aproxima la petición del usuario. Cada consulta tiene asociada la dirección de un servicio web remoto, de tal manera que invoca al servicio web predeterminado para procesar la consulta correspondiente. El asistente gestiona las consultas asociadas a un tema específico, es decir, a un tópico concreto.

b) Un **intermediario** que recibe peticiones y las resuelve a partir de un conjunto de fuentes de datos semánticas. El intermediario funciona como una pasarela e interactúa con fuentes de datos semánticas remotas. Cuando el intermediario recibe la llamada a uno de sus servicios web, a partir de la base de datos de fuentes semánticas determina las direcciones web de las fuentes de datos semánticas, a las cuales lanzar la consulta SPARQL predeterminada para ese servicio. El intermediario espera la respuesta y prepara el reporte para devolverlo al asistente. La lista de fuentes semánticas tiene sus propios servicios web para mantenimiento de la propia lista, es decir: agregar y consultar direcciones IP asociadas a un tema concreto. En nuestro intermediario se pretende que la base de datos de fuentes semánticas distinga el conjunto de fuentes que contienen información del tema específico, de tal manera que una respuesta se componga de datos provenientes de distintas fuentes, pero que, sigan el mismo vocabulario (ontología) de metadatos.

 ISSN en trámite

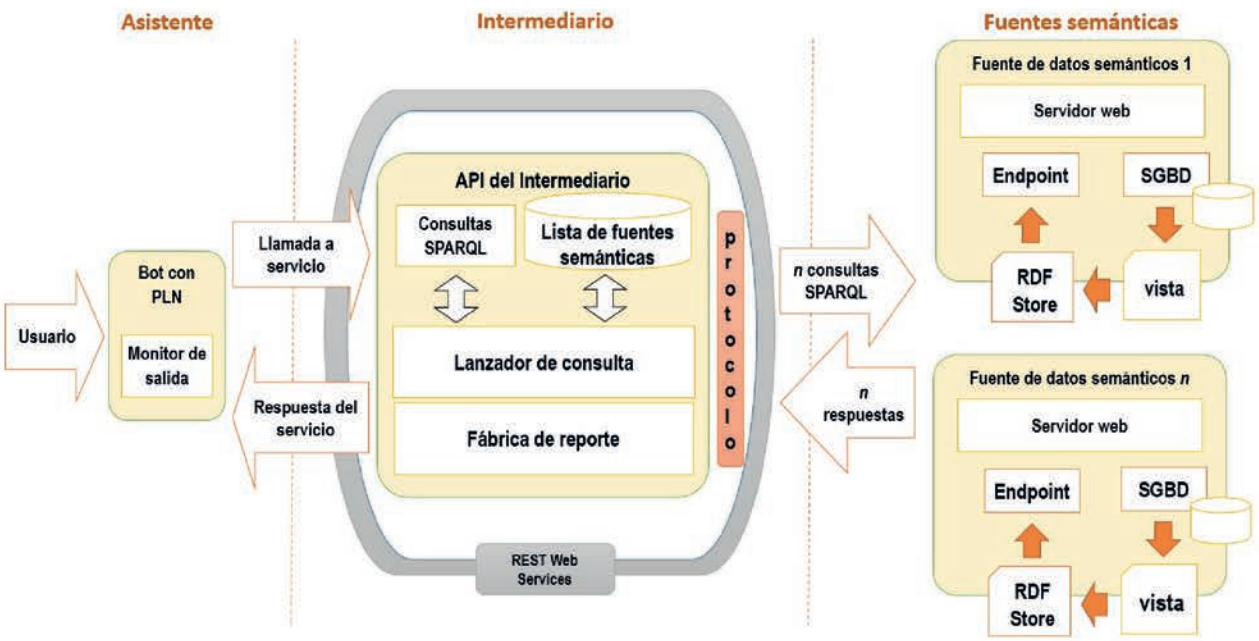



Figura 1 Arquitectura propuesta

c) **Fuentes semánticas** que contienen información meta etiquetada de algún contexto o proceso, de aplicación. La fuente de datos puede contener un endpoint, en cuyo caso, cuando llega una consulta, el endpoint la procesa y regresa el resultado. No obstante, no es necesario que contenga un endpoint, también se puede tratar de un archivo RDF que es accedido mediante una consulta remota empleando la librería JENA (JENA, 2022) para consulta SPARQL de archivos RDF.

Enseguida nos referimos a la infraestructura empleada para procesar el sistema de la Fig.1

a) Asistente o Bot: Para el desarrollo del asistente hemos estado haciendo pruebas empleando el framework para desarrollo de agentes conversacionales Google Dialogflow. En Dialogflow se puede agregar un conjunto de intenciones (*intents*) de comunicación del usuario al asistente. Cada intención representa un conjunto de frases que el usuario puede emitir al asistente. Dialogflow emplea técnicas de aprendizaje automático para reconocer una frase a partir del entrenamiento provisto.

b) Intermediario: Para el montaje del intermediario hemos desplegado un servidor de aplicaciones empleando la solución de nube llamada Jelastic a través del agente norteamericano RoseHosting. Jelastic nos permite crear un ambiente de ejecución que se compone de servidor de aplicaciones Apache Tomcat, un servidor de base de datos MySQL y los web services que hemos construido y que se conforman de archivos Jar desplegados en Tomcat.

En la Fig. 2. Se ilustra el escritorio Jelastic con un ambiente definido y que funge como contenedor de servicios.

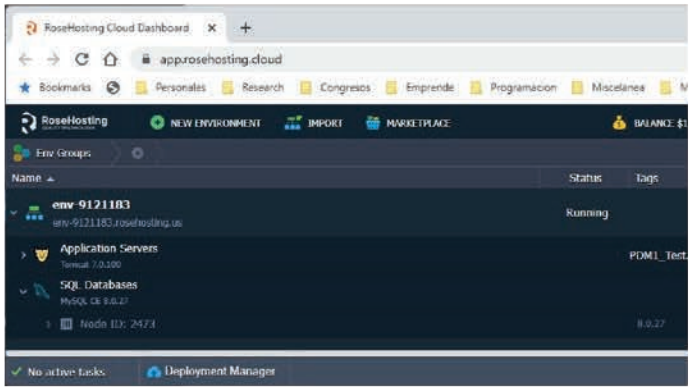



Figura 2 Infraestructura del intermediaro

c) Para las fuentes de datos semánticas contamos con un alojamiento que nos provee Akky.com. Por el momento sólo alojamos archivos RDF para desplegar los datos abiertos.

El modelo e infraestructura desplegada permite acceder a fuentes de datos semánticas. Si bien, los datos abiertos pueden publicarse en distintos formatos, en este ejercicio pretendemos usar tecnologías de la Web Semántica debido a las ventajas técnicas que ofrecen. Una de las más importantes es que se puede hacer uso de un vocabulario formal común (ontología) y

 ISSN en trámite

con ello la posibilidad de hacer reportes de diversas fuentes distribuidas en la web, es decir, combinar datos con fines comparativos.

En la Fig. 3 se muestra un ejemplo de la ejecución de una consulta lanzada desde el intermediario a un archivo RDF alojando en la nube. El enlace (con pago al momento de escribir el presente trabajo) que realiza la consulta es: http://env-9121183.rosehosting.us/PDM1_Test/rest/vista/serviciosemantico

Lo que pretendemos ilustrar en este enlace es el funcionamiento de la infraestructura.

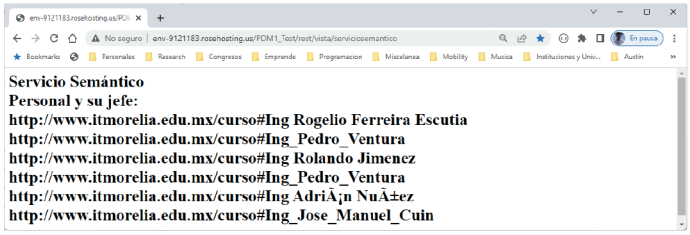



Figura 3 Resultado de una prueba de consulta desde el intermediario

## 4. TRABAJO RELACIONADO

En Viejo (2021) se plantea un trabajo en el que un chatbot permite acceder a datos gubernamentales mediante lenguaje natural. En ese caso los autores construyen un sistema específico para una fuente de datos específica. Nuestro trabajo pretende agregar una característica de genericidad enfocada a permitir escalabilidad, es decir, nosotros queremos que la lista de nuestras fuentes de datos semánticas admita el agregado de nuevas direcciones IP con información semántica, caminando hacia la escalabilidad. Ciertamente el aseguramiento de que la nueva fuente de datos semántica sea sintácticamente correcta es un requerimiento adicional, mismo que pensamos resolver mediante trabajo futuro desarrollando un parser para el vocabulario específico que se necesite.

En Martínez (2016) se plantea una metodología para construir buscadores web semánticos para contextos específicos. En ese momento, la tecnología para construir asistentes parlantes no estaba aún madura, por lo que adolece de ese componente que para nosotros es fundamental en el proyecto presente.

Consultando sitios proveedores de datos abiertos como Gobierno de España (2022) o Gobierno de México (2022) nos damos cuenta que cada día se publica mayor cantidad de datos en formatos diversos e.g., CSV, JSON, HTML, XLS, PC-Axis, XLSX, XML, PDF, ZIP, JPG, ASCII, RDF-XML, plain, SHP, KMZ, KML, ODS, TSV, OCTET-STREAM, WMS, GeoJSON, RSS, RDF-Turtle, API, Atom, GML, SPARQL, WFS, XHTML, SCORM, ELP, JSON-LD, RDF-N3, etc. Por lo que nuevamente, el consumo de una persona no técnica de tales datos es imposible. Por ello consideramos que la visión de un asistente auxiliar en la transparencia de la información es pertinente.

## 5. CONCLUSIONES

Creemos que la arquitectura e infraestructura propuesta es adecuada para la confección de sistemas de software dedicados a la transparencia de información gubernamental. La razón de nuestra afirmación se debe a que un ciudadano, en general no posee preparación técnica para expresar una consulta o hacer un filtrado manual de los datos que publican las fuentes oficiales, lo cual es paradójico porque el objetivo de los datos oficiales es que sea justamente el ciudadano quien haga consumo de los datos, es decir se entregan datos a las personas, que no podrán consumir. No cabe duda que la disposición de datos públicos se realiza, pero la posibilidad de que sean consumidos es baja, por ello, creemos que el despliegue de un asistente que responda preguntas expresadas en lenguaje natural es una apuesta adecuada. Si bien, la infraestructura la orientamos hacia la consulta de archivos semánticos (RDF), bien podría tratarse de otro formato, en cuyo caso tendríamos que cambiar el comportamiento del intermediario.

El proyecto que estamos desarrollando, que cuenta con apoyo del Tecnológico Nacional de México (Proyecto 14208.22-P "Modelo de software para consumo masivo de datos abiertos mediante bots y web semántica") está en una etapa intermedia, contamos ya con la infraestructura para operar el sistema y estamos realizando pruebas de las consultas remotas. Hasta ahora los resultados son prometedores lo cual confirma nuestra hipótesis de que la arquitectura es adecuada para acercar los datos abiertos a los ciudadanos.

## 5. REFERENCIAS

Claessen V., Schmidt A., Heck T., (2017), "Virtual Assistants, A Study on the Usability and User Perception of Customer Service Systems for E-Commerce", on 15th International Symposium of Information Science (ISI 2017)

Chao, C.-Y., T.-C. Chang, H.-C. Wu, Y.-S. Lin, and P.-C. Chen (2016): "The interrelationship between intelligent agents 'characteristics and users' intention in a search engine by making beliefs and perceived risks mediators" In: Computers in Human Behavior, 64, 117–125.

Gobierno de España (2022), Ministerio de asuntos económicos y transformación digital. https://datos.gob.es/es/catalogo?_res_format_label_limit=0

Gobierno de México (2022), Datos abiertos del Gobierno de México, https://datos.gob.mx/

JENA (2022), Apache Jena, SPARQL Tutorial, https://jena.apache.org/tutorials/sparql.html

Martínez, J., Ramos, J.G. Olivares, J.C., (2016) "Construction of Semantic Web search engine from a specific

ISSN en trámite

context", IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing: ROPEC, (2016).

McGoldrick, P. J., K. A. Keeling, and S. F. Beatty (2008): A typology of roles for avatars in online retailing. In: Journal of Marketing Management, 24 (3–4), 433–461.

Open Data Charter, (2015) https://opendatacharter.net/principles-es/, consultado en enero de 2022

Univ. Cantabria (2022), Portal de datos abiertos de la Universidad de Cantabria, España, https://web.unican.es/opendata/Paginas/Catalogo.aspx

Viejo Tardío, Jesús.,(2021), Chatbot para acceso y recuperación de datos abiertos gubernamentales, Universidad Autónoma de Madrid, Departamento de Ingeniería Informática, http://hdl.handle.net/10486/697823.

Yu, L., (2011), A Developer's Guide to the Semantic Web. Springer

 ISSN en trámite

# Implementación del Método Basado en Umbrales en Arduino 33 BLE para la Detección de Caídas en Adultos Mayores

Angel Israel Daza-Castillo, Javier Ortiz-Hernández, María Yasmín Hernández Pérez, Hugo Estrada-Esquivel
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico/CENIDET, Cuernavaca, México
(m21ce007, javier.oh, yasmin.hp, hugo.ee)@cenidet.tecnm.mx

**Resumen:** Aproximadamente el 30% de los adultos mayores sufren una caída por lo menos una vez al año y el 50% de esa cantidad sufrirá dos caídas. Asimismo, la cantidad de caídas que puede sufrir un adulto mayor se eleva al aumentar la edad. Las caídas tienen un alto índice de morbimortalidad y se consideran un problema importante de salud pública. Se estima que un 7% de las visitas de los adultos mayores al hospital son consecuencia de alguna caída y de estas el 40% necesitan de una hospitalización. En este artículo se presenta el paquete de pruebas unitarias que se realizaron para asegurar la correcta implementación del método basado en umbrales en la placa Arduino 33 BLE para un sistema de detección de caídas en adultos mayores, además de los dos tipos de sistemas para la detección de caídas. Todo esto con la finalidad de desarrollar un dispositivo vestible para detectar caídas.

*Palabras clave:* Caídas de adultos mayores, Implementación del método de umbrales para la detección de caídas, Adultos mayores

## 1. INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define una caída como un acontecimiento involuntario que le provoca a una persona perder el equilibrio y golpear el suelo u otra superficie que lo detenga (E. R. Durán, 2017).
*"El envejecimiento acelerado de la población ha provocado que se genere un nuevo problema de salud pública: las caídas de personas de la tercera edad"* (Gómez-Conesa, 2008). Se estima que durante un año suceden en el mundo aproximadamente 37.3 millones de caídas en adultos mayores, provocando en muchos casos lesiones graves en las personas que las sufrieron (J. R. Silva-Fhon, 2019).
Estudios epidemiológicos señalan que una de cada tres personas mayores de 65 años sufre al menos una caída al año y la mitad de estas personas sufre más de una (F. Varas-Fabra, 2006). En los Estados Unidos tres cuartas partes de las muertes causadas por caídas ocurren en los adultos mayores de 65 años o más (Josephson, 2002).
La incidencia y la gravedad de los daños provocados por las caídas aumentan de acuerdo con la edad, ya que con la edad se ve afectado el equilibrio y la reacción de las personas de la tercera edad (al., 2014). Las consecuencias provocadas por las caídas pueden ser físicas y psicológicas. Las consecuencias físicas más comunes son inflamaciones provocadas por el golpe y las fracturas representan un 6% del total de las caídas. Mientras que las consecuencias psicológicas más comunes son la pérdida de la confianza en sí mismo y el miedo o ansiedad a sufrir de nuevo una caída (F. Varas-Fabra, 2006).
A partir de los 65 años las personas son más propensas a sufrir caídas. Por cuestiones de la edad pueden aparecer diversas enfermedades crónicas y/o degenerativas como lo son los problemas cardiovasculares, trastornos del sistema nervioso y la osteoporosis las cuales pueden influir en la dificultad para caminar, pérdida de equilibrio y movimiento (Josephson, 2002), (Dahily, 2011).
Varios estudios han demostrado que los adultos mayores que consumen tres medicamentos o más, tienen mayor probabilidad de sufrir caídas (J. R. Silva-Fhon, 2019), (F. Varas-Fabra, 2006). Los medicamentos que elevan la probabilidad de sufrir una caída en las personas de la tercera edad son los siguientes: drogas psicotrópicas, sedantes, hipnóticos, antidepresivos, benzodiacepinas y neurolépticos (Josephson, 2002), (Dahily, 2011).

Se han detectado una gran variedad de factores extrínsecos e intrínsecos que se han asociado a las caídas que sufre este grupo de la población. Los factores extrínsecos más comunes son los relacionados con el ambiente del hogar y los intrínsecos detectados son: las discapacidades, enfermedades crónicas agudizadas, caídas previas, cambios del cuerpo provocados por la edad y la medicación múltiple. La presencia de dos o más de estos factores incrementa la probabilidad de que ocurra una caída (S. P. De, 2002).
En México residen 15.4 millones de personas mayores de 60 años, de las cuales 7.4 millones viven solas. El 41.4% son económicamente activos, mientras que el 69.4 sufre de alguna discapacidad (E. Nacional and N. Unidas, 2020).

## 2. SISTEMAS PARA LA DETECCIÓN DE CAÍDAS

En (A. I. Daza Castillo, 2021) se menciona que existen dos sistemas para la detección de caídas, el primero es el sistema de detección de caídas basado en monitoreo ambiental y el segundo es el sistema de detección de caídas basado en dispositivos vestibles. Cada uno cuenta con sus ventajas con respecto al otro.

### *2.1 Sistemas de detección de caídas basados en monitoreo ambiental*

Esta categoría incluye los sistemas que utilizan sensores instalados en el entorno de los adultos mayores, los cuales se encargan del monitoreo de las actividades que realizan en su vida diaria. La detección se basa generalmente en sensores infrarrojos y en cámaras para el monitoreo (L. Tong, 2009).

Ventajas:

- La persona no porta ningún tipo de dispositivo de detección de caídas, puede que incluso no se entere que está siendo monitoreada.
- Los dispositivos instalados se alimentan de manera continua, no dependen de baterías.

Desventajas

- Los muebles del lugar, personas u otros objetos pueden afectar la detección de la caída.
- Puede ser necesario instalar diversas tecnologías para evitar puntos ciegos dentro de cada una de las habitaciones.
- Costo elevado de implementación.

 ISSN en trámite

*2.2 Sistemas de detección de caídas basados en dispositivos vestibles*

En esta categoría están los sistemas que utilizan sensores integrados de un dispositivo que porta el adulto mayor, los cuales tienen un menor costo, no es necesario estar conectado a una corriente eléctrica y no requieren de un ambiente designado. Estos sistemas utilizan generalmente los sensores integrados en equipos móviles tales como Smartphones, pulseras inteligentes, dispositivos portables, etc. (L. Tong, 2009). En este estudio sólo se consideraron trabajos que utilizaron dispositivos con acelerómetros integrados de 2 y 3 ejes.

Ventajas:

- Se puede realizar el monitoreo en múltiples espacios, abiertos o cerrados.
- Monitoreo constante en diversos espacios.
- Un solo dispositivo de detección puede ofrecer un grado adecuado de precisión.
- Los muebles, personas u otros objetos no son un obstáculo para su funcionamiento.
- Pueden instalarse diversos tipos de sensores para el monitoreo

Desventajas:

- La autonomía del dispositivo depende del respaldo de la batería.
- El usuario debe de recordar colocarse el dispositivo correctamente.
- El usuario puede dañar el dispositivo voluntaria o involuntariamente impidiendo su funcionalidad.

## 3. MÉTODOS DE DETECCIÓN DE CAÍDAS BASADOS EN UMBRALES

Dentro de los sistemas de detección de caídas basados en dispositivos vestibles existe el método basado en umbrales. Este método utiliza límites o umbrales para detectar las distintas fases de la caída, generalmente los límites superiores, que al ser alcanzados o rebasados desencadenan acciones para analizar y verificar que ha sucedido una caída. En este trabajo utiliza este método debido a que se implementó dentro de un Arduino nano 33 BLE, el cual tiene la limitación de 1 MB de memoria de programa. De ahí que se toma este método basado en umbrales por su bajo consumo de recursos computacionales.

Ventajas:

- Bajo consumo de recursos computacionales.
- Utiliza cálculos aritméticos simples para realizar la detección de la caída (L. Tong, 2009).

Desventajas:

- Es difícil determinar el umbral que brinda mejores resultados.
- Una mala elección en los umbrales puede ocasionar que se presenten falsas detecciones de caídas.
- No existe un estándar para definir los umbrales.
- La mayoría de las investigaciones realizadas se han realizado en ambientes controlados (M. Vallejo, 2013).

En el trabajo "Desarrollo de una plataforma de monitoreo de caídas en domicilio para adultos mayores" (Toledo, 2020), se utiliza un algoritmo de detección de caídas basado en umbrales. El algoritmo implementado utiliza 3 umbrales distintos que son usados para realizar la detección de las 3 fases de la caída; caída libre, impacto y el reposo.

-El umbral 1 se utiliza para detectar la fase de caída libre. Durante esta fase se espera que se produzca una aceleración en el eje x similar a la aceleración de la gravedad, por lo que se define un valor de umbral 0.6 g donde g=9.82 m/s^2.

-El valor del umbral 2 se define en 1.5 g y se utiliza para detectar la fase de impacto en donde se realiza la suma de los tres vectores del acelerómetro (eje x + eje y + eje z). El resultado de la suma debe de superar el valor del umbral 2 para detectar que hubo una desaceleración del cuerpo al haber impactado. Después, se determina si se alcanza o se supera el valor del umbral en un tiempo de 2 segundos, si no se alcanza el valor se regresa a la fase anterior.

-El umbral 3 es el umbral de reposo, después de que se alcanza el umbral de la fase anterior se espera un tiempo de 2 segundos donde el eje x debe de permanecer con una aceleración dentro del rango del umbral 3, el rango es de -0.5g a 0.5g. Si en el tiempo establecido no se mantiene dentro del rango no se detecta la caída, si se mantiene dentro del rango se detecta la caída. En la **Figura 1** se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del algoritmo (Toledo, 2020).

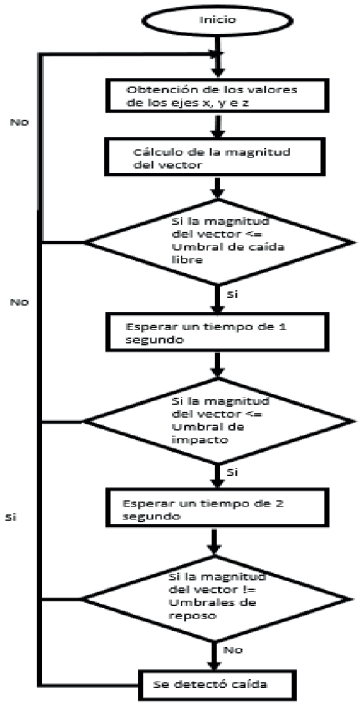



Figura 1. Diagrama de flujo del algoritmo.

## 4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO

*4.1 Entorno de desarrollo*

La implementación del algoritmo se desarrolló en la plataforma Arduino utilizando la placa Arduino nano 33 BLE. Este dispositivo fue seleccionado por las siguientes características que se adaptan al proyecto:

- Acelerómetro de tres ejes.
- Canal de comunicación BLE.
- CPU ARM® Cortex®-M4 de 32 bits que funciona a 64 MHz.

 ISSN en trámite

- 1MB de memoria de programa.
- Bajo consumo de energía de 3.3V para su funcionamiento.
- Tamaño de 4.5cm, 1.8cm y un peso de 5 gr.
- 14 pines digitales de salida y entrada.

*4.1.1 Adquisición-procesamiento de datos*

Para la adquisición y procesamiento de los datos en el Arduino es necesario tomar en consideración los siguientes puntos.

- La función loop es un ciclo o bucle infinito y es la función principal donde corre el programa de la placa de Arduino.
- En la función loop se declaran y se leen las variables que almacenan los datos de los sensores.

Para utilizar los datos de los sensores en un monitoreo constante es necesario considerar que la lectura se hace una vez donde se declara o lee su variable y es necesario esperar a que se realice todo el programa y comience de nuevo el loop hasta llegar de nuevo a la variable donde se lee los datos del sensor, como lo muestra el diagrama de la **Figura 2.**

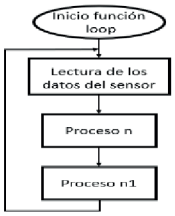



Figura 2. Lectura de los datos.

Una solución para utilizar el algoritmo basado en umbrales con comparadores lógicos en forma anidada fue leer nuevamente los datos dentro de los procesos del comparador lógicos, pero esto genera problemas en la pérdida de datos, ya que se intenta acceder a los datos del sensor al mismo tiempo. De modo que se hace la lectura de los datos donde se ocupen antes del proceso.

Como se observa en la **Figura 2,** la adquisición de los datos se genera solo una vez cuando se invoca la variable, pero para este tipo de algoritmo basado en umbrales es necesario que pase por diferentes etapas y cada una necesita estar leyendo los datos sin esperar a que el loop genere un nuevo ciclo, por lo que es necesario dividirlo en cuatro etapas: Lectura de los datos que se repiten antes de cada etapa posterior, caída libre, impacto y el reposo, donde cada una hace la invocación de la variable que lee los datos.

*Etapa 1 Adquisición de los datos*

El algoritmo de detección de caídas basado en umbrales utiliza los datos de la aceleración obtenidos por el acelerómetro triaxial que viene integrado en el Arduino 33 BLE. Los datos se obtienen utilizando la librería de Unidad de Medida Inercial (IMU, por sus siglas en inglés), los datos que son recopilados por la librería son utilizados para calcular la magnitud del vector utilizando la siguiente ecuación:

$$VM(Aceleración\ en\ g) = \sqrt{(\ Eje\ x^2 + Eje\ y^2 + Eje\ z^2)} \quad (1)$$

Esta fórmula devuelve un solo valor que es una fuerza g. Donde 1g = 9.81 es la aceleración de la gravedad de la tierra

La aceleración de la magnitud del vector es utilizada para detectar cada una de las fases que toma en cuenta el algoritmo para detectar la caída. Se utiliza la magnitud del vector en las etapas siguientes.

*Etapa 2 Caída libre*

En esta etapa se ejecuta la etapa 1 y el valor resultante se compara con el umbral de Caída libre. En este proyecto el umbral de caída libre es 0.31g, que es el valor promedio que se obtiene de las caídas libres en el trabajo [11] después de la experimentación.

*Etapa 3 Impacto*

De acuerdo al trabajo [11], en esta etapa se utiliza el umbral de impacto 4g. Para esta etapa es necesario realizar la etapa 1 adquisición de los datos y compararla con el umbral de impacto definido, además se verifica que se haya entrado a la etapa 2 de caída libre.

*Etapa 4 Reposo*

En esta etapa se ejecuta la etapa 1 y el valor resultante se compara con los umbrales del rango del Reposo. En este proyecto son 0.95 y 1.03 g, que son los valores promedio que obtienen del reposo en el trabajo [11] después de la experimentación, además se verifica que se haya entrado a la etapa 3 impacto.

*4.2 Diseño de la programación*

En esta sección se utiliza el diagrama de actividades utilizando el Lenguaje Unificado de Modelado (UML, por sus siglas en inglés) y sirve para observar los procesos de un sistema.

*4.2.1 Diagrama de actividad*

Este diagrama muestra la implementación del algoritmo basado en umbrales. Se divide en cuatro etapas como se muestra en la **Figura 3**.

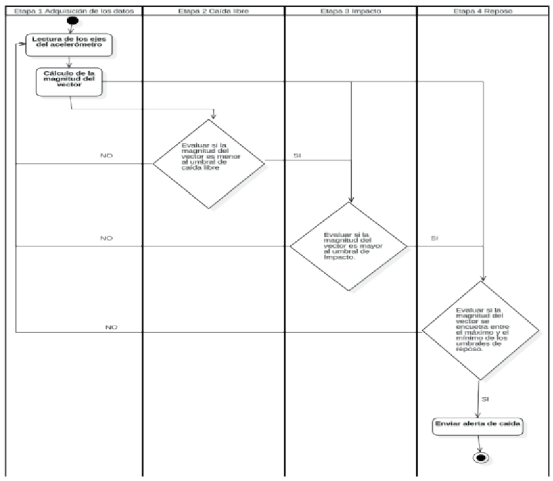



Figura 3. Diagrama de actividades.

*4.3 Pruebas unitarias*

Las pruebas unitarias se llaman así porque descomponen el sistema en módulos que puedan probarse de manera individual, sin dependencias de otros módulos y de personas, su principal objetivo es ver que se está realizando su correcto funcionamiento.

*Etapa 1 Obtención de datos y magnitud del vector*

La etapa 1 se dividió en dos fases: para la evaluación de la funcionalidad en la obtención de los datos de los ejes y el cálculo de la magnitud del vector.

- Fase 1 de la prueba unitaria: obtención de los datos de los ejes, se obtuvieron los datos del sensor en estado inmóvil, posteriormente

ISSN en trámite

se giró el sensor para observar el cambio de la aceleración en los ejes y por último se realizaron movimientos bruscos del sensor para ver los cambios en las aceleraciones de sus ejes.

- Fase 2 de la prueba unitaria: cálculo de la magnitud del vector, se introdujeron datos controlados de los ejes, con los cuales se corroboró de manera manual el resultado de cada operación de la ( 1).

*Etapa 2 Caída libre*

Las pruebas unitarias que se aplicaron para esta etapa evaluaron la etapa de caída libre, la cual consiste en colocar un valor a la magnitud del vector y observar si es más pequeño que el umbral de caída libre establecido. Si es así, debe mostrarse un mensaje indicando que se detectó la etapa de caída libre, además de checar que se haga un cambio de estado para indicar que entró a esta etapa.

*Etapa 3 Impacto*

Las pruebas unitarias que se aplicaron para esta etapa fueron evaluar la etapa de impacto y que antes se haya entrado a la etapa de caída libre.

- Primera prueba: se colocó un valor a la magnitud del vector de 4.1 y se compara con el valor del umbral impacto de 4, si es mayor la magnitud del vector y además la bandera de caída libre es verdadera.
  - Mostrar un mensaje indicando que se ha detectado la etapa de impacto y se coloca la bandera de impacto en verdadero.
- Segunda prueba: se colocó un valor a la magnitud del vector de 3.9 y se compara con el valor del umbral impacto de 4, si es menor la magnitud del vector y además la bandera de caída libre es verdadera.
  - No se debe de hacer nada.
- Tercera prueba: se colocó un valor a la magnitud del vector de 4.5 y se compara con el valor del umbral impacto de 4, si es mayor la magnitud del vector y además la bandera de caída libre es falsa.
  - No se debe de hacer nada.

*Etapa 4 Reposo*

Las pruebas unitarias que se aplicaron para esta etapa fueron evaluar la etapa de reposo y que previamente se haya entrado a las etapas de caída libre e impacto.

- Primera prueba: se colocó un valor a la magnitud del vector de 0.98 y se compara que este en el rango de los valores de los umbrales de reposo que son el mínimo de 0.95 y el máximo de 1.03 de 4, si se encuentra en ese rango la magnitud del vector y además las banderas de caída libre e impacto son verdaderas.
  - Mostrar un mensaje indicando que se ha detectado la etapa de reposo y que se detectó una caída.
- Segunda prueba: se colocó un valor a la magnitud del vector de 1.2 y se compara que este en el rango de los valores de los umbrales de reposo que son el mínimo de 0.95 y el máximo de 1.03 de 4, si no se encuentra en ese rango la magnitud del vector y además las banderas de caída libre e impacto son verdaderas.
  - No se debe de hacer nada.
- Tercera prueba: se colocó un valor a la magnitud del vector de 1 y se compara que este en el rango de los valores de los umbrales de reposo que son el mínimo de 0.95 y el máximo de 1.03 de 4, si se encuentra en ese rango la magnitud del vector y además las banderas de caída libre e impacto son falsas cual sea de las dos.
  - No se debe de hacer nada.

*4.4 Resultados de las pruebas unitarias*

Este punto muestra los resultados de las pruebas unitarias aplicadas en el punto 4.3.

*Etapa 1 Obtención de datos y magnitud del vector*

Esta etapa se divide en dos fases para la evaluación de la funcionalidad en la captura de los datos y el cálculo de la magnitud del vector.

- Fase 1 se aplicó las pruebas del sensor inmóvil, cambio de orientación y con movimientos bruscos. La **Figura 4** muestra las pruebas del sensor inmóvil.

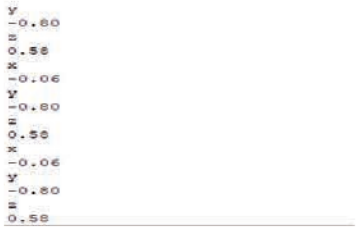



Figura 4. Fase 1: Sensor estático.

La **Figura 5** muestra las pruebas del sensor en el cambio de la orientación de sus ejes, para observar el cambio de sus valores.

Figura 5. Fase 1: Cambio de orientación.

La **Figura 6** muestra las pruebas del sensor con movimientos bruscos, con la finalidad de observar la sensibilidad del sensor.

Figura 6. Fase 1: Movimientos bruscos.

- Fase 2 se aplicaron pruebas unitarias de la fórmula de la magnitud del vector. En la **Figura 7 y 8** muestra los resultados al introducir los valores en los ejes en x=-0.06, y=-0.80 y z=0.58, con ellos se realiza el cálculo de la magnitud del vector con la **Fórmula 1**. Como resultado se obtiene el valor de la magnitud del vector, que para esta prueba es correcto.

 ISSN en trámite

```
x=-0.06;
y=-0.80;
z=0.58;
Serial.println("Valores colocado
Serial.println("x");
Serial.println(x);
Serial.println("y");
Serial.println(y);
Serial.println("z");
Serial.println(z);
x = pow(x, 2);
y = pow(y, 2);
z = pow(z, 2); //Pasarlos a posi
vector = sqrt(x + y + z); // gen
Serial.println("Resultado ");
Serial.println(vector);
```

```
0.58
Resultado
0.99
Valores colocados
x
-0.06
y
-0.80
z
0.58
Resultado
0.99
Valores colocados
x
-0.06
```

Figura 7. Fase 2: Formula Valores introducidos 1.

```
x=0.03;
y=-0.04;
z=-1.01;
Serial.println("Valores colocado
Serial.println("x");
Serial.println(x);
Serial.println("y");
Serial.println(y);
Serial.println("z");
Serial.println(z);
x = pow(x, 2);
y = pow(y, 2);
z = pow(z, 2); //Pasarlos a posi
vector = sqrt(x + y + z); // gen
Serial.println("Resultado ");
Serial.println(vector);
```

```
1.01
Resultado
1.01
Valores colocados
x
0.03
y
-0.04
z
-1.01
Resultado
1.01
Valores colocados
x
0.03
```

Figura 8. Fase 2: Formula valores introducidos .

*Etapa 2 Caída libre*

En esta etapa se realizan pruebas unitarias de caída libre. La **Figura 9** muestra el resultado de la prueba cuando la magnitud del vector es menor al valor del umbral de caída libre y de esta manera ver si se detecta esta etapa con una diferencia muy pequeña.

```
float vector = 0.30;
int banderaCaidaLibre = 0;
Serial.println("VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR");
Serial.println(vector);
if (vector <= UmbralCaidaLibre) {
  banderaCaidaLibre = 1;
}
if(banderaCaidaLibre==1){
  Serial.println("Entro a la etapa Caida libre");
  Serial.println(banderaCaidaLibre);
}else{
  Serial.println("No se entro a la etapa Caida libre");
  Serial.println(banderaCaidaLibre);
}
```

```
1
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
0.30
Entro a la etapa Caida libre
1
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
0.30
Entro a la etapa Caida libre
1
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
0.30
Entro a la etapa Caida libre
1
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
0.30
```

Figura 9. Caída libre valor de la magnitud del vector menor al umbral.

La **Figura 10** muestra el resultado de la prueba cuando la magnitud del vector es más grande que el valor del umbral de caída libre, con el fin de observar que no se detecte esta etapa.

```
float vector = 0.32;
int banderaCaidaLibre = 0;
Serial.println("VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR");
Serial.println(vector);
if (vector <= UmbralCaidaLibre) {
  banderaCaidaLibre = 1;
}
if(banderaCaidaLibre==1){
  Serial.println("Entro a la etapa Caida libre");
  Serial.println(banderaCaidaLibre);
}else{
  Serial.println("No se entro a la etapa Caida libre");
  Serial.println(banderaCaidaLibre);
}
```

```
0.32
No se entro a la etapa Caida libre
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
0.32
No se entro a la etapa Caida libre
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
0.32
No se entro a la etapa Caida libre
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
0.32
No se entro a la etapa Caida libre
```

Figura 10. Caída libre valor de la magnitud del vector mayor al umbral.

*Etapa 3 Impacto*

En esta etapa se realizan pruebas unitarias del impacto. La **Figura 11** muestra el resultado de la prueba cuando la magnitud del vector sea mayor a el umbral de impacto y que además tenga la bandera de caída libre en verdadero.

```
float vector = 4.1;
int banderaImpacto = 0, estadoEtapa2 = 1;
Serial.println("VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR");
Serial.println(vector);
if (vector >= UmbralCaidaImpacto && estadoEtapa2 == 1)
  banderaImpacto = 1;
}
if (banderaImpacto == 1) {
  Serial.println("Entro a la etapa Impacto");
  Serial.println(banderaImpacto);
} else {
  Serial.println("No se entro a la etapa Impacto");
  Serial.println(banderaImpacto);
}
```

```
Entro a la etapa Impacto
1
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
4.10
Entro a la etapa Impacto
1
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
4.10
Entro a la etapa Impacto
1
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
4.10
Entro a la etapa Impacto
1
```

Figura 11. Impacto valor de la magnitud del vector mayor al umbral y a la bandera de la etapa 2 en verdadero.

La **Figura 12** muestra el resultado de la prueba cuando la magnitud del vector sea menor al umbral de impacto y que la bandera de la etapa de caída libre este en verdadero, con ello no debe de entrar a la etapa de impacto.

```
float vector = 3.9;
int banderaImpacto = 0, estadoEtapa2 = 1;
Serial.println("VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR");
Serial.println(vector);
if (vector >= UmbralCaidaImpacto && estadoEtapa2 == 1)
  banderaImpacto = 1;
}
if (banderaImpacto == 1) {
  Serial.println("Entro a la etapa Impacto");
  Serial.println(banderaImpacto);
} else {
  Serial.println("No se entro a la etapa Impacto");
  Serial.println(banderaImpacto);
}
```

```
No se entro a la etapa Impacto
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
3.90
No se entro a la etapa Impacto
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
3.90
No se entro a la etapa Impacto
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
3.90
No se entro a la etapa Impacto
0
```

Figura 12. Impacto valor de la magnitud del vector menor al umbral y a la bandera de la etapa 2 en verdadero

La **Figura 13** muestra el resultado de la prueba cuando la magnitud del vector sea mayor al umbral de impacto y que la bandera de la etapa de caída libre está en verdadero, con esto no se debe de entrar a la etapa de impacto

```
float vector = 4.5;
int banderaImpacto = 0, estadoEtapa2 = 0;
Serial.println("VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR");
Serial.println(vector);
if (vector >= UmbralCaidaImpacto && estadoEtapa2 == 1)
  banderaImpacto = 1;
}
if (banderaImpacto == 1) {
  Serial.println("Entro a la etapa Impacto");
  Serial.println(banderaImpacto);
} else {
  Serial.println("No se entro a la etapa Impacto");
  Serial.println(banderaImpacto);
}
```

```
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
4.50
No se entro a la etapa Impacto
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
4.50
No se entro a la etapa Impacto
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
4.50
No se entro a la etapa Impacto
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
4.50
```

Figura 13. Impacto valor de la magnitud del vector mayor al umbral y a la bandera de la etapa 2 en falso

*Etapa 4 Reposo*

En esta etapa se realizan pruebas unitarias de la etapa de reposo. La **Figura 14** muestra el resultado de la prueba cuando la magnitud del vector está entre el mínimo y máximo de los valores de los umbrales de reposo y que ambas banderas de impacto y caída libre estén en verdadero.

```
float vector = 0.98;
int banderaReposo = 0, estadoEtapa3 = 1;
Serial.println("VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR");
Serial.println(vector);
if (vector >= UmbralReposoMinimo && vector <= UmbralRe
  banderaReposo = 1;
}
if (banderaReposo == 1) {
  Serial.println("Entro a la etapa Reposo");
  Serial.println(banderaReposo);
} else {
  Serial.println("No se entro a la etapa Reposo");
  Serial.println(banderaReposo);
}
```

```
1
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
0.98
Entro a la etapa Reposo
1
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
0.98
Entro a la etapa Reposo
1
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
0.98
Entro a la etapa Reposo
1
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
```

Figura 14. Valor de la magnitud del vector entre los umbrales de reposo y las banderas de la etapa 2 y 3 en verdadero

La **Figura 15** muestra el resultado de la prueba cuando la magnitud del vector está fuera del rango del mínimo y máximo de los valores de los

 ISSN en trámite

umbrales de reposo y que ambas banderas de impacto y caída libre estén en verdadero.

```
float vector = 1.2;
int banderaReposo = 0, estadoEtapa3 = 1;
Serial.println("VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR");
Serial.println(vector);
if (vector >= UmbralReposoMinimo && vector <= UmbralRe
  banderaReposo = 1;
}
if (banderaReposo == 1) {
  Serial.println("Entro a la etapa Reposo");
  Serial.println(banderaReposo);
} else {
  Serial.println("No se entro a la etapa Reposo");
  Serial.println(banderaReposo);
}
```

```
No se entro a la etapa Reposo
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOI
1.20
No se entro a la etapa Reposo
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOI
1.20
No se entro a la etapa Reposo
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOI
1.20
No se entro a la etapa Reposo
0
```

Figura 15. Valor de la magnitud del vector diferente a los umbrales de reposo y las banderas de la etapa 2 y 3 en verdadero

La **Figura 16** muestra el resultado de la prueba cuando la magnitud del vector está entre el mínimo y máximo de los valores de los umbrales de reposo y que cualquiera de las banderas de impacto y caída libre estén en falso.

```
float vector = 1;
int banderaReposo = 0, estadoEtapa3 = 0;
Serial.println("VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR");
Serial.println(vector);
if (vector >= UmbralReposoMinimo && vector <= UmbralRe
  banderaReposo = 1;
}
if (banderaReposo == 1) {
  Serial.println("Entro a la etapa Reposo");
  Serial.println(banderaReposo);
} else {
  Serial.println("No se entro a la etapa Reposo");
  Serial.println(banderaReposo);
}
```

```
No se entro a la etapa Reposo
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
1.00
No se entro a la etapa Reposo
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
1.00
No se entro a la etapa Reposo
0
VALOR DE LA MAGNITUD DEL VECTOR
1.00
No se entro a la etapa Reposo
0
```

Figura 16. Valor de la magnitud del vector entre los umbrales de reposo y las banderas de la etapa 2 y 3 en falso

## 5. TRABAJOS EN CURSO

Queda pendiente realizar las pruebas de integración utilizando un dispositivo Smartphone bajo Android para recibir la notificación de caída y su re-envío SMS a un dispositivo a una tercera persona, la cual puede ser un familiar o el cuidador del adulto mayor.

### *5.1 Escenarios de pruebas del sistema*

Se planea aplicar diversas pruebas al sistema completo para evaluar su funcionalidad y rendimiento en ambientes controlados y no controlados, para esto la experimentación se dividirá en cuatro fases.

- Fase 1- Evaluación del diseño del dispositivo
- Fase 2- Evaluación de la funcionalidad del sistema
- Fase 3- Evaluación del desempeño del dispositivo con personas jóvenes y sanas en un ambiente controlado, en el cual se pueda simular la caída de un adulto mayor y actividades.
- Fase 4- Evaluación del desempeño del dispositivo con adultos mayores en un ambiente controlado con ciertas habilidades y en ambientes no controlados.

## 6. CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra las complicaciones que existen al implementar un algoritmo por etapas utilizando sensores dentro de la placa Arduino nano 33 BLE, las cuales son la lectura de los datos para evaluar cada etapa y la limitación de los recursos computacionales de la placa.

Para este sensor se puede generar los datos en dos medidas en Metros/Segundos (M/S) y en g, para este proyecto se utilizó en g.

Para la implementación del algoritmo fue necesario considerar la limitación de los recursos computacionales del Arduino nano 33 BLE, por ello la programación del algoritmo se generó con la menor cantidad de líneas de código, ya que el tiempo para este trabajo es indispensable y debe realizarse la detección de la caída en el menor tiempo posible.

Las pruebas unitarias demuestran que el programa funciona, sin embargo, hay que considerar que los sensores tienen fallas y no siempre son controlables. En estas pruebas no se encontró un inconveniente, con el programa, se observó que con una mínima diferencia si es detectada, en cualquier etapa.

Los datos utilizados para las pruebas unitarias fueron lo más cercano a los umbrales definidos para medir si una pequeña diferencia era suficiente para detectar o no las etapas del programa.

## 7. REFERENCIAS

A. I. Daza Castillo, M. E. V. J. O. H. J. A. M. R. Y. H. y. A. M. R., 2021. Clasificación de métodos y algoritmos para la detección de caídas en adultos mayores. *7 Jornada de ciencia y tecnología aplicada.*

al., P. K. e., 2014. Fall-Induced Injuries and Deaths Among Older Adults. 281(20), pp. 1895-1899.

Dahily, A. Z. a. G., 2011. Aspectos sociodemográficos de las caídas en ancianos atendidos por un Grupo Básico de Trabajo. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical,* 44(8), p. 51.

E. Nacional and N. Unidas, 2020. *Comunicado de Prensa Núm. 337 / 19 10 De Julio de 2019 'Estadísticas a Propósito Del ... Día Mundial De La Población (11 De Julio).* [En línea] Available at: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2020/Poblacion2020_Nal.pdf [Último acceso: 12 09 2022].

E. R. Durán, G. F. R. C. a. E. H. M.-E., 2017. Incidencia y características de las caídas en un hospital de cuidados intermedios de Barcelona. *Gerokomos,* 28(2), pp. 78-82.

F. Varas-Fabra, E. C. M. L. Á. P. D. T. M. J. F. F. R. R. M. a. I. E. B., 2006. Caídas en ancianos de la comunidad: Prevalencia, consecuencias y factores asociados. *Atención Primaria,* 38(8), pp. 450-455.

Gómez-Conesa, Z. A. d. S.-G. a. A., 2008. Factores de riesgo de caídas en ancianos: revisión sistemática Risk factors for falls in the elderly. *Rev Saúde Pública,* 42(5), pp. 946-956.

J. R. Silva-Fhon, R. P.-R. K. M. a. W. F.-N., 2019. Causas y factores asociados a las caídas del adulto mayor Causes and factors associated to falls among the Elder Causas e fatores associados aquedas no idoso. *Enfermería Universitaria,* 16(1).

Josephson, L. Z. R. a. K. R., 2002. The epidemiology of falls and syncope. *Clinics in Geriatric Medicine,* 18(2), pp. 141-158.

L. Tong, W. C. Q. S. a. Y. G., 2009. A research on automatic human fall detection method based on wearable inertial force information acquisition system. *International Conference on Robotics and Biomimetics, Dec.*

M. Vallejo, C. v. I. a. J. D. L., 2013. Artificial Neural Networks as an alternative to traditional fall detection methods. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society,* Volumen 1, pp. 1648-1651.

S. P. De, S. H. A. M. G. R. G. O. a. R. M., 2002. Caídas en el adulto mayor. Factores intrínsecos y extrínsecos. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social,* 40(6), pp. 489-493.

Toledo, S. C. A. M., 2020. Desarrollo de una plataforma de monitoreo de caídas en domicilio para adultos mayores.

 ISSN en trámite

# Estimación de biomasa microalgal con procesamiento de imágenes digitales

**J. C. Martínez-Morgan** * **J. A. Fragoso-Mandujano** *
**H. R. Hernández-De León** * **Y. González Baldizón** *

* *Tecnológico Nacional de México/ I.T Tuxtla Gutiérrez, / Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Carretera Panamericana KM. 1080, 29050 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Mexico. (e-mail: D01270526@tuxtla.tecnm.mx).*

**Abstract:**
Este trabajo propone la estimación de la biomasa producida, a partir del monitoreo del cultivo de la microalga *Verrucudesmus verrucosus*. Las imágenes de cada muestra obtenida durante las cinéticas de crecimiento se analizaron mediante procesamiento digital de imágenes con modelos RGB, el cual es considerado un método efectivo y preciso. Los resultados fueron validados con las estadísticas del error (*SSE*, $r^2$, $r^2$ ajustado y RMSE)para los valores estimados en RGB.

*Keywords:* Biomasa, Microalgas, Estimación, Imágenes, Cuantificación.

## 1. INTRODUCCIÓN

El consumo de materiales no renovables como fuente principal de energía en los sistemas productivos de la sociedad actual, está destinada a desaparecer. Los yacimientos actuales de combustibles fósiles serán insuficientes para satisfacer la demanda energética, debido al crecimiento exponencial de la población, además de las consecuencias medioambientales de producir, transportar y procesar hidrocarburos para generar energía, que provocan un gran riesgo de daños a los ecosistemas (Gil García, 2014). Una alternativa al uso de los recursos fósiles es la producción de biomasa y su conversión en alimentos, y productos de base biológica, como bioplásticos, biocombustibles y bioenergía (Robert et al., 2020). La biomasa es generalmente clasificada según su diversidad biológica, fuente y origen, es decir, de productos vegetales y animales o de mezclas de plantas, animales y materiales manufacturados (Popp et al., 2021). Dentro de esta clasificación, la implementación de energías limpias basadas en fuentes vegetales presenta un gran potencial, destacando entre ellas los generación de biomasa a base de microalgas (Junior et al., 2020). La biomasa microalgal tiene la capacidad de acumular cantidades relativamente grandes de lípidos para la conversión de ésteres metílicos de ácidos grasos, lo que ha convertido a las microalgas en una alternativa deseable para la producción de biocombustibles (Vélez-Landa et al., 2021). Los estudios basados en microalgas se enfocan principalmente en la identificación de especies, selección de cepas, el análisis de los procesos que intervienen en el crecimiento del cultivo y la obtención de los productos finales como los biocombustibles (Havlik et al., 2013). El monitoreo de las fases de crecimiento de los cultivos de microalgas es esencial para la estimación precisa, simple y rápida de la producción de biomasa. Realizar el seguimiento adecuado ayudará a mejorar el rendimiento en los derivados de los cultivos.

Los métodos convencionales para estimar la concentración de biomasa son variados, generalmente se basan en mediciones en tiempo real y fuera de línea. Las mediciones fuera de línea son lentas e invasivas, debido a que se requiere extraer una muestra del medio de cultivo para analizarla posteriormente en el laboratorio, lo que dificulta el seguimiento y retrasa los periodos de medición (Lazcano-Hernández et al., 2019). Los métodos más utilizados para la cuantificación de la biomasa son el conteo celular a partir del uso de cámaras de Neubauer (Giraldo-Zuluaga et al., 2018) y la estimación por peso seco, donde el peso directo de la biomasa en una muestra de cultivo es más confiable al disponer de una cantidad relativamente grande de muestras. La aproximación por densidad óptica es las más utilizada para medir distintas variables biológicas como la concentración de masa celular, la absorbancia, la turbidez o la fluorescencia de la suspensión del cultivo (Jia et al., 2015). No obstante, la medición de la densidad óptica puede introducir imprecisiones al estimar la concentración de biomasa cuando las células cambian su morfología y composición, es decir, sus propiedades ópticas (Zainal Alam et al., 2018). Por lo tanto, es recomendable medir densidad óptica cuando la producción de biomasa microalgal se encuentre en bajas concentraciones (Lu et al., 2017). Considerando que es posible utilizar cualquiera de los métodos mencionados en cultivos de microalgas, la presencia de pigmentos fotosintéticos requiere del establecimiento de nuevas técnicas para la medición de la biomasa microalgal. La

 ISSN en trámite

composición de pigmentos fotosintéticos en microalgas determina la variación de color y representa un potencial significativo para la evaluación de biomasa mediante análisis de color (Barsanti et al., 2021). Para utilizar el análisis de imágenes como instrumento de medición de la concentración de biomasa en diferentes muestras de microalgas, las imágenes rojo-verde-azul (RGB) tomadas de las muestras se procesan encontrando una correlación con la concentración de biomasa (Salgueiro et al., 2022). La visión artificial es una tecnología cada vez más popular de alta precisión durante la última década, debido a los rápidos avances en el campo del aprendizaje automático (Austerjost et al., 2021). El reconocimiento de imágenes en la detección de cambios de color en el bioproceso usando microalgas en un fotobiorreactor, incrementa la biomasa y reduce costos de cultivo (Kohno et al., 2017).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se desarrolló llevando a cabo los procedimientos para la obtención de biomasa microalgal durante las cinéticas de crecimiento, con los métodos analíticos conocidos (peso seco, cuantificación de pigmentos totales). Estos procedimientos son necesarios para obtener los parámetros de las variables características del sistema.

### *2.1 Cinéticas de crecimiento*

La cepa utilizada corresponde a la microalga *Verrucudesmus verrucosus*, proporcionada por el laboratorio de Bioprocesos del Tecnológico Nacional de México, Campus Tuxtla Gutiérrez. El inóculo se realizó en frascos de cristal graduados de 1 L con el medio Blue Green 11 (BG-11) para realizar la cinética de crecimiento. El volumen de los inóculos empleados fue del 10% del volumen total de operación del fotobiorreactor, (225 mL) utilizando una concentración de $1 \times 10^6$ cel/mL$^{-1}$. Los inóculos se incubaron por 12 días con un fotoperíodo 12:12 (Luz:Oscuridad), a una exposición de 1000 lx.

### *2.2 Composición del medio de cultivo*

Las soluciones empleadas para la preparación del medio de cultivo Blue Green-11 (BG-11), se describen a continuación: 1.5 g/L$^{-1}$ ($NaNO_3$), 0.04 g/L$^{-1}$ ($K_2HPO_4$), 0.075 g/L$^{-1}$ $MgSO_4.7H_2O$), 0.036 g/L$^{-1}$ ($CaCl_2.2H_2O$) 0.006 g/L$^{-1}$ (Ácido citríco), 0.006 g/L$^{-1}$ (Citrato Férrico Amoniacal), 0.001 g/L$^{-1}$ ($EDTANa_2$), 0.002 g/L$^{-1}$ ($Na_2CO_3$), 0.002 86 g/L$^{-1}$ ($H_3BO_3$), 0.001 86 g/L$^{-1}$ ($MnCl_2.4H_2O$), 0.000 22 g/L$^{-1}$ ($ZnSO_4.7H_2O$), 0.000 39 g/L$^{-1}$ ($Na_2MoO_4.2H_2O$), 0.000 08 g/L$^{-1}$ ($CuSO_4.5H_2O$) 0.000 05 g/L$^{-1}$ ($Co(NO_3)_2.6H_2O$), pH ajustado a 7.

### *2.3 Concentración de biomasa*

Para cuantificar la concentración de biomasa se utilizó el procedimiento de peso seco. Con este fin se utilizaron membranas para filtración, de acetato de celulosa (0.46 µm) introducidas en un horno de secado para laboratorio por 24 horas a 75 °C, hasta lograr peso constante. Una vez retirados, se filtraron 3 mL de cultivo a través de las membranas, utilizando una bomba de vacío conectada a un equipo de filtrado para laboratorio. Posteriormente, la muestra de biomasa retenida en el filtro se introdujo en un horno de secado para laboratorio por 24 horas a 75 °C, llevándola a peso constante. El total de biomasa se calcula en (Ec. 1).

$$\text{Biomasa} = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial}}{\text{Volumen de la muestra}} \tag{1}$$

### *2.4 Preparación de muestras*

El monitoreo del cultivo de microalgas se llevó a cabo mediante la extracción de una muestra con 2 mL del cultivo cada 48 horas. El líquido fue almacenado en tubos falcon de 15 mL y etiquetados acorde a la etapa de crecimiento de las microalgas durante toda la cinética (Fig. 1).

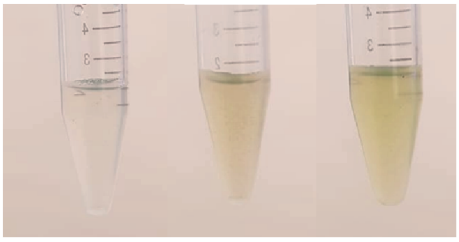


Fig. 1. Preparación de muestras para captura de imagénes.

### *2.5 Sistema de adquisición de imágenes*

El procesamiento de las imágenes se efectuó a partir del análisis de las muestras de biomasa extraídas del fotobiorreactor. Para ello se procedió a realizar los pasos descritos en la Fig. 2. Donde las imágenes son procesadas para obtener los niveles de gris en cada muestra.

*Recolección de datos* Para realizar la captura de imágenes, cada muestra se colocó en un soporte fijo, la captura de las imágenes se realizó con un fondo blanco sin brillo utilizando una cámara smartphone (Iphone) TrueDepth-12 megapíxeles con apertura f/1.6, 26 mm, píxeles de 1,7 micras, dual pixel PDAF y estabilización por desplazamiento (Fig. 3). El tamaño de las imágenes es de 8 bits por pixel.

*Procesamiento de imágenes* En el proceso de binarización se obtuvo una matriz tridimensional $T(x, y, t) \in \mathbb{R}^{mxnxp}$ a partir de la secuencia de fotogramas capturados. Todos los píxeles en cada imagen fueron promediados en grupos de datos (Ec. 3).

Al finalizar la captura de información se comenzó con el procesamiento de las imágenes. El primer paso, dada la matriz de tres dimensiones donde cada dimensión de

 ISSN en trámite

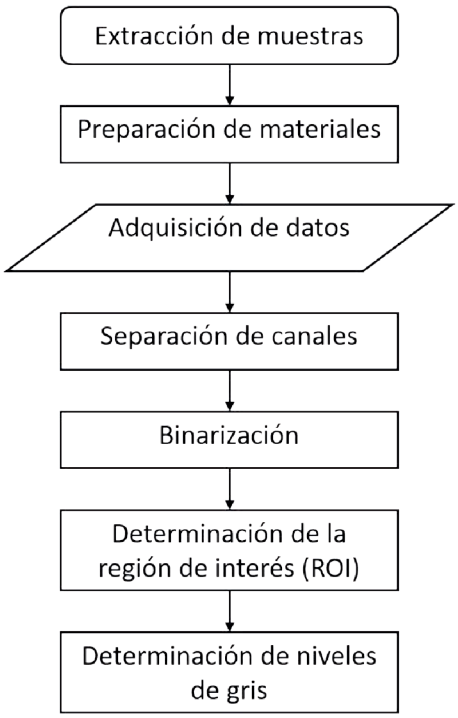



Fig. 2. Preparación de muestras para captura de imagénes.

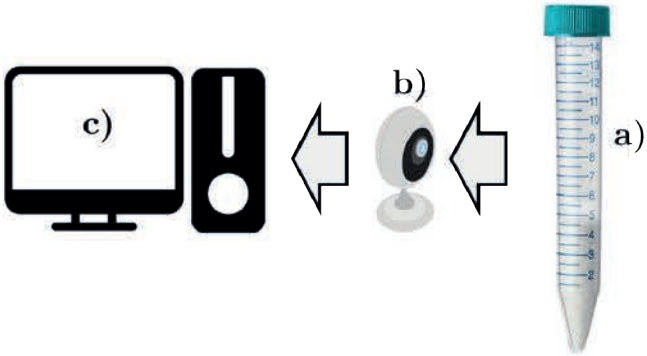



Fig. 3. Adquisición de imágenes utilizando muestras de cultivo: a) Muestra, b) Cámara digital, c) Almacenamiento y análisis de datos

la matriz m, n, p representa cada uno de los canales R G B respectivamente, que le dan color a la imagen. Se extrajo cada uno de los canales por separado, dando como resultado tres imágenes en escala de grises, donde cada uno de estos canales resalta colores específicos de la escena. Teóricamente, el canal que corresponde al verde (canal G) ser el que aporte la mayor utilidad para el análisis de datos. Cada una de las imágenes procesadas es una muestra representativa del contenido de biomasa en el tiempo ($t$), donde la muestra fue tomada. Dada la Ecuación 2 donde el nivel de umbral es, umbral = 200. El valor promedio de la escala de grises en el contorno de las muestras fue diez. Esto facilitó la identificación de los bordes utilizados para la binarización y extracción de datos. Cada producto se debe calibrar utilizando ese parámetro.

$$q(x,y) = \begin{cases} 0 & to \quad P(x,y,t_{max}) \leq threshold \\ 1 & to \quad P(x,y,t_{max}) > threshold \end{cases} \tag{2}$$

La segmentación de imágenes por binarización simplifica el algoritmo, mejora la velocidad de ejecución, así como el costo computacional, también disminuye el ruido de medición en la imagen. La extracción de la región de interés (ROI) permite identificar objetos o áreas esenciales en la imagen.

$$\bar{a_k} = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^{x} \sum_{j=1}^{y} T_{i,j}, \text{ For } k = 1, 2, 3, 4, ..., t \tag{3}$$

## 3. RESULTADOS

Las microalgas se reproducen por división celular, por lo cual presentan un crecimiento rápido cuando se inoculan en un medio de cultivo no limitante y se mantiene en condiciones adecuadas para producir biomasa, las condiciones varían según la edad del cultivo y la fase de crecimiento en la que se encuentre. Una característica notable es el cambio de tonalidad del medio de cultivo respecto al tiempo (Fig. 4), que es claramente distinguible de manera visual.

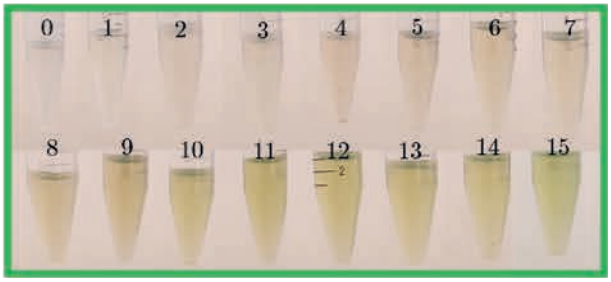



Fig. 4. Cambios de color en el medio de cultivo de microalgas

Los valores de RGB se realizaron con respecto a las mediciones de peso seco (P-S) de la microalga *Verrucudesmus verrucosus*. Se observa que, al procesar las imágenes en rojos y azules, la descomposición de los elementos se encuentra directamente correlacionado con las mediciones de P-S del cultivo de microalgas. Si la densidad de biomasa producida aumenta, entonces la descomposición de la imagen se reduce de manera gradual. La reducción de los colores Rojo, Verde y Azul, se presenta de manera uniforme, esto significa que representan adecuadamente el crecimiento de las microalgas, manteniéndose en valores bajos en la intensidad de color (entre 0 y 30).

Para el análisis del canal Rojo, las mediciones Se encuentran en un rango de 6 a 9 en escala de grises, considerándose un nivel bajo (Fig. 5).

 ISSN en trámite

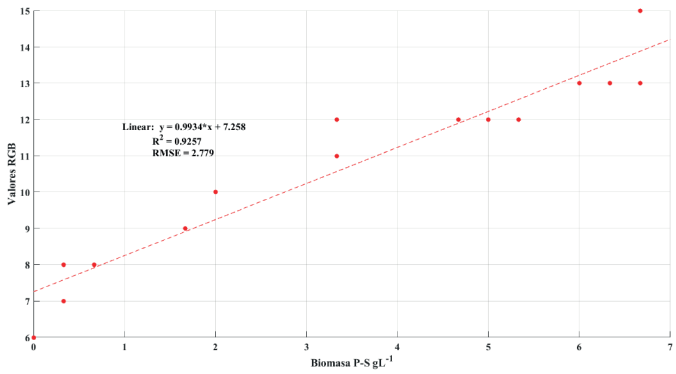



Fig. 5. Variaciones en la intensidad de la luz roja como valor RGB vs la biomasa producida por las muestras de la microalga *Verrucudesmus verrucosus*.

Para el análisis canal Verde, las mediciones Se encuentran en un rango de 0 a 29 en escala de grises, considerándose un nivel bajo (Fig. 6).

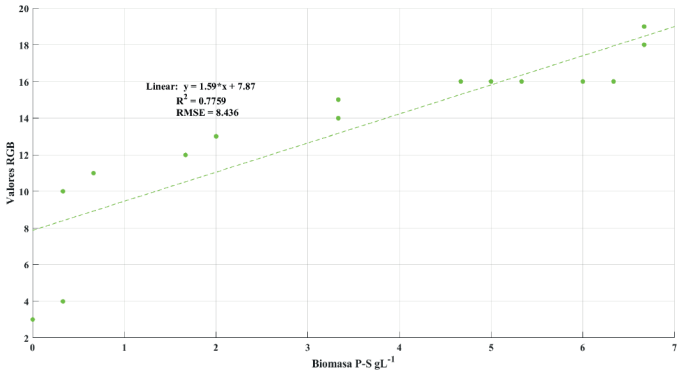



Fig. 6. Variaciones en la intensidad de la luz verde como valor RGB vs la biomasa producida por las muestras de la microalga *Verrucudesmus verrucosus*.

Las mediciones para el análisis canal Azul, se encuentran en un rango de 3 a 19 en escala de grises considerándose un nivel bajo (Fig. 7).

Table 1. Estadísticas de error para valores estimados en RGB

| Estadísticas | Canal Rojo | Canal Verde | Canal Azul |
|---|---|---|---|
| *SSE* | 7.721 | 71.17 | 119.4 |
| $r^2$ | 0.9257 | 0.7759 | 0.9191 |
| $r^2$ ajustado | 0.9207 | 0.7609 | 0.9137 |
| RMSE | 0.7175 | 2.178 | 2.821 |

Los coeficientes de determinación calculados a partir de los modelos de regresión, nos demuestran que las intensidades de color Rojo y Azul son altamente confiables, ya que se obtienen valores de 0.92 y 0.91 respectivamente. En el caso de la intensidad de color Verde presenta un coeficiente menor de 0.77, en comparación con las intensidades anteriores (Tabla. 1). Es decir, El coeficiente $r^2$ nos indica

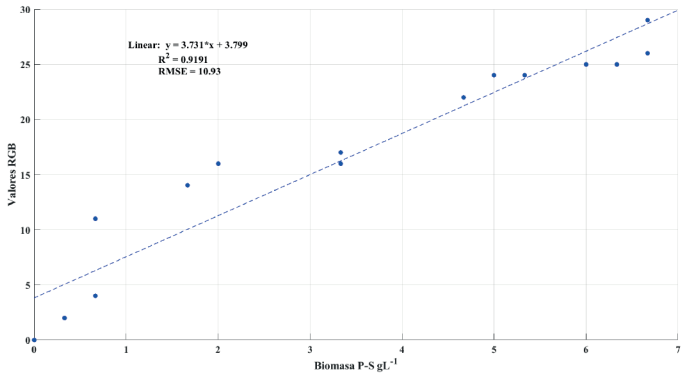



Fig. 7. Variaciones en la intensidad de la luz azul como valor RGB vs la biomasa producida por las muestras de la microalga *Verrucudesmus verrucosus*.

la confiabilidad de los cálculos al momento de representar el crecimiento de las microalgas para la producción de biomasa.

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un modelo en escala de grises para la estimación de la biomasa producida por la microalga *Verrucudesmus verrucosus* en el medio de cultivo BG-11. El análisis RGB resulta ser un método práctico de fácil operación, considerando que las variaciones en el color de los cultivos de microalgas demuestran las variaciones que ocurren en el sistema. También se determinó que existe una correlación adecuada entre la biomasa producida y los parámetros generados durante el procesamiento de las imágenes. El coeficiente de determinación calculado fue de $r^2 = 0.92$, lo que nos permite validar que el método es eficiente al aplicarlo en muestras de microalgas. La aplicación de imágenes digitales aportará una opción más en trabajos posteriores para estimar las cantidades de biomasa generadas durante las cinéticas de crecimiento de las microalgas.

## REFERENCES

Austerjost, J., Söldner, R., Edlund, C., Trygg, J., Pollard, D., and Sjögren, R. (2021). A machine vision approach for bioreactor foam sensing. *SLAS Technology*, 26. doi: 10.1177/24726303211008861.

Barsanti, L., Birindelli, L., and Gualtieri, P. (2021). Water monitoring by means of digital microscopy identification and classification of microalgae. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 23. doi: 10.1039/d1em00258a.

Gil García, G. (2014). La energía en cifras. *Perspectivas globales. México, Alfaomega Grupo Editor.*

Giraldo-Zuluaga, J.H., Salazar, A., Diez, G., Gomez, A., Martínez, T., Vargas, J.F., and Peñuela, M. (2018). Automatic identification of scenedesmus polymorphic microalgae from microscopic images. *Pattern Analysis and Applications*, 21(2), 601–612.

ISSN en trámite

Havlik, I., Lindner, P., Scheper, T., and Reardon, K.F. (2013). On-line monitoring of large cultivations of microalgae and cyanobacteria. *Trends in biotechnology*, 31(7), 406–414.

Jia, F., Kacira, M., and Ogden, K.L. (2015). Multi-wavelength based optical density sensor for autonomous monitoring of microalgae. *Sensors*, 15(9), 22234–22248.

Junior, W.G.M., Gorgich, M., Corrêa, P.S., Martins, A.A., Mata, T.M., and Caetano, N.S. (2020). Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing. *Aquaculture*, 528, 735562.

Kohno, A., Komatsu, T., Oka, S., Fukuda, H., Yasui, H., and Makino, H. (2017). Optimization of harvest time in microalgae cultivation using an image processing algorithm for color restoration. *NTT Technical Review*, 15.

Lazcano-Hernández, H.E., Aguilar, G., Dzul-Cetz, G.A., Patiño, R., and Arellano-Verdejo, J. (2019). Off-line and on-line optical monitoring of microalgal growth. *PeerJ*, 7, e7956.

Lu, L., Yang, G., Zhu, B., and Pan, K. (2017). A comparative study on three quantitating methods of microalgal biomass.

Popp, J., Kovács, S., Oláh, J., Divéki, Z., and Balázs, E. (2021). Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand. *New Biotechnology*, 60, 76–84. doi:10.1016/j.nbt.2020.10.004.

Robert, N., Giuntoli, J., Araujo, R., Avraamides, M., Balzi, E., Barredo, J.I., Baruth, B., Becker, W., Borzacchiello, M.T., Bulgheroni, C., et al. (2020). Development of a bioeconomy monitoring framework for the european union: An integrative and collaborative approach. *New biotechnology*, 59, 10–19.

Salgueiro, J., Pérez, L., Sanchez, Á., Cancela, Á., and Míguez, C. (2022). Microalgal biomass quantification from the non-invasive technique of image processing through red–green–blue (rgb) analysis. *Journal of Applied Phycology*, 34(2), 871–881.

Vélez-Landa, L., Hernández-De León, H.R., Pérez-Luna, Y.D.C., Velázquez-Trujillo, S., Moreira-Acosta, J., Berrones-Hernández, R., and Sánchez-Roque, Y. (2021). Influence of light intensity and photoperiod on the photoautotrophic growth and lipid content of the microalgae verrucodesmus verrucosus in a photobioreactor. *Sustainability*, 13(12), 6606.

Zainal Alam, M.N.H., Jaya Kumar, J., John Whyte, D., Doeven, E.H., and Kouzani, A. (2018). A portable sensor for cell optical density measurement in microfluidic chips. *Measurement and Control*, 51(7-8), 213–222.

 ISSN en trámite

# Comparativa de Algoritmos de Súper Resolución en Imágenes de Videovigilancia

**Rebecca Yuziel Zumaya Lanuza*. Andrea Magadán Salazar*, Daniela Moctezuma Ochoa****

*TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
{m21ce072, andrea.ms}@cenidet.tecnm.mx
**Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial.
dmoctezuma@centrogeo.edu.mx

**Resumen:** En este trabajo, se implementan y comparan cuatro algoritmos de súper resolución: EDSR, FSRNN, ESPCN y LapSRN utilizando imágenes en entornos de videovigilancia de baja calidad, con problemas de contraste e iluminación principalmente. El objetivo es conocer el nivel de mejoramiento que puede llegar a tener una imagen y conocer que algoritmo tiene un mayor nivel de mejora. Se realiza una evaluación cuantitativa mediante cuatro métricas tradicionales en el mejoramiento SSIM, NCC, NIQE y BIQI. Obteniendo como resultado que LapSRN es el algoritmo con un mejor nivel de mejora.

*Palabras clave:* Visión artificial, Videovigilancia, Súper resolución, Mejoramiento de imágenes

## 1. INTRODUCCIÓN

La seguridad es una condición indispensable para el bienestar de los seres humanos, es por ello que la sociedad busca medidas que sean capaces de prevenir e identificar a las personas que cometan atentados en contra de su seguridad. Una de estas medidas son los sistemas de videovigilancia, ya que, estos son sistemas que permiten ver imágenes de forma directa desde la comodidad del hogar o en espacios específicos a través de internet, utilizando una computadora o cualquier otro dispositivo móvil. Sin embargo, algunas limitantes que se pueden presentar son la baja resolución que algunos dispositivos poseen, los cambios en la intensidad luminosa como la claridad o la oscuridad de la imagen con la que se dificulta el reconocimiento de las personas.

El problema de baja resolución en una imagen se ve reflejado en el pobre contenido de la misma, en el ámbito de la videovigilancia esto impide identificar a las personas que cometen atentados, es por ello que se buscan técnicas que sean capaces de minimizar este problema, dando como resultado imágenes con una mejor calidad. Una de estas técnicas es la súper resolución, es por ello, que el objetivo de este artículo es obtener una visión sobre cuatro enfoques de súper resolución, evaluando sus resultados en cuanto a mejoras de imagen de videovigilancia de baja calidad con cuatro métricas como lo son: medida del índice de similitud estructural (SSIM), correlación cruzada normalizada (NCC), evaluación de la calidad de la imagen natural (NIQUE) e índice de calidad de imagen ciega (BIQI). El artículo se encuentra organizado como sigue, en la sección 1.1 se presenta una breve definición de la súper resolución, en la sección 2 se presenta un análisis de los trabajos relacionados con el tema que se está abordando, la sección 3 presenta la metodología que sigue cada uno de los algoritmos evaluados y la descripción de cada una de las métricas utilizadas. La sección 4 describe el dataset que se utiliza para la evaluación de los algoritmos; en la sección 5 se explica la fase de experimentación, y finalmente, en la sección 6 se encuentran las conclusiones.

### 1.1 Qué es la súper resolución

De acuerdo con (Leandro Hernández et al, 2020) la súper resolución es una técnica computacional utilizada para recuperar imágenes de alta resolución (HR) a partir de imágenes de baja resolución (LR). Es decir, a través de una imagen de baja calidad se busca aumentar su cantidad de píxeles con la finalidad de obtener mayor información de la imagen, dando como resultado una mejor calidad en alta resolución. Sus métodos se dividen en dos categorías: usar una sola imagen o varias imágenes. En el primer enfoque solo se obtiene una sola imagen capturada y se mejora a través del aprendizaje de la relación entre baja y alta resolución. El segundo enfoque considera varias imágenes de baja resolución del mismo objeto y genera una imagen de alta resolución a través de la combinación de baja y alta resolución.

Este trabajo sigue el primer enfoque; es decir, se centra en implementar cuatro técnicas de súper resolución sobre una sola imagen de baja calidad adquirida en un entorno de videovigilancia.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Súper resolución con imágenes no naturales

En trabajos como (Chen et al, 2018) y (Amiri et al, 2019) describen la problemática sobre la mejora de imágenes a través de súper resolución, ya que, diversos autores entrenan o aplican esta técnica con imágenes que, en un principio, son de alta resolución y posteriormente pasan por un proceso para convertirse en imágenes de baja resolución, lo que da resultados que no son certeros. Pocos trabajos como (Farooq et

 ISSN en trámite

al, 2021) utilizan imágenes que realmente son de baja resolución desde un principio. Por lo tanto, la comparación de las técnicas no es certera y los resultados son difíciles de comparar.

2.2 Súper resolución mediante redes neuronales

Existen algoritmos tradicionales de super resolución como interpolación bicúbica (Ruangsang et al 2017), lanczoz (Claude E. Duchon, 1979), entre otros. Actualmente, los algoritmos de súper resolución se están implementando bajo el enfoque de aprendizaje profundo debido a sus buenos resultados. Aunque, el uso de este enfoque debe considerar la gran demanda computacional para ejecutar estos algoritmos, el proceso de entrenamiento puede llegar a ser prolongado y la gran cantidad de imágenes necesarias para su entrenamiento. Por ello, se decidió utilizar modelos pre-entrenados, de esta forma se facilita y optimiza la forma de trabajo. Trabajos como (Alkanhal, L et al 2020) y (Amiri, M et al, 2019) utilizan estos modelos, sin necesidad de modificar o entrenar alguna red.

2.3 Mejora de imágenes de videovigilancia

En (Farooq et al, 2021) y (Alkanhal et al, 2020) describen como la videovigilancia, cada día, tiene más presencia en la vida real y a pesar del aumento de la calidad de las cámaras, aún presenta problemáticas debido a la complejidad del ambiente real, tales como mala iluminación o cambios de intensidad luminosa, ruido que esté presente en la imagen, bajo o alto contraste o incluso la compresión que sufren las imágenes al ser guardadas, oclusión de las personas, vistas muy amplias, etc., lo que provoca tener regiones pequeñas correspondientes a las personas, etc. Incluso, en algunas ocasiones son imágenes menores a 100 píxeles, lo que resulta aún más complejo para poder analizarlas. Otra dificultad es contar con conjunto de imágenes de videovigilancia real en ambientes no controlados.

La mejora de imágenes de videovigilancia es importante ya que, gracias a ella se puede mejorar las condiciones de la imagen, o definir una parte especifica de la misma, como, por ejemplo, localizar un objeto, una persona o una acción. Incluso puede ayudar a corregir el rostro de una persona para su reconocimiento.

2.4 Adquisición de bancos de imágenes públicos

Los bancos de imágenes de videovigilancia reales públicos son limitados, varias investigaciones trabajan con bancos de imágenes que simulan entornos de videovigilancia y, utilizan datasets como: 300W (300 Faces In the Wild) (C. Sagonas et al, 2016) donde lo crearon con la finalidad de resolver el primer desafío de detección automática de hitos faciales en la naturaleza, LFPW (Labeled Face Parts in the Wild) creado por (Peter N. et al, 2013), es un dataset que consiste en un conjunto de imágenes descargadas de la web con la finalidad de identificar y reconocer rostros, son imágenes con un tamaño aproximado de 100x100 píxeles descargadas de la web con problemáticas de rotación. CAVIAR4REID (Cheng et al, 2011) es un dataset extraído del conjunto original CAVIAR, tomando exclusivamente la sección de personas que se encuentran en un centro comercial de Lisboa, creado con la finalidad de evaluar algoritmos de reidentificación de personas, debido a su iluminación menos controlada y su enfoque tomado desde cámaras de videovigilancia.

## 3. ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

El sistema desarrollado evalúa cuatro técnicas de súper resolución, sobre la imagen de videovigilancia ingresada. Los resultados son evaluados en términos de cuatro métricas que analizan la calidad de la imagen.

Todas las técnicas fueron implementadas sin la necesidad de entrenar alguna red, únicamente se utilizaron modelos pre-entrenados para la mejora de las imágenes

3.1 EDSR

Enhanced Deep Residual Networks for Single Image Super-Resolution, presentado por (Lim et al, 2017). Esta red de súper resolución profunda, realizada con métodos de súper resolución actuales en el estado del arte como (Dong et al, 2014) y (Kim et al, 2016), es un algoritmo que trabaja bajo una sola imagen de entrada. Esta red obtiene una mejora significativa gracias a la optimización mediante la eliminación de módulos innecesarios en las redes residuales, también cuenta con 64 mapas de características para cada capa de convolución que tiene.

3.2 FSRCNN

Fast Super-Resolution Convolutional Neural Network, presentado por (Dong et al, 2016). Esta red fue creada con el objetivo de reducir el coste computacional y optimizar la red existente SRCNN. Esta red consiste en una capa de convolución, posteriormente un mapeo que se aprende directamente a partir de una imagen original de baja resolución; su última capa es una capa de desconvolución, que muestra y agrega características anteriores con un conjunto de filtros y da como resultado una imagen de salida de alta resolución. Esto genera imágenes con súper-resolución de una forma más rápida. También es un algoritmo que trabaja con una sola imagen de entrada.

Esta técnica fue implementada sin la necesidad de entrenar la red, únicamente se utilizó un modelo pre-entrenado previamente para la mejora de las imágenes.

3.3 ESPCN

Efficient Sub-Pixel Convolutional Neural Network, presentado por (Wanzhe et al, 2016). Es la primera red neuronal convolucional capaz de realizar súper-resolución en tiempo real de vídeos de 1080p. Una eficiente capa de convolución sub-píxel fue introducida para que aprenda una serie de filtros de escalado para los mapas de características en la salida de las imágenes mejoradas. Utiliza una operación de reducción de

 ISSN en trámite

escala que es determinista y produce una imagen de baja resolución para, posteriormente, generar una imagen de alta resolución. Este algoritmo es capaz de trabajar con una sola imagen de entrada o múltiples imágenes.

3.4 LapSRN

Laplacian Pyramid Networks for Fast and Accurate Super-Resolution presentado por (Lai et al, 2018). Esta es una red convolucional de súper-resolución de pirámide laplaciana profunda, rápida y precisa de imágenes. La red reconstruye progresivamente los residuos de sub-bandas de imágenes de alta resolución en múltiples niveles de la pirámide. Fue entrenada con supervisión profunda utilizando de funciones de pérdida robustas. Al utilizar estas funciones se demostró que es capaz de superar a varios algoritmos de súper resolución dentro del estado del arte con la compartición de parámetros de aprendizaje residual local y entrenamiento multiescala. Esta herramienta puede trabajar con una sola imagen o múltiples imágenes de entrada.

3.5 Métricas

Las métricas seleccionadas para evaluar la mejora de cada algoritmo fueron: medida del índice de similitud estructural (SSIM), correlación cruzada normalizada (NCC), evaluación de la calidad de la imagen natural (NIQUE) e, índice de calidad de imagen ciega (BIQI). Las primeras dos métricas son métricas de referencia completa, es decir necesitan de una imagen de entrada para evaluar la calidad, mientras que las otras dos métricas no tienen referencia, es decir, son capaces de determinar la calidad de la imagen solo través de ciertos cálculos.

3.5.1 Índice de similitud estructural (SSIM)

El Índice de evaluación de calidad de imagen de referencia completa (Wang et al, 2004) mide la similitud de la imagen en términos de brillo, contraste y estructura. Es una métrica que necesita de una imagen de referencia para evaluar la calidad de la imagen que se proporcione. Sus valores están en el rango de 0 y 1, siendo uno el más alto y 0 el más bajo. La forma de calcular esta métrica es la siguiente:

$$SSIM(x,y) = \frac{(2\mu_x \mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu\frac{2}{x} + \mu\frac{2}{y} + C_1)(\sigma\frac{2}{y} + C2)} \quad \text{(ec 1)}$$

$\mu_x$ es la medida de la muestra de píxeles de $x$, $\mu_y$ es la medida de píxeles de $y$, $\sigma\frac{2}{y}$ es la varianza de $y$, $\sigma_{xy}$ es la covarianza de $\sigma_{xy}$ y $y$, C1 y C2 son dos variables para estabilizar la división con denominador débil.

3.5.2 Correlación cruzada normalizada (NCC)

Las imágenes se normalizan en términos de brillo, exposición y condiciones de iluminación Se estima en cada paso restando la media y dividiendo la desviación estándar. Es una métrica que necesita de una imagen de referencia para evaluar la calidad de la imagen que se proporciona. Sus valores están en el rango de 0 y 1, siendo uno el más alto y 0 el más bajo. La forma de calcular esta métrica es la siguiente:

$$NCC = \sum_{i=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\frac{(A_{ij}\ X\ B_{ij})}{A^2ij} \quad \text{(ec. 2)}$$

A y B son dos vectores, la imagen original y la imagen mejorada, $ij$ son el valor de cada columna y fila en píxeles de la imagen.

3.5.3 Evaluación de la calidad de la imagen natural (NIQE)

Se utiliza para analizar la calidad de la imagen ciega sobre la calidad de la imagen al recopilar características de estadísticas aliadas a muchas variaciones. Es una métrica de no referencia. Sus valores están en el rango de 0 y 1, siendo uno el más alto y 0 el más bajo. Compara con un modelo por defecto calculado a partir de imágenes de escenas naturales. Es utilizada en diversos trabajos, por ejemplo, en (Wu et al, 2021) y (Zvezdakova et al, 2019).

3.5.4 Índice de calidad de imagen ciega (BIQI)

Propuesta por (Moorthy, et al, 2010) utiliza un conocimiento previo tomado de la escena natural de la imagen libre de alteración. Considera que las imágenes claras del mundo presentan naturalmente ciertas propiedades regulares que caen dentro de un subespacio de todas las imágenes posibles. Revisar si es correcta la idea Si se calcula correctamente, la desviación de la regularidad, puede ayudar a estimar la calidad perceptiva de la imagen. Es una métrica de no referencia, es decir, no necesita ninguna imagen de referencia para evaluar la calidad de la imagen proporcionada. Sus valores están en el rango de 0 y 1, siendo uno el más alto y 0 el más bajo. La forma de calcular esta métrica es la siguiente:

$$BIQI = \sum_{i=1}^{5} \rho i\ x\ qi \quad \text{(ec 3)}$$

$\rho i$ es el valor de todas las columnas de píxel, mientras que $qi$ representa el valor de las filas.

## 4. DATASET

Para este trabajo se utilizó el dataset 3D People Dataset For Surveillance and Forensics, (3DPeS) propuesto por (Baltieri et al, 2011). Es un conjunto de datos de videovigilancia, diseñado principalmente para la identificación de personas con un campo de visión no solapado, pero también aplicable a muchas otras áreas, como la detección de personas, el seguimiento, el análisis de acciones y el análisis de trayectorias. Permite detectar personas desde diferentes ángulos. Contiene alrededor de 1013

 ISSN en trámite

imágenes de 200 personas. Este dataset contiene una carpeta donde las personas que aparecen en las imágenes se encuentran recortadas, esto con la finalidad de optimizar la identificación de personas, detección de rostros, poses, etc. Sus imágenes tienen un tamaño promedio de 60x60 píxeles, donde en un aproximado de 168 imágenes muestran personas totalmente de frente. Se muestra un ejemplo de las imágenes que contiene este dataset (Fig. 1).

*Fig. 1. Ejemplo de las imágenes del dataset 3DPeS (Baltieri et al, 2011).*

## 5. EXPERIMENTACIÓN

Se implementaron los cuatro algoritmos de súper resolución en el lenguaje de programación Python en la versión 3 {ref}, con ayuda de la librería OpenCv.

Las imágenes de entrada del dataset tienen un tamaño aproximado de 60x60 y 60x80 píxeles. Al realizarse la mejora con cada uno de los algoritmos, las imágenes aumentan su tamaño aproximadamente con 300 píxeles más; esto quiere decir que la imagen de salida es mucho más grande a la imagen de entrada con un tamaño aproximado de 400 píxeles. La Fig. 2 muestra los resultados cualitativos de la aplicación de los cuatro algoritmos de súper resolución.

*Fig. 2. Ejemplo de los resultados obtenidos con cada algoritmo.*

En la implementación de cada algoritmo, al trabajarse con imágenes de tamaño pequeño, *la* mejora de la imagen de forma visual no se ve reflejada significativamente, más que en el tamaño de la misma, por ello, la mejora es evaluada de manera objetiva mediante métricas.

Cada uno de los algoritmos implementados tarda aproximadamente un minuto en mejorar una imagen. EDSR es el único algoritmo al que le lleva más tiempo en mejorar una imagen. La mejora de las imágenes no es muy apreciable de forma visual debido al tamaño tan pequeño de las imágenes, sin embargo, las métricas seleccionadas describen de forma objetiva su mejora. La experimentación fue realizada en una computadora Dell Inspiron 5547 con un procesador core i7 y 16 GB de RAM.

Véase en la Tabla 1 los resultados de los algoritmos evaluados bajo las cuatro métricas seleccionadas. Como se observa el algoritmo con mejores resultados fue LapSRN, el cual obtuvo un nivel superior a los otros algoritmos, demostrando que su pirámide Laplaciana ayuda de gran forma a la mejora de imágenes. Este modelo predice de forma progresiva los residuos de alta frecuencia de manera gruesa a fina y al sustituir a la interpolación bicúbica predefinida en capas convolucionales, la red se optimiza con una función de pérdida robusta.

**Tabla 1. Resultados de los algoritmos de SR.**

| Algoritmo | SSIM | NCC | NIQE | BIQI |
|---|---|---|---|---|
| EDSR | 0.164 | 0.288 | 0.486 | 0.278 |
| FSRCNN | 0.146 | 0.182 | 0.362 | 0.369 |
| **ESPCN** | **0.277** | **0.188** | **0.278** | **0.302** |
| **LapSRN** | **0.278** | **0.363** | **0.538** | **0.481** |

## 6. CONCLUSIONES

La súper resolución es una técnica para mejorar las imágenes, la cual ayuda en diversos campos, como en la videovigilancia. La mejora en imágenes de videovigilancia es importante, ya que gracias a ella se puede apreciar con mayor claridad el contenido de la imagen. Sí se realiza una mejora antes de trabajar con una parte especifica de la imagen se pueden tener mejores resultados cuando se realicen detección de rostros y

 ISSN en trámite

poses o reconocimientos faciales en ellas y, posteriormente, trabajar sobre el área específica que se desee de la imagen. Los resultados obtenidos demuestran que LapSRN es el algoritmo con mayor nivel de mejora en una imagen, esta mejora no es mayormente apreciada ante el ojo humano debido al tamaño original de la imagen. Al realizarse una mejora su tamaño aumenta, pero la definición del contenido de la imagen no es apreciada ante el ojo humano, sin embargo, esta mejora se ve reflejada a nivel computacional.

**REFERENCIAS**

Alkanhal, L., Alotaibi, D., Albrahim, N., Alrayes, S., Alshemali, G., & Bchir, O. (2020). Super-resolution using deep learning to support person identification in surveillance video. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 11(7).

Amiri, M., Ahmadyfard, A., & Abolghasemi, V. (2019). A fast video super resolution for facial image. Signal Processing: Image Communication, 70, 259-270.

Baltieri, D., Vezzani, R., & Cucchiara, R. (2011, December). 3dpes: 3d people dataset for surveillance and forensics. In Proceedings of the 2011 joint ACM workshop on Human gesture and behavior understanding (pp. 59-64).

Belhumeur, P. N., Jacobs, D. W., Kriegman, D. J., & Kumar, N. (2013). Localizing parts of faces using a consensus of exemplars. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 35(12), 2930-2940.

C. Dong, C. C. Loy, K. He, and X. Tang. Learning a deep convolutional network for image super-resolution. In ECCV 2014

C. Sagonas, E. Antonakos, G, Tzimiropoulos, S. Zafeiriou, M. Pantic. 300 faces In-the-wild challenge: Database and results. Image and Vision Computing (IMAVIS), Special Issue on Facial Landmark Localisation "In-The-Wild". 2016.

Chen, R., Qu, Y., Zeng, K., Guo, J., Li, C., & Xie, Y. (2018). Persistent memory residual network for single image super resolution. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (pp. 809-816).

Cheng, D. S., Cristani, M., Stoppa, M., Bazzani, L., & Murino, V. (2011, September). Custom pictorial structures for re-identification. In Bmvc (Vol. 1, No. 2, p. 6).

Dong, C., Loy, C. C., & Tang, X. (2016, October). Accelerating the super-resolution convolutional neural network. In European conference on computer vision (pp. 391-407). Springer, Cham.

Duchon, C. E. (1979). Lanczos filtering in one and two dimensions. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 18(8), 1016-1022.

Farooq, M., Dailey, M. N., Mahmood, A., Moonrinta, J., & Ekpanyapong, M. (2021). Human face super-resolution on poor quality surveillance video footage. Neural Computing and Applications, 33(20), 13505-13523.

Hernández, L. J. R., Domínguez, H. D. J. O., Villegas, O. O. V., & Azuela, J. H. S. Estudio comparativo de algoritmos de súper resolución de una sola imagen basados en aprendizaje profundo.

J. Kim, J. Kwon Lee, and K. M. Lee. Accurate image superresolution using very deep convolutional networks. In CVPR 2016.

Lai, W. S., Huang, J. B., Ahuja, N., & Yang, M. H. (2018). Fast and accurate image super-resolution with deep laplacian pyramid networks. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 41(11), 2599-2613.

Lim, B., Son, S., Kim, H., Nah, S., & Mu Lee, K. (2017). Enhanced deep residual networks for single image super-resolution. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops (pp. 136-144).

Moorthy, A. K., & Bovik, A. C. (2010). A two-step framework for constructing blind image quality indices. IEEE Signal processing letters, 17(5), 513-516.

Ruangsang, W., & Aramvith, S. (2017, October). Efficient super-resolution algorithm using overlapping bicubic interpolation. In *2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)* (pp. 1-2). IEEE.

Shi, W., Caballero, J., Huszár, F., Totz, J., Aitken, A. P., Bishop, R., ... & Wang, Z. (2016). Real-time single image and video super-resolution using an efficient sub-pixel convolutional neural network. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 1874-1883).

Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. IEEE transactions on image processing, 13(4), 600-612.

Wu, L., Zhang, X., Chen, H., Wang, D., & Deng, J. (2021). VP-NIQE: An opinion-unaware visual perception natural image quality evaluator. Neurocomputing, 463, 17-28.

Zvezdakova, A., Kulikov, D., Kondranin, D., & Vatolin, D. (2019). Barriers towards no-reference metrics application to compressed video quality analysis: on the example of no-reference metric NIQE. arXiv preprint arXiv:1907.03842.

 ISSN en trámite

# Transformación de objetos de aprendizaje en servicios Web de aprendizaje

**Enrique Jonathan Cordero Escobar[1] ,**
**Olivia Graciela Fragoso Díaz[2].**

*[1,2] Departamento de Ciencias Computacionales, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: {[1]m21ce005@cenidet.tecnm.mx, [2]olivia.fd@cenidet.tecnm.mx}).*

**Resumen:** En la actualidad, los objetos de aprendizaje se han convertido en un material de suma importancia ya que nos permiten aprender y entender sobre distintos temas. Los objetos de aprendizaje normalmente no son reutilizables porque dependen de sistemas gestores de aprendizaje o plataformas de e-learning. Este artículo propone un método para transformar los objetos de aprendizaje en servicios Web de aprendizaje con la finalidad de aumentar el nivel de reusabilidad al eliminar su dependencia a los sistemas gestores de aprendizaje.

*Palabras clave:* gestores de aprendizaje, LMS, SCORM, objetos de aprendizaje, recursos de aprendizaje, servicio Web de aprendizaje.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un Objeto de Aprendizaje (OA) es un conjunto de elementos que nos permiten aprender sobre un tema en específico. Un objeto de aprendizaje representa elementos que pueden ser usados en diferentes procesos formativos pero su acoplamiento a los sistemas gestores los limita a depender de estos sistemas. El uso de las tecnologías que los empacan como Sharable Content Object Reference Model (SCORM) e Instructional management system (IMS) representa en gran medida un problema si se requiere que estos sean reusables.

En este artículo se describe un proceso para transformar los OA hacia servicios Web de aprendizaje con el propósito de hacerlos reutilizables, los objetos de aprendizaje suelen encontrarse en repositorios de objetos de aprendizaje (ROAs) o en sistemas gestores de aprendizaje (SGA) como Moodle. En este sentido se define a un servicio Web de aprendizaje como un recurso educativo que se encuentra alojado o contenido en un servicio Web.

## 2. TRABAJOS RELACIONADOS

Dentro de la literatura existen trabajos que abordan diferentes enfoques del tema, el que se describe en esta sección es el de las plataformas que implementan funcionalidades usando servicios Web, ninguno establece la forma de reutilizar objetos de aprendizaje transformándolos a servicios Web.

En (Westerkamp, 2003) se propone utilizar los cursos con servicios Web a través de un prototipo llamado LearnServe. Esto permite crear cursos en línea mediante servicios Web, los servicios pueden ser utilizados de manera individual para acceder a un curso en específico, o un conjunto para reforzar el aprendizaje. También facilita la manera de acceder a sus contenidos ya que al ser servicios Web pueden ser utilizados desde cualquier dispositivo que cuente con conexión a internet.

En (Kautsar, Kubota, Musashi, & Sugitani, 2014) se presentan dos plugins elaborados con la finalidad de crear cursos dentro de Moodle a través del uso de servicios Web. El primer plugin se encarga de registrar los datos del curso dentro de la base de datos de Moodle. El segundo plugin permite ingresar al primer plugin mediante servicios Web, de esta manera se pueden crear cursos dentro de Moodle utilizando servicios Web REST.

En (D´Mello, 2012) se propone la semántica funcional y las reglas que deben seguir los servicios Web de aprendizaje electrónico, esto a través de una extensión a la estructura del archivo de descripción de los servicios de aprendizaje electrónico WSDL 2.0. Sugieren añadir descripciones funcionales a los servicios a través de etiquetas XML y añadirlas al WSDL.

En (Zein & Yvon , 2007) se propone la descripción y la composición que deberían tener los servicios de aprendizaje electrónico, esto con la finalidad de facilitar a los estudiantes, maestros e investigadores la información o el contenido dentro de estos servicios de aprendizaje. También aporta la manera de acceder a estos servicios a través de una interfaz, además, definen un modelo de metadatos para facilitar la descripción de servicios, almacenarlos y ubicarlos.

 ISSN en trámite

En (Sotelo Gómez & Solarte, 2014) se identifican recursos Web existentes de una plataforma de aprendizaje electrónico llamada .LRN y los implementa en un LMS con el fin de reutilizarlos. Este estudio, según los autores, sirve como base para crear un framework de referencias para la integración de servicios de aprendizaje electrónico de terceros a la plataforma .LRN.

En (Pavani, 2016) se recopila información de distintos repositorios de objetos de aprendizaje en Internet con la finalidad de identificar repositorios institucionales y distintos tipos de OA. El objetivo es obtener información de los OA como el tipo de contenido, descripción, persistencia y la granularidad. También propone crear un catálogo donde se transfieran los metadatos de los repositorios para poder interactuar con los OA a través de distintos medios.

A diferencia de los trabajos relacionados, el trabajo que aquí se describe permite transformar los objetos de aprendizaje en servicios Web de aprendizaje. Esto a través de identificar los tipos de archivos que los contienen, posteriormente analiza los recursos y los transforma en servicios Web de aprendizaje, estos servicios se encuentran disponibles tanto en formato SOAP como en formato REST.

En la Tabla 1 se encuentran las principales diferencias entre los servicios SOAP y REST según (Sepulveda, 2017).

**Tabla 1. Diferencia entre SOAP y REST (Sepulveda, 2017)**

| SOAP | REST |
|---|---|
| SOAP es un protocolo. | REST es un estilo arquitectónico. |
| SOAP utiliza interfaces de servicios para ser utilizado. El WSDL describe la interfaz. | REST utiliza URI para ser utilizado. La URI es la liga donde se encuentra el servicio en la Web. |
| SOAP define las normas que deben de seguirse estrictamente. | REST no define tantos estándares como SOAP. |
| SOAP requiere más ancho de banda para ejecutarse ya que define todo su formato. | REST requiere menos ancho de banda ya que solo define su arquitectura. |
| SOAP define su propia seguridad. | Los servicios RESTful heredan la seguridad del transporte(HTTP o HTTPS). |
| SOAP solo permite el uso de XML como formato de datos. | REST permite distintos formatos como texto plano, HTML, XML, JSON, etc. |
| | Es rápido |
| | Es fácil de manejar |

Adicionalmente, los recursos de aprendizaje que se encuentran en plataformas como Moodle pueden ser tratados de tal manera que se transformen en servicios Web de aprendizaje, para que cualquier persona pueda ser capaz de acceder a estos y utilizar su contenido siempre y cuando el servidor donde se encuentran alojados esté disponible. En la Tabla 2 se muestran los trabajos relacionados y sus características.

**Tabla 2. Resumen de trabajos relacionados**

| Número | Nombre | Identifica recursos de aprendizaje | Analiza recursos | Propone crear servicios web | Crea servicios web REST | Crea servicios web SOAP | Transorma OA en SWA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.1 | E-Learning as a Web Service | Sí | Sí | Sí | No | No | No |
| 2.2 | Developing Moodle Plugin for Creating Learning Content with Another REST Function Call | No | No | Sí | Sí | No | No |
| 2.3 | Functional Semantics Aware Broker Based Architecture for E-Learning Web Services | Sí | Sí | Sí | No | No | No |
| 2.4 | Description and composition of e-learning services | Sí | Sí | Sí | No | No | No |
| 2.5 | Incorporación de recursos web como servicios de e-learning al sistema de gestión de aprendizaje .LRN | Sí | Sí | Sí | Sí | No | No |
| 2.6 | An Overview of Repositories of Learning Objects | Sí | Sí | No | No | No | No |
| 2.7 | Transformación a servicios web de aprendizaje a partir de objetos de aprendizaje | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |

## 3. RECURSOS DE APRENDIZAJE Y SERVICIOS WEB

Un recurso de aprendizaje es una entidad de software que contiene información diseñada específicamente para el aprendizaje a través de un sistema informático. Este recurso puede usarse y reutilizarse para facilitar el proceso de aprendizaje (van Assche & Vuorikari, 2006).

Los recursos de aprendizaje pueden ser documentos (.txt, .doc, .pdf), imágenes (.jpg, .bmp), archivos de audio (.mp3, .wav), de video (3gp, .mp4), entre otros. Estos recursos pueden conformar un objeto de aprendizaje (Delgado Fernández, 2012). También existen algunos estándares como SCORM e IMS que indican como deben de estar estructurados o empaquetados los recursos.

### *3.1 Transformación en servicios Web de aprendizaje*

Para propósitos de este trabajo, un servicio Web de aprendizaje es un servicio Web que contiene a un recurso de aprendizaje y su responsabilidad es entregar ese recurso cuando se le solicita. En este trabajo se propone un método para que, a partir de un recurso de aprendizaje u objeto de aprendizaje, se genere un servicio Web de aprendizaje, en la Fig. 1 se muestran 5 actividades para realizar la transformación.

 ISSN en trámite

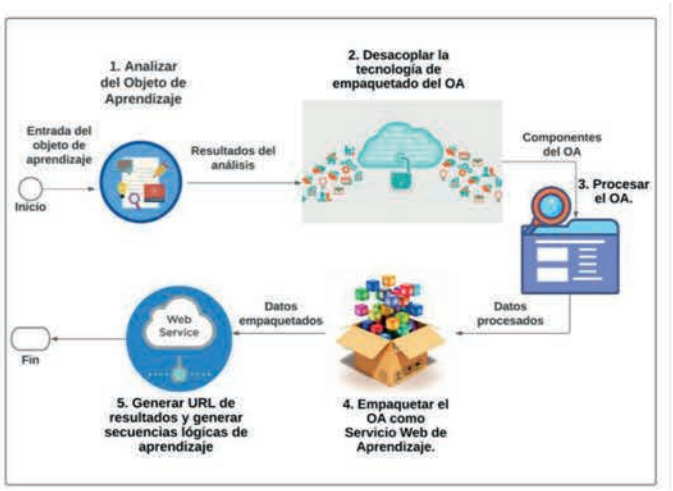



**Fig. 1. Generar servicios Web de aprendizaje**

*1.Analizar el Objeto de Aprendizaje (OA)*

Esta actividad consiste en analizar el OA para identificar y verificar que la extensión del archivo sea una de las siguientes: .zip, .pdf, .docx, .doc, .xlsx, .jpg, .png, .jpeg.

*2.Desacoplar la tecnología de empaquetado del OA*

Una vez validada la extensión, se desacopla el OA para obtener sus componentes. Este proceso es realizado desencriptando los archivos cargados y quitándoles el formato SCORM o IMS.

*3.Procesar el OA*

El sistema identifica los componentes del OA y los prepara para el nuevo empaquetado. En este proceso el recurso es transformado a un archivo binario en base 64.

*4.Empaquetar el OA como Servicio Web de Aprendizaje*

Una vez que el archivo está en base 64 se guarda en la base de datos y a través de un algoritmo, los datos son procesados y se empaquetan como servicios Web en formato SOAP y REST.

*5.Generar de la URL de resultados*

Cuando el servicio Web de aprendizaje es creado, se genera una URL que se presenta al usuario, esta URL es la dirección del servicio. Cuando un OA es muy grande o tiene distintos tipos de elementos se separan y se genera una secuencia lógica para poder mantener el orden.

*3.2 Estándares orientados a objetos de aprendizaje*

IMS es un conjunto de especificaciones basadas en tecnologías abiertas (XML) para facilitar las actividades de aprendizaje sobre tecnología Web, principalmente para el intercambio de contenidos e información sobre estudiantes.

SCORM es un conjunto de estándares y especificaciones para compartir, reutilizar, importar y exportar OA. Este modelo describe cómo las unidades de contenidos se relacionan unas con otras a diferentes niveles de granularidad, cómo se comunican los contenidos con el LMS y define cómo empaquetar los contenidos para importarse y exportarse entre plataformas. También describe las reglas que un LMS debe seguir a fin de presentar un aprendizaje específico. Además, SCORM incluye a trabajos y estándares de IEEE, AICC e IMS para algunas de sus funciones (López, 2005).

Según (SCORM, 2022), todos los materiales de formación deben de tener la siguiente estructura:

- Ser empacado en un archivo ZIP.
- Ser descrito en un archivo XML.
- Comunicarse a través de JavaScript.
- Tener secuencia usando reglas en XML.

Con base en esta especificación y en el análisis realizado se observó que todos los OA revisados en formato SCORM e IMS funcionan con JavaScript y contienen un archivo index.html en el cual se encuentra información referente al OA.

*3.3 Repositorios de objetos de aprendizaje*

Los repositorios de objetos de aprendizaje son bases de datos diseñadas para recopilar documentos estructurados que pueden ser recuperados por distintos medios como los sistemas de búsqueda, edición de la información, el control de acceso, el proceso de seguimiento, la reutilización de elementos ensamblados dentro de otros contenidos y la distribución y recuperación dinámica de la información por medio de la Web (Solano, 2007).

Para este trabajo se analizaron 9 ROAs y se obtuvieron los resultados que se describen en la Tabla 3.

**Tabla 3. Análisis de ROAs**

| ROAs | Formato | Granularidad | Estándar | Idioma | Informatividad | Recursos analizados |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Merlot | .html<br>.mp4<br>.pdf<br>.ppt<br>.zip | Contenido<br>Objetivo<br>Actividad<br>Evaluación | SCORM | Inglés | No | 27 |
| Openstax | .html<br>.mp4<br>.pdf<br>.ppt<br>.zip | Contenido<br>Objetivo<br>Actividad<br>Evaluación | SCORM | Inglés | No | 35 |

 ISSN en trámite

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Archive | .PDF .MP4 .PPT .html .zip | Contenido Objetivo Actividad Evaluación | No | Inglés Frances | No | 21 |
| itson | .html | Contenido Objetivo Actividad Evaluación | No | Español | No | 15 |
| Aprendeenl-inea | .html .zip .jpg | Contenido | No | Español | No | 9 |
| Educarchile | .html .mp4 .pdf .ppt | Contenido Objetivo Actividad Evaluación | SCORM LMS | Español | Kínder Presco-lar Básico Secun-daria Medio | 25 |
| Careo.org | .html | Ninguno | No | Inglés | No | 0 |
| Educacontic | .html | Ninguno | No | Español | No | 0 |
| Elena Project | .html | Contenido | SCORM | Inglés | No | 0 |

En la Tabla 3 se describen los repositorios analizados y sus objetos de aprendizaje, se analizaron 132 objetos de aprendizaje de los cuales se descargaron 20 para utilizarlos en pruebas. Se observó que los repositorios toman como objetos de aprendizaje a recursos que no tiene las características suficientes para ser considerados OA, en su mayoría los OA son recursos de aprendizaje de tipo contenido.

También se analizó la estructura de los ROAs destacando lo siguiente:

- No cuentan con buscadores de recursos.
- No se encuentran organizados de manera clara.
- No existen filtros de búsqueda.
- No permiten visualizar los recursos.
- Se necesita estar registrado para poder acceder a los recursos.
- No utilizan servicios Web para gestionar los recursos.

Los recursos de los ROAs pueden ser usados de una mejor manera si se utilizan servicios Web, además, esto evita tener sobrecargas en los servidores donde se encuentren alojados los LMS.

## 4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Con el propósito de implementar el método de transformación se desarrolló un sistema. El sistema está creado con HTML, CSS, JS, BOOTSTRAP 4, PHP 7 y MYSQL . Se emplean estas tecnologías debido a su alto grado de compatibilidad, disponibilidad y alcance, ya que al elaborar un sistema Web, se pueden consumir los recursos desde cualquier dispositivo.

**Fig. 2. Crear SWA**

El sistema funciona de la siguiente manera:

- Como se observa en la Fig. 2, el sistema solicita completar un formulario seleccionar el recurso que se desea transformar.
- El sistema lee el archivo cargado y valida que la extensión se encuentre dentro de las aceptadas, en este caso se admiten las siguientes extensiones: "pdf", "doc", "docx", "xlsx", “zip", "jpg", " jpeg" o "png”.
- El sistema identifica los elementos que contiene el archivo y realiza el desacoplamiento para eliminar la dependencia a ROAs o LMS.

Una vez que los elementos se encuentran desacoplados se empacan como servicios Web de aprendizaje para generar la URL donde se encontrarán dichos servicios, esto se aprecia en la Fig. 3.

**Fig. 3. Sistema de transformación**

En la figura 3 también se puede apreciar que el sistema cuenta con características de visualizar los SWA, descargar los SWA y borrar los SWA.

Como características adicionales, el sistema cuenta con funcionalidades que no tienen muchos ROAs. En la Tabla 4 se presentan las funcionalidades con los que cuenta el sistema.

 ISSN en trámite

**Tabla 4. Funcionalidades del sistema**

| No. | Funcionalidad | Descripción |
|---|---|---|
| 1 | Inicio de sesión | Permite iniciar sesión a los administradores a través de su usuario y contraseña. |
| 2 | Agrega administrador | Permite crear una cuenta de administrador. |
| 3 | Elimina administrador | Permite eliminar una cuenta de administrador. |
| 4 | Genera SWA | Permite crear un nuevo SWA. |
| 5 | Consulta SWA | Obtiene los SWA disponibles. |
| 6 | Despliega SWA | Muestra una previsualización del SWA. |
| 7 | Presenta URL del SWA REST | Muestra la URL del servicio REST. |
| 8 | Descarga SWA | Descarga un SWA. |
| 9 | Presenta URL de servicio SOAP | Muestra la URL del servicio SOAP. |
| 10 | Búsqueda de SWA | Busca un SWA por nombre o etiquetas. |

En la Fig. 4 se muestra que el sistema cuenta con guías para los usuarios que deseen incorporar los servicios Web de aprendizaje a sus páginas Web o a sus LMS.

**Fig. 4. Guías del sistema**

## 5. RESULTADOS

Con el propósito de evaluar el sistema se realizaron 34 pruebas y se crearon 25 servicios Web de aprendizaje de tipo SOAP y de tipo REST, estos pueden ser visualizados, descargados y /o eliminados.

Adicionalmente, el sistema también permite buscar el servicio Web de aprendizaje aplicando filtros de búsqueda como el nombre o las etiquetas. Los servicios pueden ser consultados por cualquier usuario sin necesidad de estar registrado en la plataforma. Las funcionalidades probadas son las que describen en la Tabla 2 resultando todos los casos de acuerdo a lo esperado.

## 6. CONCLUSIÓN

Cuando se emplea el modelo de servicios Web se facilita la comunicación entre distintos sistemas y lenguajes de programación, por lo que se espera que se aumente su nivel de reusabilidad. Además, este paradigma ofrece que los recursos estén disponibles siempre que el servidor se encuentre activo, sin necesidad de depender de un LMS.

Cada paso propuesto para la transformación tiene su nivel de complejidad, afortunadamente, el proceso propuesto para transformar OA en SWA logró su objetivo. La reusabilidad es un atributo difícil de medir por lo que su medición o evaluación no se considera en el alcance del trabajo. Sin embargo, si se considera para trabajos futuros.

## REFERENCIAS

D´Mello, D. A. (2012). Functional Semantics Aware Broker Based Architecture for E-Learning Web Services. *International Journal on Integrating Technology in Education* .

Delgado Fernández, P. (2012). Tesis de Maestría Servicios Web De Aprendizaje. *Servicios Web De Aprendizaje.* Centro Nacional De Investigación Y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos.

Kautsar, I., Kubota, S.-I., Musashi, Y., & Sugitani, K. (2014). Developing Moodle Plugin for Creating Learning. *IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 784-787.

López, C. (2005). *Los Repositorios de Objetos de Aprendizaje como soporte a un entorno e-learning.* Obtenido de Universidad de Salamanca: http://www.biblioWeb.tic.unam.mx/libros/repositorios/index.htm#

Pavani, A. (2016). An Overview of Repositories of Learning Objects. *IFAC-PapersOnLine*, 174-179.

SCORM. (2022). *A Technical Overview of the SCORM Standard*. Obtenido de scorm.com: https://scorm.com/scorm-explained/technical-scorm/

Sepulveda, J. (2017). *stackoverflow*. Obtenido de ¿Qué diferencia hay entre SOAP y REST?:

ISSN en trámite

https://es.stackoverflow.com/questions/76615/qu%c3%a9-diferencia-hay-entre-soap-y-rest

Solano, I. (2007). *REPOSITORIOS DE OBJETOS DE APRENDIZAJE PARA LA ENSEÑANZA SUPERIOR: DSPACE*. Obtenido de Digitum: https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/13419/1/DSpace.pdf

Sotelo Gómez, F., & Solarte, M. (2014). Incorporación de recursos Web como servicios de e-learning al sistema de gestión de aprendizaje. *RT Journal Article*.

van Assche, F., & Vuorikari, R. (2006). A framework for quality of learning resources. *Springer Berlin Heidelberg*, 443-456.

Westerkamp, P. (2003). E-Learning as a Web Service. *7th International Database Engineering and Applications Symposium*, 242-249.

Zein, K. O., & Yvon , K. (2007). Description and composition of e-learning. *JOURNAL OF SOFTWARE*. Obtenido de https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.111.7664&rep=rep1&type=pdf

 ISSN en trámite

# Modelo de Usabilidad para Recursos de Aprendizaje Digitales

**Jonoel Enrique Núñez Herrera*, Dra. Olivia Fragoso Díaz***
**Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles*, Dr. Juan Carlos Rojas Pérez***

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México*
*Interior Internado Palmira s/n, Cuernavaca, Morelos, México. C.P. 62490*
*{m21ce019, olivia.fd, blanca.vr, juan.rp}@cenidet.tecnm.mx*
*https://jcyta.cenidet.tecnm.mx/ http://cenidet.tecnm.mx/*

**Resumen:** Los recursos de aprendizaje digitales son elementos que más se producen actualmente lo que los hace relevantes en el ámbito de e-learning. Esa relevancia indica que se debe cuidar su proceso de construcción y /o evaluación respecto a varios atributos de calidad entre los que se encuentra la usabilidad, desafortunadamente no existen guias o estándares específicos para poder medirla. En este trabajo se propone un conjunto de atributos que pueden ser empleados para medir la usabilidad sin tener que depender de usuarios o expertos, los valores de los atributos pueden ser fácilmente cuantificables. Se evaluaron recursos de aprendizaje que se extrajeron de cursos gratuitos encontrados en la red para los cuales se identificaron problemas de usabilidad.

*Palabras Clave:* Recursos de Aprendizaje Digitales, Usabilidad, Métricas, Atributos.

## 1. INTRODUCCIÓN

La definición de Usabilidad es la primera parte de este trabajo, para lo cual se identificaron algunas ya existentes o pertenecientes a algunos estándares. En [ISO 9126, 2001] que define la usabilidad como la capacidad del producto de software para ser entendido, aprendido, usado y atractivo para el usuario, cuando es usado bajo condiciones específicas.

[ISO 9241-11, 2018] que define la usabilidad como la medida o el grado en que un producto puede ser usado por usuarios específicos para lograr objetivos específicos con eficacia, eficiencia y satisfacción en un contexto de uso específico.

Los recursos de aprendizaje digitales son elementos cuyo objetivo es facilitar el aprendizaje y que se producen pensando en que sean fáciles de emplear, ya que deben cumplir con el objetivo del aprendizaje. Cuando se producen recursos de aprendizaje no usables, estos pueden contener información confusa, incoherente, falta de información o un aspecto gráfico descuidado, esto puede llegar a ser perjudicial ya que deteriora el proceso de aprendizaje o puede hacer que los usuarios abandonen la tarea, también puede obstaculizar el proceso de aprendizaje por completo (Rodríguez-Ramírez, 2015). Actualmente, existen muchos recursos de aprendizaje disponibles en internet y en repositorios de objetos de aprendizaje de los cuales no se conoce o no se sabe si cumplen con el atributo de usabilidad.

En este trabajo se propone un modelo para medir la usabilidad de los recursos de aprendizaje, este modelo define un conjunto de atributos que un recurso de aprendizaje usable puede considerar.

Se han realizado numerosos trabajos de investigación que sugieren que los recursos de aprendizaje deben ser usables (UNESCO, 2011), (Toro Córdoba, G. I., 2015), (Marzal, Miguel & Calzada-Prado, F. Javier & Osti, Marina, 2008), (Lara Ramírez, Graciela L. Guisseny, 2020), (Mejía Castellanos, 2014), (Wiley, D., 2000), entre otros. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos no presentan alguna forma de medición ni resultados de evaluaciones de manera directa, estas evaluaciones se realizan dependiendo del usuario cuya opinión puede ser altamente subjetiva. El propósito de este artículo es mostrar una forma de evaluar la usabilidad de manera cuantificable y a partir de elementos que contienen los recursos cuyos valores en algunos otros trabajos se reconocen como deseables.

La estructura del artículo es la siguiente: En la Sección 2 se presentan los Trabajos Relacionados., en la Sección 3 se presenta la Descripción del Modelo de Usabilidad., en la Sección 4 se presenta la Medición de la Usabilidad, en la Sección 5 se presentan los Resultados y en la Sección 6 las Conclusiones.

## 2. TRABAJOS RELACIONADOS

Después de analizar los trabajos relacionados se encontró que existen pocos trabajos que traten sobre los recursos de aprendizaje. Existen trabajos que tratan en su mayoría con objetos de aprendizaje, objetos virtuales de aprendizaje o sistemas web. Se identificaron tres enfoques: “Definición y

 ISSN en trámite

Creación", "Evaluación y Mejora" y "Mejora de Productos Específicos". A continuación se presentan los tres enfoques y un resumen de los trabajos relacionados:

*2.1. Enfoque 1: Definición y Creación*

Los trabajos relacionados que comprenden este enfoque explican la manera de evaluar los Objetos de Aprendizaje, describen las características que definen a un objeto de aprendizaje donde se identifican algunos puntos en común como: usabilidad, accesibilidad, reusabilidad, interoperabilidad, contenidos, adaptabilidad, etc. La mayoría de estos trabajos no contienen mediciones de forma cuantitativa, describen características y realizan evaluaciones subjetivas. Estas evaluaciones son realizadas por usuarios finales una vez empleado el recurso con plantillas de forma subjetiva (Callejas-Cuervo, Alarcón-Aldana & Álvarez-Carreño, 2017), (Hassan & Ortega, 2009), (Mascheroni, et al., 2012), (Moreno, Bolaños & Nava, 2010).

*2.2. Enfoque 2: Evaluación y Mejora*

Estos trabajos describen modelos, herramientas, cuestionarios y plantillas, para la evaluación de diferentes entidades de software, entre ellas encontramos: páginas web, objetos de aprendizaje, objetos virtuales de aprendizaje, sistemas de interacción tangibles y objetos de aprendizaje generativos. Para que se puedan evaluar estas entidades es necesario primero alinear las características con los atributos y métricas. Las evaluaciones de estas entidades fueron realizadas por usuarios. Aunque son diferentes las entidades tienden a usar el mismo método de ensamblaje, definiendo cada uno sus propios atributos y métricas subjetivas, pero cumplen con el propósito evaluar de alguna manera, encontrando que se cumplen con el aumento del aprendizaje (Ana Bely Escalante Caicedo, 2019), (Ana Fernández, Elena Domínguez, & Isabel Armas, 2012), (Ferre Grau, 2005), (Giorgetti, Romero & Vera, 2013).

*2.3. Enfoque 3: Mejora de Productos Específicos*

Estos trabajos describen la mejora de productos muy específicos casi no definen características y utilizan herramientas ya descritas como el instrumento LORI para la mejora de entidades de software. Entre las entidades descritas están: OVA para la evaluación del dolor en enfermería, OA para la enseñanza de bases de datos, Metadatos de registros bibliográficos digitales evaluando la completitud, OA en entornos de trabajo colaborativo para recursos educativos, OA para la enseñanza de eliminación de obstrucciones gastrointestinales, OVA para mejorar la calidad del desarrollo de objetos de protección personal. La mayoría de los trabajos mencionados concluyen que se debe contar con un experto en objetos de aprendizaje para la evaluación y el desarrollo de estos productos. Los trabajos mencionados carecen o se crearon con algún grado de deficiencia en la calidad (Alvarez, Marcon, Iyengar, Schmitt & Francisco de Andrade, 2018), (Torres & Willging, 2015), (García-Mendoza, Díaz-De la Paz, González-González, Nuñez-Arcia & Leiva-Mederos, 2016), (Colomé Cedeño, Estrada Sentí & Febles Rodríguez, 2012).

## 3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE USABILIDAD

Es necesario definir la usabilidad en función de recursos de aprendizaje. En los estándares (ISO 9126, 2001), (ISO 25010, 2015) y (ISO 9241-11, 2018) una definición común de usabilidad se refiere a algo que es fácil de utilizar. La usabilidad en recursos de aprendizaje es un agregado de características y cada uno tiene su propio grado de importancia. Se llega a esta definición a partir de la recopilación de atributos y características considerados en estos estándares. Los subatributos que se emplean para medir la usabilidad de recursos de aprendizaje son:

- **Completitud.**
- **Accesibilidad.**
- **Atractividad.**
- **Legibilidad.**

**Completitud**: El grado en que un recurso cumple con las características definidas para su completes (Oxford University Press, 2022), para un RA tipo documento estas características son: Completitud de la estructura, Completitud de párrafos, Completitud de las líneas (oraciones).

**Accesibilidad**: El grado en que un recurso cumple con características para que sus contenidos y servicios estén disponibles para cualquier usuario y le permitan interactuar de forma total, independientemente de sus condiciones personales, especialmente por aquellas que tienen dificultades de acceso (Bravo Gracia, 2005), es decir, facilitar el uso para un usuario con alguna discapacidad y que necesita utilizar este recurso. Para este trabajo se consideran características de accesibilidad visual.

**Atractividad**: Es el grado en que un recurso posee características asociadas a la atracción de la visualización, es decir, al no desagrado para la vista del usuario o "fácil de ver" (Nielsen, 1993). Se atienden las imágenes y los gráficos como atractivos visuales y de interés para el usuario.

**Legibilidad**: Es el grado que se observa en un texto sobre lo fácil y entendible que es leerlo (Ferrando, 2004) Atiende a características como: la gramática y la ortografía.

Debido al número de atributos, el modelo de usabilidad que se define se presenta en dos partes por motivos de espacio, las dos partes se presentan en la figura 1 y la figura 2.

La figura 1, describe Atractividad y Completitud y la figura 2, describe Accesibilidad y Legibilidad. Los diagramas indican que los atributos de la izquierda son más genéricos que los de la derecha. Junto con los atributos se describe la referencia en donde se propone el atributo como parte de la usabilidad.

 ISSN en trámite

La tabla 1 describe las ponderaciones o importancias de los atributos, para el ejemplo mostrado, las ponderaciones fueron asignadas de manera inicial porque a nuestro mejor conocimiento no hay estudios que determinen cual atributo es mejor que otro. Estos subatributos atienden a los encontrados en los trabajos relacionados.El modelo es extensible por que se pueden agregar nuevos subatributos y los pesos se van normalizando de acuerdo al número de atributos que contiene el modelo.

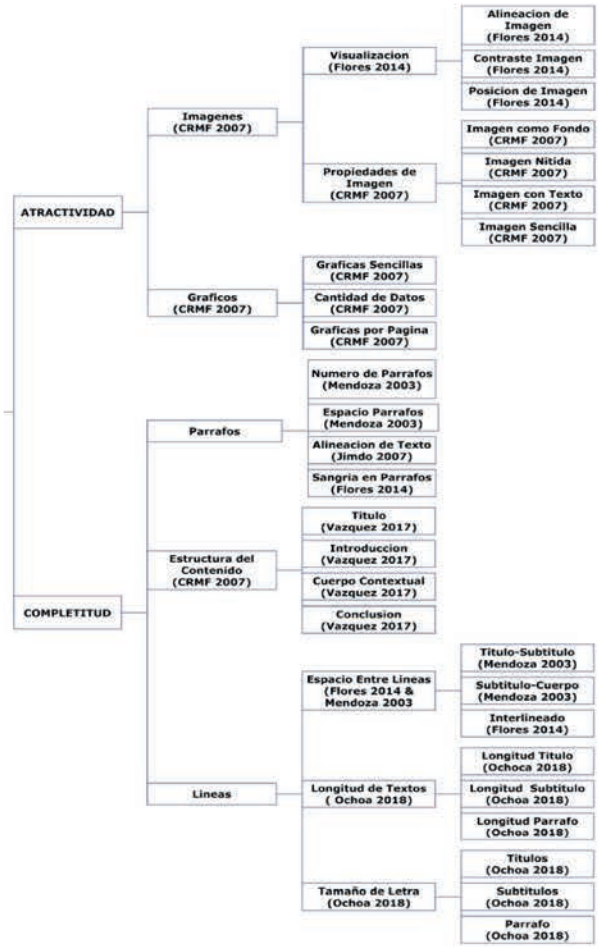



Figura 1.- Atractividad y Completitud.

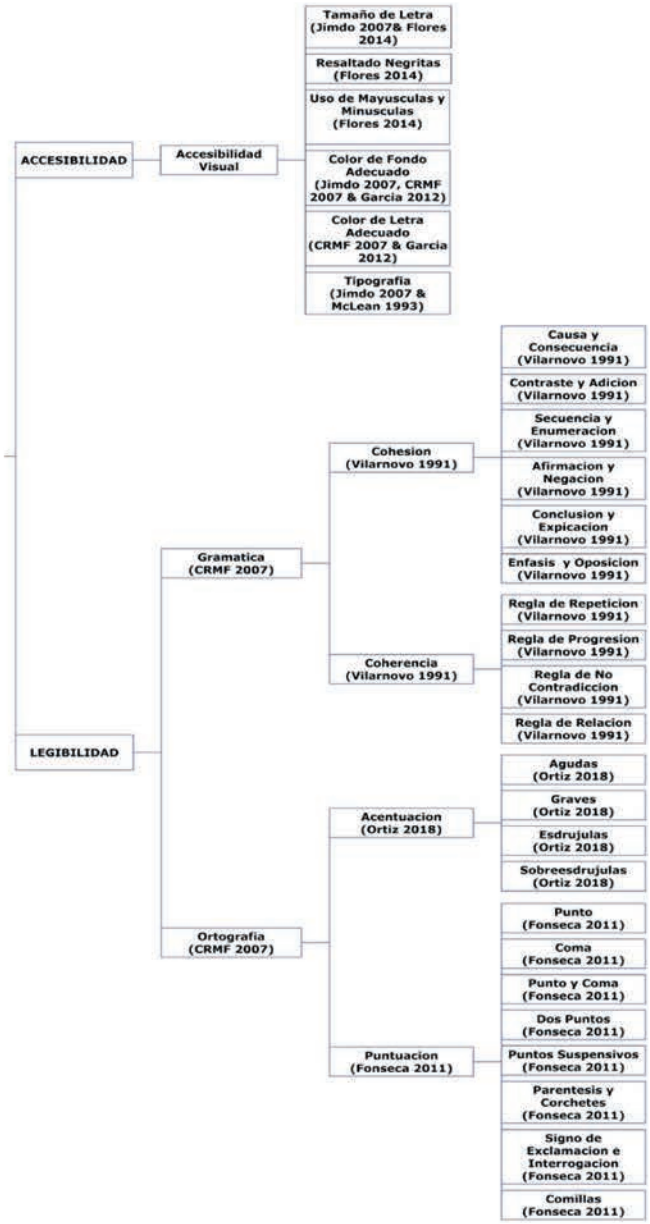



Figura 2.- Accesibilidad y Legibilidad.

## 4. MEDICIÓN DE USABILIDAD

Además de los diagramas de las figuras 1 y 2 que reflejan la asociación entre atributos, se tiene la Tabla 1 de ponderaciones de los atributos.

Tabla 1. Tabla de ponderaciones de completitud.

| Sub característica | Atributo | Ponderación |
|---|---|---|
| Comp. Estructura | Título | Contiene un título = 1.47 %<br>No contiene un título = 0 % |

ISSN en trámite

| | | |
|---|---|---|
| | Introducción | Contiene una introducción = 1.47 %<br>No contiene una introducción = 0.0 % |
| | Cuerpo Textual | Contiene un cuerpo textual = 1.47 %<br>No contiene un cuerpo textual = 0 % |
| | Conclusión | Contiene una conclusión = 1.47 %<br>No contiene una conclusión = 0 % |
| Comp. Párrafos | Número de párrafos | Tiene 5 párrafos = 1.47 %<br>Tiene 4 párrafos = 1.17 %<br>Tiene 3 párrafos = 0.88 %<br>Tiene 2 párrafos = 0.58 %<br>Tiene 1 párrafo = 0.29 %<br>Tiene 0 o más de 5 párrafos = 0 % |
| | Espaciado entre párrafos | El espaciado es de 1 o 2 líneas = 1.47 %<br>El espaciado es menor a una línea = 0 %<br>El espaciado es mayor a 2 líneas = 0 % |
| | Alineación del texto | El texto está justificado = 1.47 %<br>El texto está alineado a la izquierda = 0.74 %<br>El texto está centrado o alineado a la derecha = 0 % |
| | Sangría del párrafo | El párrafo tiene sangría = 1.47 %<br>El párrafo no tiene sangría = 0 % |
| Comp. Líneas / Espaciado entre líneas | Espaciado Título-Subtítulo | Entre el título y el subtítulo hay un espacio de una línea = 1.47 %<br>Entre el título y el subtítulo hay más de una línea de espacio = 0 % |
| Comp. Líneas / Espaciado entre líneas | Espaciado Subtítulo - Cuerpo | Entre el subtítulo y el texto hay un espacio de una línea a dos líneas = 1.47 %<br>Entre el subtítulo y el texto hay más de dos líneas de espacio = 0 % |
| Comp. Líneas / Espaciado entre líneas | Interlineado | El interlineado de los párrafos es de 1 a 1.5 líneas de espacio = 1.47 %<br>El interlineado es menor a 1 línea de espacio = 0 %<br>El interlineado es mayor a 1.5 líneas de espacio = 0 % |
| Comp. Líneas / Long de textos | Longitud del título | El número de palabras del título es de 3 a 8 palabras = 1.47 %<br>El número de palabras del título es de 1 a 2 palabras = 0.74 %<br>El número de palabras del título es de 9 a 10 palabras = 0.74 %<br>Más de 10 palabras en el título = 0 % |
| Comp. Líneas / Long de textos | Longitud del subtítulo | El subtítulo tiene máximo 25 palabras = 1.47 %<br>El subtítulo tiene más de 25 palabras = 0 % |
| Comp. Líneas / Long de textos | Longitud del texto | El párrafo contiene máximo 60 palabras = 1.47 %<br>El párrafo contiene más de 60 palabras = 0 % |
| Comp. Líneas / Tamaño de letra | Tamaño del título | El tamaño del título del RA es de 30 a 36 puntos =<br>1.47 %<br>El tamaño del título del RA es de 24 a 29 o de 37 a 42 puntos = 0.98 %<br>El tamaño del título del RA es de 18 a 23 o 43 a 48 =<br>0.49 %<br>Menor a 18 o mayor a 48 = 0 % |

 ISSN en trámite

| | | |
|---|---|---|
| Comp. Líneas / Tamaño de letra | Tamaño del subtítulo | El tamaño del subtítulo del RA es 20 a 25 = 1.47 %<br><br>El tamaño del subtítulo del RA es 15 a 19 o 26 a 30 = 0.74 %<br><br>El tamaño del subtítulo del RA es menor a 15 o mayor a 30 = 0 % |
| Comp. Líneas / Tamaño de letra | Tamaño del texto | El tamaño del texto es de 12 a 18 = 1. 47 %<br><br>El tamaño del texto es menor a 12 = 0 %<br><br>El tamaño del texto es mayor a 18 = 0 % |

Estos atributos son un ejemplo de las mediciones que se encontraron en la literatura donde se emplean los rangos y valores deseables de los atributos como por ejemplo: los tamaños de letra deseables se encuentran entre 12 y 18 puntos, y según la tabla normalizada de estos valores obtienen un 1.47 puntos de importancia, y los valores mayores y menos a estos 0 puntos de importancia.

## 5. RESULTADOS

El modelo de usabilidad se aplicó a 3 recursos de aprendizaje que se obtuvieron de páginas web de cursos gratuitos, los recursos son:

Caso 1, Platzi.com en el curso ¿Qué son los dark patterns y por qué debemos evitarlos?, el recurso se obtuvo de una lectura sugerida como PDF y se llama "Web3: diseño ético y sostenibilidad" en la liga: https://platzi.com/blog/web3-etico-sostenibilidad/

Caso 2, Platzi.com en el curso ¿Qué son los dark patterns y por qué debemos evitarlos?, el recurso se llama "Decálogo de trabajo de UX" en la liga: https://platzi.com/clases/2603-darkpatterns-ux/43645-que-son-los-dark-patterns-y-por-que-debemos-evitar/

Caso 3, Coursera.org en el curso: Introducción a Java, el Recurso se llama "El proceso de programar", en la liga: https://www.coursera.org/learn/introduccion-java/supplement/RESBk/transcricpion-el-proceso-de-programar.

Los resultados de la evaluación de los tres recursos indica claramente cuáles son los defectos que los recursos tienen respecto al modelo de usabilidad. Los recursos obtuvieron 85.93, 87.5 y 88.38 respectivamente. En la tabla 2 se describe el resumen de las evaluaciones de los recursos.

Tabla 2. Tabla de resultados de pruebas.

| Atributo | Caso 1 Valores | Caso 1 Importancia | Caso 2 Valores | Caso 2 Importancia | Caso 3 Valores | Caso 3 Importancia |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Alineación de Imagen | IZQUIERDA | 2.5 | IZQUIERDA | 2.5 | IZQUIERDA | 2.5 |
| Contraste de Imagen | 1 | 2.5 | 1 | 2.5 | 1 | 2.5 |
| Posición de Imagen | ABAJO | 2.5 | ABAJO | 2.5 | ABAJO | 2.5 |
| Imagen como Fondo | 0 | 2.5 | 0 | 2.5 | 0 | 2.5 |
| Imagen Nítida | 1 | 2.5 | 1 | 2.5 | 1 | 1.25 |
| Imagen con Texto | COSTADO | 2.5 | COSTADO | 2.5 | COSTADO | 2.5 |
| Imagen Sencilla | AMBAS | 2.5 | SENCILLO | 1.25 | GRUESO | 1.25 |
| Gráficas Sencillas | 1 | 2.5 | 1 | 2.5 | 1 | 2.5 |
| Cantidad de Datos | MENOR A 10 | 2.5 | MENOR A 10 | 2.5 | MENOR A 10 | 2.5 |
| Gráficas por Página | 0 | 2.5 | 0 | 2.5 | 0 | 2.5 |
| Número de Párrafos | 10 | 0 | 5 | 1.47 | 8 | 0 |
| Espacio entre Párrafos | 1 | 1.47 | 1 | 1.47 | 1 | 1.47 |
| Alineación de Texto | IZQUIERDA | 0.74 | IZQUIERDA | 0.74 | JUSTIFICADO | 1.47 |
| Sangría en Párrafos | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1.47 |
| Longitud de Título | 4 | 1.47 | 6 | 1.47 | 7 | 1.47 |
| Longitud de Subtítulo | 8 | 1.47 | 5 | 1.47 | 3 | 1.47 |
| Longitud de Párrafo | 55 | 1.47 | 60 | 1.47 | 48 | 1.47 |
| Tamaño de letra Título | 20 | 0.49 | 30 | 1.47 | 26 | 0.98 |
| Tamaño de Letra Subtítulos | 16 | 0.74 | 20 | 1.47 | 19 | 0.74 |

 ISSN en trámite

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tamaño de letra Párrafo | 15 | 1.47 | 15 | 1.47 | 12 | 1.47 |
| Tamaño de Letra | 20 | 2.08 | 20 | 2.08 | 20 | 2.08 |
| Resaltado en Negritas | 1 | 4.16 | 1 | 4.16 | 0 | 0 |
| Uso de Mayúsculas | 1 | 4.16 | 1 | 4.16 | 1 | 4.16 |
| Color de Fondo Adecuado | 1 | 4.16 | 1 | 4.16 | 1 | 4.16 |
| Color de Letra adecuado | 1 | 4.16 | 1 | 4.16 | 1 | 4.16 |
| Tipografía | YOUNG | 0 | ARIAL | 4.16 | TIMES | 4.16 |
| PUNTAJE TOTAL | | 85.93 | | 87.5 | | 88.38 |

En la Tabla 2, se pueden observar los resultados de las mediciones y los porcentajes de importancia obtenidos, los porcentajes están calculados en igual proporción de manera normalizada.

La forma de utilizar la tabla es: primero, obtener el valor del atributo por ejemplo: el dato del valor del atributo alineación de del texto es a la izquierda, segundo, atendiendo a las mediciones de la literatura siendo justificado el mejor valor se obtiene de la normalización de este atributo 1.47 de importancia, alineado a la izquierda un 0.74 de importancia, a la derecha o centrado un 0 puntos de importancia.

Las evaluaciones de estos trabajos se obtuvieron de forma manual y como trabajo futuro se puede implementar una herramienta que los calcule de forma automática. Al contar con las mediciones es fácil determinar el valor de cada atributo. Multiplicando estos valores por el porcentaje correspondiente del valor normalizado de usabilidad se obtiene la importancia de cada atributo. Esta forma de medir los Recursos de Aprendizaje facilita identificar donde falla la calidad de los recursos de aprendizaje al puntuar cero en las importancias de los atributos. Esta tabla o plantilla para la evaluación evita la necesidad de contar con un experto en usabilidad, que a su vez es un recurso humano y un coste superfluo.

## 6. CONCLUSIONES

El modelo de calidad es un modelo extensible que puede agregar otras características. Este trabajo es el complemento perfecto para los trabajos que miden a los objetos de aprendizaje o que miden sus elementos. Las mediciones no son interpretaciones personales de usuarios, son las medidas sugeridas por los expertos en ergonomía, extraídas de trabajos de relacionados y mapeados a sus atributos correspondientes. Como trabajos a futuro se pueden agregar más métricas o algunas otras características.

En las pruebas realizadas se distingue que muchos de los recursos de aprendizaje no usan sangrías en los párrafos y los números de párrafos exceden, ya que se agregan mucha información o varios temas en uno solo, perdiendo así el objetivo para el que fue elaborado. También refleja que los tamaños de letra y los tipos de letra no son los adecuados, esto debido a que las tipografías utilizadas, y por su naturaleza web son muy variadas. Esto es debería ser fácilmente corregido por los autores.

## REFERENCIAS

Alvarez, Marcon Dal Sasso, Iyengar M, Schmitt & Francisco de Andrade. (2018). Análise de qualidade de objeto virtual de aprendizagem para avaliação da dor em enfermagem. Revista Cubana de Enfermería., 34(3), 624-636.

Colomé Cedeño, Estrada Sentí & Febles Rodríguez. (2012). Ambiente tecnológico para la creación de objetos de aprendizaje en apoyo al proceso docente de las universidades cubanas. Acimed., 23(2), 116-129.

CRMF Albacete, 2007, Como elaborar textos de fácil lectura, Consultado 20 de febrero de 2019 Disponible en http://www.cesya.es/sites/default/files/documentos/ cmoelaborartextosdefcillectura.pdf

Escalante Caicedo, A. B. (2019). Modelo para el desarrollo y evaluación de la usabilidad en sistemas de interacción tangible desde la perspectiva del diseño centrado en el usuario. Entorno, (67), 142–156. https://doi.org/10.5377/entorno.v0i67.7488

Fernández-Pampillón Cesteros, Ana María y Domínguez Romero, Elena y Armas Ranero, Isabel de (2012) Herramienta para la revisión de la Calidad de Objetos de Aprendizaje Universitarios (COdA): guía del usuario. v.1.1. [ ] (No publicado)

Ferrando Belart V, La legibilidad: un factor fundamental para comprender un texto, 2004

Ferre Grau (2005). Marco De Integracion De La Usabilidad En El Proceso De Desarrollo De Software. Madrid.

Flores Carola y Vilar Mara Lis. Producción de materiales didácticos para estudiantes con discapacidad visual. 2014, Recuperado: 13 de febrero de 2019 Disponible en: https://www.foal.es/sites/default/files/ docs/17_MDVisual_web.pdf

Fonseca, S. Correa, A., Pineda, M., y Lemus, F. (2011). Comunicación oral y escrita. (1ra ed.). Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

García Ramos Cecilia Elena. Guía de Atención Educativa para Estudiantes con Discapacidad Visual. Instituto de Educación de Aguascalientes, 2012 Recuperado: 13 de febrero de 2019.

Giorgetti, Carlos G.; Romero, Lucila; Vera, Marcela (2013). «Diseño de un modelo de evaluación de la calidad específico para EaD» [artículo en línea]. Revista de Universidad y Sociedad del Conocimiento (RUSC). Vol. 10, n. º 2.pág. 54-68. UOC.

 ISSN en trámite

Hassan, Yusef and Martín Fernández, Francisco J. and Iazza, Ghzala Diseño Web Centrado en el Usuario: Usabilidad y Arquitectura de la Información. Hipertext.net, 2004, n. 2. [Journal article (Unpaginated)]

Hernández Jarvio, Brendali Yeudiel & Velasco-Elizondo, Perla & Benitez-Guerrero, Edgard. (2016). Evaluando Adecuación Funcional y Usabilidad en Herramientas de Composición desde la Perspectiva del Usuario Final. RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao. 96-114. 10.17013/risti.17.96-114.

Iyubanit Rodríguez-Ramírez. (2015). I Incorporación del tema de usabilidad en el diseño de sitios web en el curso de Multimedios. Revista Educación, vol. 39, núm. 2, pp. 27-41, 2015. Universidad de Costa Rica.

JIMDO (2007). Plataforma online para crear páginas web o tienda online. Consultado el 20 de noviembre de 2015. Disponible en http://es.jimdo.com

Juan Luis García-Mendoza, Lisandra Díaz-De la Paz, Luisa González- González, Yaisel Nuñez-Arcia, Amed Abel Leiva-Mederos, 2016 "Herramienta CompMARC para la medición de la completitud de registros bibliográficos en formato MARC 21", 2016,397-407.

Lara Ramírez, Graciela Lizbeth Guisseny. (2020). Usabilidad de recursos educativos de la plataforma Perúeduca y el proceso enseñanza-aprendizaje de los estudiantes de primero de secundaria de la I.E José Carlos Mariátegui Lachira-Monte Castillo. Universidad César Vallejo, PIURA – PERÚ.

M. J. Sánchez Franco, F. J. Rondán Cataluña y Á. F. Villarejo Ramos, (2007), Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa. Núm. 30, 2007, 153-180, * Universidad de Sevilla. Departamento de Administración de Empresas y Marketing, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de Sevilla.

Manual de uso de los signos de puntuación 1. Grupo de Investigación AVI Universidad de Córdoba Ambientes Virtuales Interactivos Basado en: Los signos de puntuación, Ortiz M.; Universidad de Puerto Rico en Aguadilla, 2009.

Marzal, Miguel & Calzada-Prado, F. Javier & Osti, Marina. (2008). Criterios para la evaluación de la usabilidad de los recursos educativos virtuales: Un análisis desde la alfabetización en información.

Mascheroni, M. A. (2012, 6 agosto). Calidad de software e ingeniería de usabilidad. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/19202

McLeanRuari, Manual de tipografía, 1993, Consultado: 20 de febrero de 2019 Disponible en: https://books.google.com.mx/books?id=MHLfZMobAPoC&printsec=frontcover& hl=es#v=onepage&q&f=false

Mejía Castellanos L A 2014 Correlación entre la usabilidad de un OVA y su efectividad como herramienta de enseñanza-aprendizaje IngEam 1 102

Mendoza Fillola Antonio, Didáctica de la lengua y la literatura, 2003, Consultado 20 de febrero de 2019, Disponible en https://books.google.com.mx/books?id=-uIcdQEQnUoC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false

Moreno, J. J., Bolaños, L. P., & Navia, M. A. (2010). Exploración de modelos y estándares de calidad para el producto software. Revista UIS Ingenierías, 9(1), 39–53. Recuperado a partir de

Navia, Manuel Alejandro, & Bolaños, Liliam Paola, & Moreno, Jorge Jair (2010). Exploración de Modelos y Estándares de Calidad Para elProducto Software. Revista UIS Ingenierías, 9(1),39-53.[fecha de Consulta 20 de Junio de 2022]. ISSN: 1657-4583.

Nielsen Jakob, 10 UsabilityHeuristicsforUser Interface Design, 1993, Consultado 20 de febrero de 2019, Disponible en https://www.nngroup.com/articles/ten-usability-heuristics/

Ochoa Bravo Carmen, Las exposiciones: tipos y diseños, 2018, Consultado: 20 de febrero de 2019, Disponible en: https://books.google.com.mx/books?id=oPVKDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage &q&f=false

Toro Córdoba, G. I., (2015). Forma y usabilidad de un recurso educativo ex profeso: Biblioteca digital en Promoción de la Salud. Revista Interamericana de Bibliotecología, 38(1),41-53.[fecha de Consulta 8 de Noviembre de 2022]. ISSN: 0120-0976. Recuperado de: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179033011005.

Torres Auad, Lía Fabiana y Willging, Pedro. Búsqueda y Evaluación de Objetos de Aprendizaje para la enseñanza del Modelado de Bases de Datos. Rev. iberoam. tecnol. educ. educ. tecnol. [online]. 2015, n.16, pp.24-30. ISSN 1851-0086.

UNESCO. (2011). A Basic Guide to Open Educational Resources: Frequently asked questions. (A. Kanwar (COL), & S. Uvalic´-Trumbic´ (UNESCO), Edits.) Obtenido de The Commonwealth of Learning (COL): http:// www.col.org/PublicationDocuments/BasicGuideTo-OER.pdf

Vázquez Travieso Ramón, La estructura de los textos, 2017, Disponible en: https://www.hf.uio.no/ilos/tjenester/kunnskap/ sprak/nettsprak/spansk/lesesal/innforingspansklitteratur/tekster/textosestructura.pdf

Vilarnovo Antonio, Teorías explicativas de la coherencia textual, 1991, Disponible en: http://www.edu.xunta.gal/ centros/ieslauroolmo/ system/files/gramatica_texto.pdf

Wiley, D. (2000). Connecting learning objects to instructional design theory: A definition, a metaphor, and a taxonomy. Learning Technology, 2830, 1-35.

Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada
Volumen 5, Núm. 2, Julio - Diciembre 2022

ISSN en trámite

# DevOps desde la academia y la industria: una revisión sistemática de la literatura

**Yazmin V. Morales*. Blanca D. Valenzuela*.**
**René Santaolaya Salgado*. Mario Guillén Rodríguez**
** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México(e-mail: m21ce063@cenidet.tecnm.mx, blanca.vr@cenidet.tecnm.mx, rene.ss@cenidet.tecnm.mx, mario.gr@cenidet.tecnm.mx)*

**Abstract:** Esta revisión aporta un análisis de las estrategias de adopción DevOps tanto en la industria como en la academia, su convergencia e integración de estas en un trabajo práctico para profesionales de DevOps. Este artículo está desarrollado bajo un proceso y una metodología estándar para la preparación de la revisión de la literatura, se empleó una búsqueda manual en cinco bases de datos donde se utilizó la búsqueda avanzada en línea para identificar los trabajos que tienen como tema principal DevOps, Industria y Academia. El objetivo de este estudio es identificar algunas de las estrategias que han permitido incrementar la experiencia con el trabajo práctico usando DevOps en la industria y academia desde 2014 hasta 2022 utilizando artículos científicos.

***Keywords:*** **Training DevOps, Education, Learning, Teaching Industry or Academy DevOps, DevOps Understanding, DevOps adoption.**

## 1. INTRODUCCIÓN

Se considera que DevOps es una agrupación de prácticas que incluyen el desarrollo de software y las operaciones de tecnologías de la información. Su objetivo es hacer más rápido el ciclo de vida del desarrollo de software y proporcionar una entrega continua de alta calidad. Está fundamentado en una cultura organizacional que implica la colaboración estrecha entre los equipos de desarrollo y el personal de operaciones, para permitir que el proceso de producción de software se realice de una forma más ágil. A través de la automatización y aplicación de herramientas tecnológicas de integración contínua es posible obtener retroalimentación sobre la calidad y seguridad del producto de software. DevOps es un estilo de trabajo y una filosofía que evoluciona de forma constante y que origina un mejor desarrollo de aplicaciones y la publicación contínua y de alta calidad del software. De acuerdo a estudios recientes de Muñoz y Rodriguez (2021) las empresas de software que practican DevOps mejoran su competitividad en el mercado, por lo tanto, mayor presencia en la economía de un país.

En (Muñoz y Rodriguez, 2021; Kuusinen y Albertsen, 2019; Rong et. al, 2017; Fernandes, et. al, 2020) describen el gran desbalance existente entre la oferta laboral para ingenieros de software con capacidades en DevOps y el bajo número de profesionales calificados para desempeñarse en esa área. Sin embargo, se menciona que DevOps está en camino de convertirse en una habilidad requerida para los profesionales de Tecnologías de la Información (TI).

La motivación de este trabajo surge a partir de la necesidad de conocer cuáles son las estrategias utilizadas para la incorporación de DevOps en la industria, así como, aquellas estrategias llevadas a cabo en la academia. De esta manera, es posible poder analizar las tendencias futuras en estos dos entornos.

Esta investigación consta de seis secciones. En la primera sección se aborda el tema de DevOps mediante una breve introducción y algunos de sus antecedentes. En la segunda sección se describe el método de investigación llevado a cabo en este trabajo. En la tercera sección se describen los problemas, soluciones y beneficios, sobre la adopción de DevOps, identificados por medio de la revisión de la literatura. En la cuarta sección se presentan los resultados obtenidos y se responden a las preguntas planteadas. En la quinta sección se detallan las conclusiones y trabajos futuros propuestos. Al final del documento se muestran las referencias bibliográficas de los artículos consultados.

### *1.1 Síntesis histórica de DevOps*

DevOps es el resultado de un compendio de planes de acción a fallas reales identificadas en el proceso del ciclo de vida del software en el sector de producción a nivel industrial (Erich, et. al, 2017) y de una serie de prácticas ágiles que evolucionaron desde el 2007 hasta el 2010, que se consolidaron en un solo concepto conocido como DevOps, paradigma que consta de ocho fases que implican la Integración Continua ( siglas en inglés CI) y el Despliegue Continuo (siglas en inglés CD) Humble y Farley (2010) .

Fue en 2009 en una conferencia de O'Reilly Velocity 09, cuando Johon Allspaw y Paul Hammond en su presentación "+10 Deploy per Day: Dev and Ops Cooperation at Flikr" (Still y Stanhope, 2017), propusieron una alianza para la integración de los equipos de desarrollo y operaciones (de ahí el nombre *DevOps*). Estos equipos trabajaban tradicionalmente de manera aislada e impedían el progreso y ligero desenvolvimiento de proyectos de software, esto animó a Patrick Debois a proponer

 ISSN en trámite

una nueva ideología de convivencia entre equipos. En 2010 Humble y Farley (2010) ampliaron los conceptos DC como una tubería de despliegue e IC, así fue como DevOps se establecería como un conjunto de prácticas y paradigma estratégico de la ingeniería de software además de una cultura y filosofía con un cambio de mentalidad en la convivencia de las personas involucradas en un proyecto (Still y Stanhope, 2017).

## 2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio se desarrolló siguiendo el proceso de investigación descrito en el trabajo de Kitchenham y Charters (2007), para revisiones sistemáticas de la literatura en el área de Ingeniería de Software.

De acuerdo con [8] una revisión sistemática es: *"Un medio para identificar, evaluar e interpretar toda la investigación disponible relevante para una pregunta de investigación en particular, un área temática o un fenómeno de interés"*

### *2.1. Planificación*

El objetivo del presente estudio consiste en presentar el resultado de una revisión sistemática de la literatura (siglas en inglés SLR) en la que se elaboró un análisis con respecto a las estrategias de integración y adoctrinamiento tanto en el sector industrial como académico para DevOps. Estrategias que consideran el trabajo práctico como parte del entrenamiento para la enseñanza; así mismo, se presentan los resultados o progresos que se han reportado conforme a las publicaciones desde el año 2014 hasta el 2022.

Los pasos en el método utilizados para la SLR son:

### *A. Preguntas de investigación*

La presente investigación pretende dar una síntesis del análisis de la bibliografía que trata el tema de la enseñanza del enfoque DevOps en entornos educativos, el adoctrinamiento y capacitación en DevOps en entornos empresariales y los medios o estrategias utilizadas para llevar a cabo esta adopción. Varios trabajos han presentado análisis en ambos entornos pero ha sido de manera independiente, por lo que en este trabajo se busca conocer cómo es la interrelación entre dichas áreas. A continuación, se muestran las preguntas planteadas a las que responde esta investigación.

RQ.2.1). ¿Cuáles son los problemas a los que se enfrenta la industria y la academia durante la adopción de DevOps?

RQ.2.2). ¿Cuáles son las estrategias utilizadas para la adopción de DevOps en la industria y en la academia?

RQ.2.3). ¿Cómo impacta la integración de estrategias didácticas, en instituciones de educación superior, a través del trabajo práctico en la experiencia de profesionales en DevOps?

### *B. Estrategia de búsqueda*

La segunda etapa del método de Kitchenham y Charters, para una SLR es el planteamiento del procedimiento de búsqueda identificando las cadenas de búsqueda necesarias para determinar los términos y conceptos a utilizar para obtener la mejor evidencia y evaluarla de manera crítica. Los elementos de estrategia de búsqueda utilizados son:

**Términos de búsqueda**: Se componen por los sinónimos y términos relacionados con "adopción", "DevOps", "industria", "Academia", "Entendiendo DevOps" y "enseñar". La estrategia fue implementada aplicando los operadores AND y OR con la siguiente estructura: [DevOps Adoptions] OR [ DevOps Case Study] OR [Teaching DevOps] OR [Understanding DevOps] OR [Teaching DevOps in academy] OR [DevOps usages] OR [DevOps in practice] OR [DevOps in practice] AND [DevOps in industry].

**Fuentes de datos**: Se han considerado cinco bases de datos digitales: IEEE Xplore, arXiv, OpenAIRE, British Library Electronic y dblp.

### *C. Criterio de Inclusión / Exclusión*

Para la inclusión se consideraron estudios entre el año 2014 al 2022, artículos de revistas indexadas, estudios primarios, conferencias y trabajos sobre la enseñanza desde la perspectiva de la ingeniería DevOps. Cada artículo debe responder a una o más preguntas de la investigación con datos empíricos sobre DevOps.

Para la exclusión se consideraron documentos como tesis o tesinas, estudios secundarios o terciarios, páginas web, estudios que incluyan DevSecOps, los estudios que se desvían o no se centran en DevOps y en sus estrategias de adopción o si presentan o no datos empíricos para su análisis. Las cuatro etapas para el proceso de inclusión y exclusión son:

**Etapa 1**
Búsqueda automatizada en repositorios científicos: En esta etapa, se usan las cinco fuentes de datos ya mencionadas para encontrar la información relevante de estudios que se basan en las cadenas de búsqueda creadas para el análisis, como se muestra en la Fig.1, en esta etapa se obtuvieron **703 resultados**.

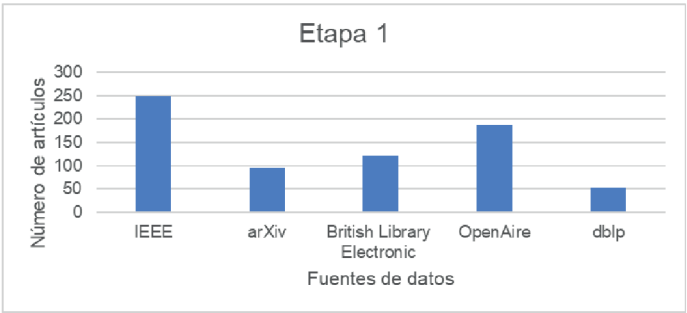



Fig. 1. Número de artículos entrados en la primera etapa

 ISSN en trámite

**Etapa 2.**
Clasificación de los artículos en función del título y las palabras clave: en esta etapa se analizaron los títulos y palabras clave de los artículos para discriminar los trabajos no relevantes. Como resultado se obtuvo un total **de 136 artículos,** como se muestra en la Fig. 2 y que pasaron a la siguiente etapa.

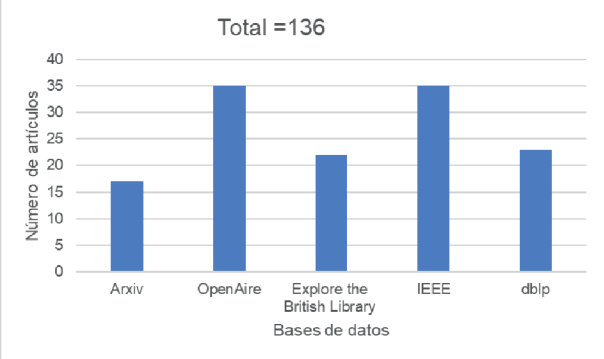



Fig. 2. Número de estudios relevantes por Base de datos

**Etapa 3**
Clasificación de los artículos sobre la base del resumen y la introducción: Para obtener más claridad y comprensión, los estudios recuperados en la segunda etapa se hace una revisión detallada, del título, el resúmen, la introducción y de las conclusiones, para seleccionar los trabajos que hicieran mención sobre la capacitación o instrucción en DevOps en la industria y la academia. Como resultado, en esta etapa se obtuvieron **38 artículos relevantes** clasificados por año y que gráficamente se muestran en la Fig. 3.

Fig. 3. Número de estudios relevantes por año.

**Etapa 4**
Bola de nieve de referencia: La última etapa desempeña un papel importante, ya que esta etapa de filtrado sólo permite incluir los estudios primarios y los estudios evaluados críticamente. Los datos de la Fig. 4 muestran el resultado final de todo el proceso de inclusión y exclusión, quedando un total de **25 artículos** clasificados por los sectores estudiados.

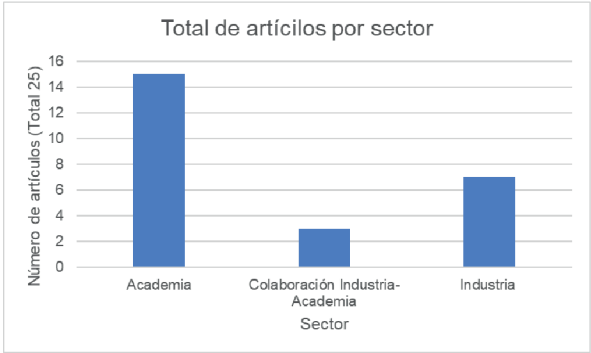



Fig. 4. Número de estudios relevantes por sector.

*D. Evaluación de calidad*

Se establecieron distintos criterios para comprobar la calidad de los artículos de acuerdo a su contenido, de tal manera que solo se obtengan trabajos importantes para esta investigación. Estos criterios fueron: relevancia del contenido orientado hacia las preguntas de investigación, detección del objetivo de cada investigación, claridad y rigor del diseño metodológico y rigor científico en el análisis de los datos.

La calidad evaluada se realizó a través de un proceso de análisis crítico con el propósito de identificar cuáles son los estudios principales, los criterios utilizados están enfocados al análisis de la calidad del informe, la justificación, los objetivos y el contexto de investigación.

## 3. IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS, SOLUCIONES, BENEFICIOS Y COMPETENCIAS DESARROLLADAS

Una vez obtenidos los artículos más relevantes para esta investigación, se realizó un análisis de los diferentes trabajos con el fin de identificar cuáles son los problemas que intentan resolver, las soluciones que proponen, los beneficios que se obtienen al aplicarlas y las posibles competencias desarrolladas.

*A. Clasificación de los artículos*

Para llevar a cabo esta tarea, se realizó una clasificación de las publicaciones siguiendo la taxonomía presentada en (Valentine, 2004) en la que se cuenta con seis categorías: **"Experimental", "Marco Polo", "Filosofía", "Herramientas", "Nifty" y "Jhon Henry"** estas categorías permiten identificar el tipo de estudio encontrado. La Fig. 5 muestra la clasificación de los artículos de acuerdo al análisis realizado.

 ISSN en trámite

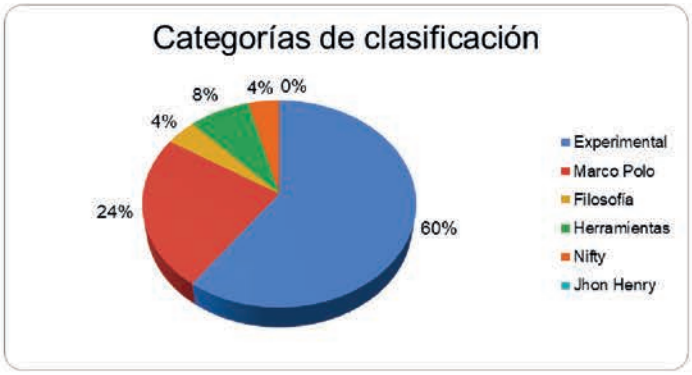



Fig. 5. Artículos publicados por Clasificación de Valentine

Como se puede observar en la Fig. 5, el 60% de los resultados (15 artículos) se centran en estudios categorizados como "Experimental", esto se debe a que los trabajos buscan realizar un análisis de los resultados obtenidos de las soluciones planteadas, el 24% de los trabajos (6 artículos) fueron categorizados como "Marco Polo", esto es porque los estudios han encontrado problemas o soluciones de forma indirecta, 4% de los estudios (1 artículo) se categorizó como "Filosofía", debido a que intentan realizar un análisis de las situaciones que llevan a la generación de problemas al incorporación de DevOps en la industria y la academia. En la categoría de "Herramientas" se identificó el 8% de los estudios (2 artículos), quienes presentan software o aplicaciones que son utilizadas para mejorar el proceso de adopción de DevOps, en la categoría "Nifty" se identificó el 4% de los estudios (1 artículo) que presenta una técnica de trabajo que puede utilizarse en la enseñanza. Por último, en la categoría de "Jhon Henry" no se encontraron estudios que describan cursos difíciles de poner en práctica, por lo que no hay artículos en esta categoría.

### *B. Análisis de los artículos*

Al realizar el análisis de los estudios identificados, se describen problemáticas que se originan en las instituciones e industria. En [P1-P7] se encontró que uno de los problemas más comunes en la enseñanza a través de cursos de DevOps es la falta de planes de estudio adecuados. En la academia se observó que la falta de interés de los alumnos [P1], [P16] la falta de experiencia de los profesores [P17], el uso desmedido de las herramientas y la falta de heterogeneidad [P6], [P3] son el principal motivo por el cual no se ha logrado diseñar una estrategia de enseñanza adecuada para los estudiantes de ingeniería de software en los diferentes grados académicos. Por otro lado, en la industria se observó que, la falta de organización [P21], [P24], [P25] es una de los principales problemas a la hora de intentar adoptar DevOps, así mismo, se identificó que la falta de profesionales capacitados [P22] es una razón de peso por la que se ve disminuido el intento de adoptar DevOps, además, de que los ingenieros de software carecen de competencias y habilidades necesarias para la industria, sin embargo, en algunos casos aislados los problemas suelen ser culturales o políticos como en el caso de [P23] en donde el problema radica en la falta de apoyo de las organizaciones y leyes que permitan la integración de herramientas DevOps en la industria.

En cada uno de los trabajos revisados se propone hacer uso de alguna estrategia para dar solución a esos problemas donde la mayoría de las investigaciones se centran en diseñar y aplicar cursos de enseñanza de DevOps. En la academia suelen darse cursos a diferentes niveles con la finalidad de que los alumnos adquieran habilidades y competencias que pueden ser, el uso de herramientas como Git y GitHub, AWS, Kanban, Codeclimale, SonarQube, entornos de visualización de rendimiento, Docker, Heroku, Sprint, Crunch y el uso de microservicios. Sin embargo, algunas instituciones educativas se enfocan en realizar planes de estudio más atractivos para los estudiantes en los cuales la enseñanza de DevOps se pueda realizar de una manera más práctica e intuitiva. Por otro lado, en la industria, se han utilizado arquitecturas de referencia o técnicas de gamificación para motivar a los trabajadores a tener una mejor comunicación con el equipo de trabajo.

Con los procesos de investigación y las entrevistas a expertos se pretende obtener información más certera acerca de cuáles son las causas y/o soluciones que se encuentran en la industria para mejorar la incorporación de DevOps en sus procesos de desarrollo.

En la Fig 6. se puede observar algunas de las estrategias didácticas para la enseñanza de DevOps en la academia, mencionadas en los artículos consultados.

Fig. 6. Estrategia didáctica aplicada en la academia.

Entre los beneficios obtenidos por las diferentes estrategias didácticas en la academia y la industria se encuentra la adquisición de competencias y habilidades específicas para aumentar las capacidades de los profesionales en DevOps, de igual manera, la aplicación de estas estrategias en la industria, permite el aumento de la productividad, sin embargo, no siempre es suficiente con una capacitación o curso debido a que algunos conocimientos se adquieren con la práctica, la experiencia y la intercomunicación con los equipos de trabajo Muñoz y Rodriguez, 2021.

## 4. RESULTADOS

 ISSN en trámite

Al finalizar el análisis anterior se pudo identificar cual es el panorama actual del DevOps tanto en la academia como en la industria. Los artículos revisados cubren diferentes panoramas de investigación como estudio práctico, informes de experiencias con profesionales del DevOps, diseño de planes de estudio y prácticas con casos reales.

Los trabajos consultados se analizaron revisando el contexto del trabajo, las preguntas de investigación realizadas y la manera en que se presentan los resultados. Los trabajos fueron publicados entre el año 2014 y 2022. A nivel industrial, la capacitación es a través de cursos y la incorporación de nuevas arquitecturas, además, en algunas publicaciones se habla sobre el desafío de mantener la comprensión común entre varios equipos de trabajo. Por otro lado, a nivel académico se habla acerca del poco enfoque que se le da a la parte de operaciones y la gran cantidad de atención que se le pone a la parte de desarrollo [P15], [P12]. Sin embargo, también se realizan mejoras a los planes de estudio y la aplicación de cursos tanto para los docentes como para los estudiantes.

Las preguntas de investigación planteadas se respondieron de la siguiente manera:

RQ.2.1). ¿Cuáles son los problemas a los que se enfrenta la industria y la academia durante la incorporación de DevOps?

En la academia, la falta de programas de estudio que cuenten con las características ideales para atraer la atención de los estudiantes de ingeniería de software [P1], [P4], [P13], [P24], [P17] y la falta de experiencia por parte de los profesores da como resultado una capacitación ineficiente de los alumnos [P5] -[P6] esto a su vez, no permite que los egresados tengan las capacidades suficientes como para enfrentar el mercado laboral [P11], [P13], [P15]. En los artículos consultados es notorio que la falta de motivación por parte de los estudiantes tanto como los métodos de enseñanza, que no siguen el ritmo de los nuevos requisitos de la industria y la falta de experiencia de los profesores, es una barrera para que los estudiantes adquieran las competencias adecuadas para la incorporación de DevOps. Además la falta de un entorno adecuado para el desarrollo de estas habilidades agrava esta situación.

Mientras tanto en la industria no se cuentan con guías específicas que permitan una rápida y eficiente integración de DevOps, además, suelen requerirse modificaciones organizacionales y cambios de mentalidad a los ingenieros de antaño que prefieren realizar sus prácticas como siempre lo han hecho. Al igual que en la academia, la falta de motivación y la falta de experiencia en los equipos no permite una fácil integración de DevOps en la industria.

RQ.2.2). ¿Cuáles son las estrategias utilizadas para la integración de DevOps?

En los artículos analizados se estudian las diferentes estrategias, entre las cuales se encuentra el diseño, aplicación de cursos y planes de estudio académicos que permiten a los estudiantes adquirir nuevas habilidades y competencias tanto intelectuales como sociales [P6-P8, P17, P18], también, se hace uso de herramientas como: Git, Kubernetes, Jenkins, Docker, Canvas, SonarQube, MongoDB, AWS, entre otras. Estas ayudan a los estudiantes y profesionales a incorporarse de una forma más sencilla a las prácticas de DevOps [P9], [P10]. En otros trabajos se emplean arquitecturas de referencia que facilitan la integración de DevOps en la industria. En la Tabla 1 se detalla cuales son las estrategias utilizadas por los investigadores.

Tabla 1. Estrategias utilizadas en las investigaciones.

| Trabajos | Estrategia | Total |
|---|---|---|
| P1-P5, P11-P13, P15, P16, P22 | Curso | 11 |
| P6-P8, P17, P18 | Plan de estudios | 5 |
| P9, P10, P14 | Herramientas | 3 |
| P19, P20 | Arquitecturas de Referencia | 2 |
| P21 | Guía | 1 |
| P24 | Gamificación | 1 |
| P23 | Investigación | 1 |
| P25 | Entrevista con expertos | 1 |
| Total | | 25 |

RQ.2.3). ¿Cómo impacta la integración de estrategias didácticas a través del trabajo práctico en la academia en la experiencia de profesionales en DevOps?

De acuerdo con los artículos revisados, se puede observar que a partir de los nuevos planes de estudio desarrollados, se obtuvieron nuevas habilidades como: la aplicación de IC y DC, monitorización, habilidades intrapersonales, entre otras,. Estas pueden facilitar la incorporación de los estudiantes al mercado laboral, esto es debido a que al realizar trabajo práctico [P1-P5], [P7-P17] con casos reales y en un ambiente de trabajo similar al de la industria, genera en los estudiantes algunas aptitudes que no podrían obtener hasta estar en un ambiente laboral real.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La integración de DevOps en la industria y la academia es un tema muy importante hoy en dia ya que estas dos instituciones están fuertemente unidas por la demanda de profesionales en el área, por un lado la industria requiere de profesionales altamente capacitados, mientras que por el lado de la academia, es necesario que los estudiantes adquieran las competencias necesarias demandadas por la industria.

Se ha observado que a pesar de los esfuerzos realizados por la academia, aún no se cuenta con una estrategia de enseñanza que sea completamente eficiente y que los alumnos siguen optando por aprender los conceptos y técnicas de forma autodidacta, lo que implica que no desarrollen las competencias necesarias por la industria. Por otro lado, la industria no tiene la suficiente participación como para poder ayudar a la academia en

 ISSN en trámite

identificar las competencias, habilidades y destrezas que deben tener los alumnos para llevar a cabo el proceso de desarrollo de software bajo el enfoque DevOps, como consecuencia, se dificulta a los profesores crear planes de estudio adecuados y estandarizados.

Actualmente en la industria se está trabajando con la identificación de las necesidades y tal vez con esto los profesores puedan generar cursos o planes de trabajo adecuados que permitan a los ingenieros de software una rápida incorporación al mercado laboral, disminuyendo la resistencia al cambio por parte de los empleadores.

De esta investigación se concluye que el camino a la integración de DevOps a la industria y la enseñanza de este enfoque se encuentra trazado y con mira hacia el futuro ya que las industrias que han logrado incorporar de manera eficiente y han tenido mejoras en su producción. Sin embargo, como trabajo futuro se propone realizar una investigación de las necesidades principales de la industria que brinden información relevante para generar buenos programas de estudio.

## 6. REFERENCIAS

Muñoz, M. and Rodríguez, M. N. (2021) 'A guidance to implement or reinforce a DevOps approach in organizations: A case study', Journal of Software: Evolution and Process, (June 2020), pp. 1–21. doi: 10.1002/smr.2342.

Kuusinen, K. and Albertsen, S. (2019) 'Industry-academy collaboration in teaching devops and continuous delivery to software engineering students: Towards improved industrial relevance in higher education', Proceedings - 2019 IEEE/ACM 41st International Conference on Software Engineering: Software Engineering Education and Training, ICSE-SEET 2019, pp. 23–27. doi: 10.1109/ICSE-SEET.2019.00011.

Rong, G. et al. (2017) 'DevOpsEnvy: An Education Support System for DevOps', Proceedings - 30th IEEE Conference on Software Engineering Education and Training, CSEE and T 2017, 2017-Janua, pp. 37–46. doi: 10.1109/CSEET.2017.17.

Fernandes, M. et al. (2020) 'Challenges and Recommendations in DevOps Education: A Systematic Literature Review', ACM International Conference Proceeding Series, pp. 648–657. doi: 10.1145/3422392.3422496.

'Computer Science Curricula 2013: Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Science' (2013) Computer Science Curricula 2013: Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Science. doi: 10.1145/2534860.

Erich, F. M. A., Amrit, C. and Daneva, M. (2017) 'A qualitative study of DevOps usage in practice', Journal of Software: Evolution and Process, 29(6), pp. 1–20. doi: 10.1002/smr.1885.

Humble, J. and Farley, D. (2010) Continuous Delivery: Reliable Software Releases through Build, Test, and Deployment Automation, Continuous delivery.

Stanhope, A. S. and P. (2017) DevOps and DNS - Improving Web Application Performance at the DNS Layer, O'Reilly.

Kitchenham, B. and Charters, S. M. (2007) 'Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering, Engineering EBSE Technical Report EBSE-2007-01 Software Engineering Group School of Computer Science and Ma', (October 2021).

David W Valentine. 2004. CS educational research: a meta-analysis of SIGCSE technical symposium proceedings. ACM SIGCSE Bulletin 36, 1 (2004), 255–259.

## LISTA DE ARTÍCULOS PRIMARIOS

[P1] M. Devare, "Amalgamation of Indirect Gamification Into Development and Operations (Devops) Course Teaching," Inf. Technol. Learn. Tools, vol. 87, no. 1, pp. 124–138, 2022, doi: 10.33407/itlt.v87i1.4619.

[P2] Devare, M. (2022) 'Amalgamation of Indirect Gamification Into Development and Operations (Devops) Course Teaching', Information Technologies and Learning Tools, 87(1), pp. 124–138. doi: 10.33407/itlt.v87i1.4619.

[P3] Bobrov, E. et al. (2019) 'Teaching DevOps in academia and industry: reflections and vision', ArXiv, pp. 1–15.

[P4] Christensen, H. B. (2016) 'Teaching devops and cloud computing using a cognitive apprenticeship and story- Telling approach', Annual Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education, ITiCSE, 11-13-July, pp. 174–179. doi: 10.1145/2899415.2899426.

[P5] Jennings, R. A. K. and Gannod, G. (2019) 'DevOps - Preparing Students for Professional Practice', Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE, 2019-Octob(October 2019). doi: 10.1109/FIE43999.2019.9028598.

[P6] B, J. B., Jim, M. and Jim, M. (2018) 'DevOps ' 18 Education Panel Teaching Feedback and Challenges Invited Talk by Benoit Combemale', 1, pp. 221–226..

[P7] Chatley, R. and Procaccini, I. (2020) 'Threading DevOps Practices through a University Software Engineering Programme', 2020 IEEE 32nd Conference on Software Engineering Education and Training, CSEE and T 2020, pp. 90–94. doi: 10.1109/CSEET49119.2020.9206211..

[P8] Hills, M. (2020) 'Introducing DevOps Techniques in a Software Construction Class', 2020 IEEE 32nd Conference on Software Engineering Education and Training, CSEE and T 2020, pp. 85–89. doi: 10.1109/CSEET49119.2020.9206183.

[P9] Angara, J., Prasad, S. and Sridevi, G. (2020) 'DevOPs project management tools for sprint planning, estimation and execution maturity', Cybernetics and Information Technologies, 20(2). doi: 10.2478/cait-2020-0018.

[P10] Christensen, H. B. (2018) 'Crunch: Automated assessment of microservice architecture assignments with formative feedback', Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), pp. 175–190. doi: 10.1007/978-3-030-00761-4_12.

[P11] Helsinki, J. K. and Kousa, J. (2020) 'Teaching Container-based DevOps Practices in Higher Education Context', Springer.

[P12] Christensen, H. B. (2016) 'Teaching devops and cloud computing using a cognitive apprenticeship and story- Telling approach', Annual Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education, ITiCSE, 11-13-July, pp. 174–179. doi: 10.1145/2899415.2899426.

[P13] Rong, G. et al. (2017) 'DevOpsEnvy: An Education Support System for DevOps', Proceedings - 30th IEEE Conference on Software Engineering Education and Training, CSEE and T 2017, 2017-January, pp. 37–46. doi: 10.1109/CSEET.2017.17..

 ISSN en trámite

[P14] Ohtsuki, M. and Kakeshita, T. (2019) 'Utilizing software engineering education support system ALECSS at an actual software development experiment: A case study', CSEDU 2019 - Proceedings of the 11th International Conference on Computer Supported Education, 2(Csedu), pp. 367–375. doi: 10.5220/0007723203670375.

[P15] Benni, B. et al. (2019) 'Teaching devops at the graduate level: A report from polytech nice sophia', Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 11350 LNCS, pp. 60–72. doi: 10.1007/978-3-030-06019-0_5.

[P16] Kuusinen, K. and Albertsen, S. (2019) 'Industry-academy collaboration in teaching devops and continuous delivery to software engineering students: Towards improved industrial relevance in higher education', Proceedings - 2019 IEEE/ACM 41st International Conference on Software Engineering: Software Engineering Education and Training, ICSE-SEET 2019, pp. 23–27. doi: 10.1109/ICSE-SEET.2019.00011.

[P17] Pang, C., Hindle, A. and Barbosa, D. (2020) 'Understanding DevOps Education with Grounded Theory', Proceedings - 2020 ACM/IEEE 42nd International Conference on Software Engineering: Companion, ICSE-Companion 2020, pp. 260–261. doi: 10.1145/3377812.3390808.

[P18] Y. Teklehaimanot, J.Mihajlović Milićević, M. R. (2021) 'Embedding The Principles And Practices Of Devops Into The It Education', European Project Management Journal, 11(1), pp. 3–12.

[P19] Silva, M. A. et al. (2018) 'Productivity gains of DevOps adoption in an IT team: A case study', Proceedings of the 27th International Conference on Information Systems Development: Designing Digitalization, ISD 2018.

[P20] Ghantous, G. B. and Gill, A. Q. (2018) 'DevOps reference architecture for multi-cloud IOT applications', in Proceeding - 2018 20th IEEE International Conference on Business Informatics, CBI 2018. doi: 10.1109/CBI.2018.00026.

[P21] Muñoz, M., Negrete, M. and Arcilla-Cobián, M. (2021) 'Using a platform based on the basic profile of iso/iec 29110 to reinforce devops environments', Journal of Universal Computer Science, 27(2). doi: 10.3897/jucs.65080.

[P22] Mazzara, M. et al. (2018) 'Teaching devops in corporate environments: An experience report', Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 11350 LNCS, pp. 100–111. doi: 10.1007/978-3-030-06019-0_8.

[P23] Yang, Dawei et al. (2020) 'DevOps in practice for education management information system at ECNU', Procedia Computer Science, 176, pp. 1382–1391. doi: 10.1016/j.procs.2020.09.148.

[P24] Ayoup, P., Costa, D. E. and Shihab, E. (2022) Achievement Unlocked: A Case Study on Gamifying DevOps Practices in Industry, Proceedings of ACM Conference (Conference'17). Association for Computing Machinery. Available at: http://arxiv.org/abs/2208.05860.

[P25] Azad, N. (2022) 'Understanding DevOps critical success factors and organizational practices', Proceedings - 5th International Workshop on Software-Intensive Business: Towards Sustainable Software Business, IWSiB 2022, pp. 83–90. doi: 10.1145/3524614.3528627.

 ISSN en trámite

# Breve revisión de la literatura en aprendizaje automático aplicado al análisis de las estructuras de diferentes anticuerpos

Manuel Erazo-Valadez, Yasmín Hernández, Javier Ortiz
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico/CENIDET, Cuernavaca, México
(d20ce059, yasmin.hp, javier.oh)@cenidet.tecnm.mx

**Resumen:** Algunos seres vivos cuentan con un sistema inmune adaptativo que tiene la capacidad de poder eliminar infecciones con una mayor eficiencia en comparación con la respuesta que tiene el sistema inmune innato. Una de las moléculas emblemáticas del sistema inmune adaptativo son los anticuerpos, se componen por dos cadenas pesadas que son idénticas y dos cadenas ligeras que de igual manera son idénticas y que están unidas por varias interacciones no covalentes y por enlaces de disulfuro. Los métodos de aprendizaje automático se han vuelto cada vez más populares para la predicción de la estructura de proteínas y los problemas de diseño. En este trabajo se realizó una revisión de la literatura en donde se utilizan diferentes enfoques del aprendizaje automático para predecir características estructurales de los anticuerpos.

*Palabras clave:* Anticuerpos, Aprendizaje automático, Repositorios de anticuerpos, Estructura de anticuerpos

## 1. INTRODUCCIÓN

Todos los vertebrados cuentan con un sistema inmune adaptativo que tiene la capacidad de eliminar infecciones con una mayor eficacia en comparación con la respuesta que tiene el sistema inmune innato. La respuesta del sistema inmune adaptativo depende de funciones de reconocimiento específico de antígenos de linfocitos B y T. Una de las moléculas emblemáticas del sistema inmune adaptativo son los anticuerpos y los receptores de células T (Janeway Jr, 2001).

Los anticuerpos son las proteínas encargadas de reconocer y neutralizar sustancias extrañas para el organismo, por ejemplo, los virus y las bacterias. La estructura de los anticuerpos se compone por dos cadenas pesadas idénticas y dos cadenas ligeras idénticas que están unidas por interacciones no covalentes y por enlaces de disulfuro (Kindt, Goldsby and Osborne, 2007).

El estudio de los anticuerpos ha tenido un gran efecto en el área médica para el tratamiento de enfermedades. El análisis de la estructura de los anticuerpos ha tomado gran importancia en el desarrollo de anticuerpos monoclonales (mAb) que representan uno de los grupos terapéuticos de mayor interés en el desarrollo farmacológico. En la actualidad, los mAb representan unos de los grupos terapéuticos en la industria farmacéutica que crece a gran velocidad y la mayor clase de proteínas terapéuticas existente (Casellas Gibert et al., 2019).

El éxito que tienen las terapias que se basan en mAb se atribuye a su alta afinidad y selectividad para una gran variedad de antígenos, a la capacidad de modular las propiedades intrínsecas de los anticuerpos para aplicaciones terapéuticas, y a la tolerancia que tienen a la toxicidad de los antígenos (Casellas Gibert et al., 2019).

Los métodos de aprendizaje automático se han vuelto cada vez más populares para la predicción de la estructura de proteínas y los problemas de diseño. Para los anticuerpos se ha utilizado para predecir la capacidad de desarrollo, mejorar la humanización, generar bibliotecas de secuencias, tasa de plegamiento, clases de enzimas, sitios de unión funcionales y para predecir las interacciones con el antígeno (Ruffolo, Sulam and Gray, 2022).

En este trabajo se presenta una revisión de la literatura en donde se utilizan distintos enfoques de aprendizaje automático para predecir características de la estructura de los anticuerpos. Los modelos utilizan las secuencias de las cadenas pesadas y ligeras que componen a los anticuerpos.

## 2. ANTECEDENTES

En esta sección se abordan los principales conceptos que se utilizan en este trabajo.

### *2.1 Anticuerpos*

Los anticuerpos se componen por dos cadenas pesadas (IgH) idénticas y por dos cadenas ligeras (IgL) idénticas. Cada cadena ligera se encuentra unida a una cadena pesada por interacciones no covalentes y por enlaces de disulfuro. De las cadenas IgL se pueden distinguir dos tipos: lambda (λ) y kappa (κ) (Schroeder Jr and Cavacini, 2010).

Los anticuerpos pueden dividirse funcionalmente en dos partes, una de ellas es la región variable, que se encuentra en el amino terminal, es la parte encargada de reconocer y de adherirse a los antígenos. La otra parte de los anticuerpos es la región constante, que es la encargada de determinar el isotipo y las funciones efectoras (Schroeder Jr and Cavacini, 2010).

A nivel de aminoácidos, la variabilidad de la región variable no tiene una distribución uniforme, sino que se concentra en algunos segmentos, que son llamados dominios o asas hipervariables. A estos dominios se les denomina con mayor frecuencia como Regiones Determinantes de

 ISSN en trámite

Complementariedad (CDR). Las cadenas pesadas y ligeras tienen tres segmentos CDR (CDR1, CDR2 y CDR3). Cuando las cadenas pesadas y ligeras están pareadas, las asas hipervariables de cada cadena se unen y crean un sitio hipervariable único, el cual será el sitio de unión con el antígeno (Schroeder Jr and Cavacini, 2010).

La cadena pesada y la cadena ligera contienen una región variable codificada por más de un segmento génico. En el caso de la IgH, la región variable es codificada por tres segmentos génicos V, D, y J, mientras que en IgL, es codificada sólo por dos segmentos génicos V y J (Schroeder Jr and Cavacini, 2010).

### *2.2 Repositorios de datos de anticuerpos*

En esta sección se describen algunos de los repertorios de datos de anticuerpos más utilizados en investigaciones de estructura de anticuerpos en las que se utiliza aprendizaje automático.

#### *2.1.1 Observed Antibody Space*

El repertorio de datos *Observed Antibody Space* (OAS), es un proyecto que ha recopilado y anotado repertorios de anticuerpos. Actualmente contiene más de mil millones de secuencias, de más de 75 estudios diferentes. Estos repertorios cubren diversos estados inmunológicos, organismos (principalmente humanos y ratones) e individuos. OAS contiene 172,723 secuencias de anticuerpos. En OAS se especifica información de las secuencias en nucleótidos, incluida la región constante, el isotipo y la línea germinal anotada (Olsen, Boyles and Deane, 2022).

En la sección de cadenas emparejadas OAS contiene 121,838 pares de secuencias de pacientes infectados por el virus SARS-CoV-2 (Olsen, Boyles and Deane, 2021).

En este repertorio de datos para cada una de las secuencias de cadenas pesadas y ligeras se especifica información de la secuencia en nucleótidos, se proporciona la secuencia en aminoácidos, el isotipo y la línea germinal anotada (Schneider, Raybould and Deane, 2022).

#### *2.1.2 Structural Antibody Database*

El repositorio de datos *Structural Antibody Database* (SAbDab), que ha sido construido por *Oxford Protein Informatics Group* (OPIG), contiene datos de estructuras de anticuerpos y es actualizada semanalmente. Cada estructura tiene una serie de propiedades que incluyen detalles experimentales, nomenclatura de anticuerpos (p. ej. Emparejamiento de cadenas pesadas y ligeras) (Schneider, Raybould and Deane, 2022).

Las estructuras que se encuentran en SAbDab cuentan con los siguientes datos: nombre, especie, método experimental de resolución, secuencia de aminoácidos, secuencias de los CDR, las cadenas pesadas y ligeras de los anticuerpos, tipo de antígeno y en algunos casos el valor de afinidad de unión al antígeno (Schneider, Raybould and Deane, 2022).

En este repositorio cada uno de los conjuntos de datos contiene: las cadenas pesadas y ligeras, la cadena del antígeno, tipo de antígeno, especie del antígeno y el organismo de las moléculas (Schneider, Raybould and Deane, 2022).

### *2.2 Minería de datos*

La minería de datos se define como el proceso de descubrimiento de nuevas y significativas relaciones, patrones y tendencias al examinar grandes cantidades de datos (Pérez López and Santin González, 2007).

La disponibilidad de grandes cantidades de datos y el uso de herramientas informáticas, ha provocado una transformación en el análisis de datos. Las técnicas de minería de datos realizan el descubrimiento automático del conocimiento que se encuentra en la información almacenada ordenadamente en grandes bases de datos.

Existen varios tipos de minería de datos que se pueden utilizar según las características que tiene la información contenida en la base de datos. La minería de datos se puede dividir en dos partes según las técnicas utilizadas: Técnicas predictivas y las técnicas descriptivas.

### *2.3 Aprendizaje automático*

El aprendizaje automático (*machine learning*), es un subcampo de las ciencias de la computación y también de la inteligencia artificial, y se centra en el proceso por el cual las computadoras reconocen patrones, generan la capacidad de aprender y realizan predicciones basadas en los datos (Witten, Frank and Mark A. Hall, 2011).Con más datos y experiencia, los resultados del aprendizaje automático son más precisos, similar a los humanos en la capacidad de mejorar con la práctica y conocimiento que van adquiriendo.

Los algoritmos de aprendizaje automático se agrupan según sus características en función a la salida que genera cada uno de los algoritmos. Algunos de estos grupos son los siguientes:

Aprendizaje supervisado. El algoritmo produce una función que establece una correspondencia entre las entradas y las salidas deseadas. El aprendizaje supervisado resuelve problemas conocidos y utiliza un conjunto de datos etiquetado para entrenar un algoritmo para realizar tareas específicas.

Este tipo de aprendizaje automático permite que los algoritmos “aprendan” de datos de entrenamiento y los apliquen a entradas desconocidas. Algunos ejemplos de algoritmos son: los árboles de decisión, bosques aleatorios, entre otros.

Aprendizaje no supervisado. Este tipo de algoritmos infieren patrones en un conjunto de datos sin referencia a resultados conocidos o etiquetados. Estos algoritmos están dedicados a las tareas de agrupamiento, donde su objetivo es encontrar grupos similares dentro del conjunto de datos. Algunos ejemplos de estos algoritmos son: k-means, DBSCAN, entre otros.

 ISSN en trámite

## 3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

En esta sección se habla de investigaciones que reflejan una importancia para la investigación realizada en este artículo.

En el trabajo (Chen et al., 2020), los autores mencionan que se utiliza el aprendizaje automático para predecir la capacidad de desarrollo de los anticuerpos, solo utilizando características de incrustación y fisicoquímicas de la secuencia del anticuerpo. En el trabajo los autores mencionan que utilizaron datos de anticuerpos recopilados de la plataforma SAbDab. El conjunto de datos inicial fue de 3,816 anticuerpos, pero sólo se conservaron 2,426 anticuerpos que cumplieron con las siguientes características: 1) Tener archivos de estructura de secuencia (FASTA) y archivos de estructura del banco de proteínas (PDB). 2) Que se cuente con la cadena pesada y ligera del anticuerpo. 3) Tienen una estructura cristalina con resolución < 3Å.

Los autores mencionan que utilizaron un valor llamado índice de desarrollo (DI), utilizando solo las regiones variables de las cadenas pesadas y ligeras de los anticuerpos. Para calcular los valores de DI de anticuerpos se utilizó *calculate DI*, parte de Pipeline pilot de BIOVIA, sistema utilizado para procesar y analizar datos. A pesar de que los valores DI son continuos los autores optaron por dirigir el problema como un problema de clasificación y no como un problema de regresión. En el trabajo se menciona que se tomó esta decisión porque la tarea de predicción es más fácil y es más resistente a los datos con ruido.

Los datos de los anticuerpos se etiquetaron utilizando el DI se establecieron umbrales para el valor DI, con el 20% inferior como desarrollable y el 80% superior como no desarrollable. Además de utilizar el DI como entrada para los modelos de aprendizaje automático, los autores mencionan que también se utilizaron 9 características fisicoquímicas basadas en secuencias completas: punto isoeléctrico, peso molecular, peso residual promedio, carga, coeficiente de extinción molar, coeficiente de extinción molar del puente de cistina e improbabilidad de expresión en la inclusión.

Los autores utilizaron *Scikit-learn* para evaluar una línea de base (genera predicciones respetando la distribución de clases del conjunto de entrenamiento) y seis modelos (reales). Para entrenar y evaluar los modelos se usó divisiones estratificadas de prueba de tren. Los hiperparámetros se ajustaron utilizando validación cruzada estratificada con 10 repeticiones. Los hiperparámetros que se usaron fueron aleatorios y se seleccionó el conjunto en función de la puntuación f1 score. Los resultados muestran que el DI de los anticuerpos es predecible utilizando el aprendizaje automático. Pero se advierte que se debe de tener cuidado al usarlo porque se pueden ignorar algunos indicadores de desarrollo.

En el trabajo se menciona como resultado de utilizar un conjunto de datos relativamente pequeño de 2,426 registros, los modelos desarrollados en este trabajo tuvieron un sobreajuste a los datos de entrenamiento y generalizaron mal.

En el trabajo (Marks et al., 2021), los autores mencionan que la humanización de anticuerpos tiene como objetivo producir terapias de anticuerpos que no provoquen una respuesta inmune y sean seguras para ser utilizadas en los humanos, pero sin afectar la eficacia que tiene el anticuerpo al combatir algún tipo de antígeno. La humanización se realiza comúnmente con un proceso experimental de prueba y error (Marks et al., 2021).

Los autores utilizaron los modelos para desarrollar una herramienta computacional que puede humanizar sistemáticamente las secuencias VH y VL de interés, al sugerir mutaciones se incrementa la humanidad.

Todas las secuencias de VH y VL de IgG utilizadas en este proyecto se descargaron de la base de datos OAS. Las secuencias humanas se dividieron según el tipo de gen V, por ejemplo, V1-V7 para secuencias VH. El conjunto de datos se limpió siguiendo los siguientes criterios: se eliminaron las secuencias redundantes, las secuencias con errores de cisteína y las secuencias que tenían residuos del marco faltantes (residuos que preceden al CDR1). El conjunto de datos que se utilizó incluía más de 65 millones de secuencias no redundantes y 13 millones de secuencias no humanas.

Los modelos de aprendizaje automático se entrenaron utilizando la biblioteca Scikit-*learn* con parámetros predeterminados. Los modelos RF para cada tipo de gen V se entrenaron con su conjunto de datos respectivo de secuencias de genes V y el conjunto completo de secuencias negativas. Se entrenaron clasificadores separados para cada tipo de gen V. Los autores utilizaron el 80% del conjunto de datos para el entrenamiento, 10% para validación y el último 10% para prueba. Para evaluar los modelos utilizaron la capacidad para distinguir correctamente las secuencias humanas de un tipo de gen V específico de las que se originan en otras especies.

Los autores tomaron la decisión de construir diferentes clasificadores para cada tipo de gen V fue porque después de realizar un análisis de componentes principales se (PCA) se determinó que existe una agrupación de secuencias por su respectivo gen V.

Los resultados muestran que los modelos tienen un rendimiento que logra un área bajo la curva ROC cercano a 1. Pero con este tipo de modelos se tienen que analizar los resultados porque puede existir un sobreajuste de los datos de entrenamiento.

Los autores (Abhinandan and Martin, 2010a) realizan un análisis del grado de variabilidad observado en estructuras de anticuerpos conocidos utilizando un enfoque de aprendizaje automático para predecir el ángulo de empaquetamiento de las zonas variables de las cadenas pesadas y ligeras de los anticuerpos. En el trabajo se mencionan las principales aplicaciones del trabajo son: 1) El modelado de anticuerpos para predecir el ángulo de empaquetamiento correcto. 2) Identificar los residuos de interfaz clave que son importantes para determinar el ángulo de empaquetamiento y mejorar la humanización de anticuerpos.

 ISSN en trámite

En el trabajo utilizaron un conjunto de datos de regiones FV de anticuerpos y se analizó la distribución de los ángulos de empaquetamiento VH/VL. Se utilizaron redes neuronales artificiales para predecir el ángulo de empaquetamiento de los residuos de la interfaz y se realizó una selección de características utilizando algoritmos genéticos (GA) para seleccionar los conjuntos de residuos de la interfaz más informativos.

Durante el desarrollo y entrenamiento del GA, lo evaluaron utilizando una validación cruzada de 5 repeticiones y el rendimiento general se promedió sobre las 5 repeticiones. El rendimiento final se evaluó utilizando Jack-knifing, que es una técnica de validación cruzada para estimar el sesgo de un estimador en donde se incluye la estimación de la varianza.

Los puntajes promedio y mejores aumentan después de las primeras 150 generaciones y luego se estabilizan para las generaciones restantes. La mejor puntuación del error cuadrático medio (RMSE) es de 0.833.

Los autores del trabajo (Boughter et al., 2020) se centran en el fenómeno de la polirreactividad, que se refiere cuando un anticuerpo mantiene un nivel basal adicional de baja afinidad y una amplia reactividad a diversos epítopos. En este trabajo se utilizó una base de datos con más de 1000 secuencias de anticuerpos polirreactivos y no polirreactivos, se desarrolló una tubería informática para aislar los determinantes clave de la polirreactividad. Algunos de los determinantes clave que fueron tomados en cuenta por los autores son: el aumento en la diafonía entre bucles y un apego a la superficie de unión neutra.

Los autores mencionan que utilizaron el análisis discriminante lineal (LDA), que es un algoritmo que comúnmente se utiliza en problemas de clasificación. LDA reduce la dimensionalidad de un conjunto de datos utilizando una combinación lineal de las dimensiones originales.

Al aplicar LDA se menciona que se extrajeron directamente los pesos lineales de cada componente que integra el discriminante lineal y así revelando cuáles son las propiedades biofísicas en cada posición de los CDR´s que distinguen entre las dos poblaciones.

Las características utilizadas como resultado del LDA son: la carga, la hidrofobicidad, la propensión a la hélice α y la etiqueta que indica si el anticuerpo es polirreactivo o no.

Los autores realizaron un análisis de correlación junto con diferencias promedio máximas para analizar las características de entrada, y se implementó una máquina de soporte vectorial (SVM) para general el clasificador a partir de las características. El clasificador es capaz de identificar anticuerpos polirreactivos que obtuvieron más del 75% de precisión.

Los autores (Long, Jeliazkov and Gray, 2019), utilizan de aprendizaje automático llamado Potenciación del gradiente (GBM), para trabajar los grupos estructurales de CDR que no son H3 solo utilizando la secuencia de las cadenas de los anticuerpos. El método GBM simplifica la selección de características y puede utilizar nuevos datos de manera sencilla.

Los modelos GBM reducen los errores en las clasificaciones de miembros de clústeres específicos cuando tienen datos relativamente abundantes.

Existen tres principales problemas en el modelado de anticuerpos que son: 1) modelado de la homología de las regiones marco de las cadenas pesadas y ligeras, 2) modelado de la homología de los bucles de CDR que no son H3 y 3) modelado de novo del bucle de CDR-H3.

Los bucles de CDR no redundantes se obtuvieron del repertorio de datos PyIgClassify. Esta base de datos contiene estructuras de anticuerpos del PDB con una resolución mínima de 2.8 Å y un límite de factor R de 0.3. El conjunto de bucles CDR canónicos no redundantes se dividen por tipo y longitud de bucle. El conjunto de datos contiene 3,558 bucles de 1,153 estructuras distintas de anticuerpos.

Los autores implementaron los métodos blindBLAST y GB, para realizar la predicción de la clase estructural de CDR. blindBLAST identifica bucles de CDR no H3 de plantilla a través de una búsqueda BLAST contra CDR de la misma longitud y tipo.

Para los dos modelos implementados, los autores identificaron un caso de error cuando el clúster de consulta no coincidía con el clúster previsto. El número de casos de error y la precisión correspondiente se calcularon para cada ciclo y tipo de longitud para cada repetición y luego se promediaron sobre las tres repeticiones.

Los autores compararon los resultados de la clasificación que se obtuvieron al utilizar GBM con los de blindBLAST en un esquema de validación cruzada de 10 repeticiones y tres repeticiones en la base de datos de anticuerpos con anotaciones en grupo PyIgClassify. Se obtuvo un mejor resultado al utilizar el GBM en la precisión de la clasificación de los bucles de 84.5%.

Los autores (Egaji et al., 2020) mencionan que utilizaron una codificación de secuencias basadas en la ubicación de aminoácidos como técnicas de extracción de características para identificar moléculas de anticuerpos de cadena única que se unen a un antígeno estimulador.

Las secuencias de aminoácidos del anticuerpo y del antígeno como entrada para el modelo de aprendizaje automático. El problema lo abordaron como un problema de clasificación binaria, ya que el modelo predice si una molécula de anticuerpo monocatenario se une al antígeno estimulador de linfocitos B (BLyS).

Los autores explican que los datos utilizados se tomaron manualmente del texto de la patente europea (EP2275449B1), los autores de la patente formularon los datos mediante la visualización de fagos para identificar moléculas de anticuerpos de cadena sencilla que se une a BLyS. Los datos consisten en

 ISSN en trámite

varias secuencias de proteínas contra el antígeno BLyS.El conjunto de datos contaba con 2,103 anticuerpos únicos con 298 características.

Los autores presentan que se implementaron seis modelos de clasificación: regresión logística, KNN, SVM, Naive Bayes y , bosques aleatorios.

Los algoritmos se evaluaron utilizando distintas características de rendimiento: exactitud, precisión, recall y F-score. El modelo con mayor rendimiento fue , bosques aleatorios, en comparación con los otros cuatro modelos implementados.

En este estudio (Bachas et al., 2022), los autores demuestran la capacidad para mejorar la afinidad de unión de un anticuerpo por su antígeno utilizando modelos de lenguaje contextual profundo y métodos cuantitativos, datos de afinidad de unión experimental de alto rendimiento .

Muestran que los modelos pueden predecir cuantitativamente las afinidades de unión de variantes de anticuerpos invisibles con alta precisión, permitiendo proyecciones virtuales y aumentando el espacio de secuencia accesible por órdenes de magnitud. En este sentido, el modelo entrenado puede servir como un oráculo, asignando funciones de solo secuencia.

Los autores mencionan que confirmaron predicciones y diseños consecuentes en el laboratorio, con una tasa de éxito mucho mayor que la que se lograría con la detección tradicional. Demuestran que su ensayo de enriquecimiento celular especifico de la actividad (por su siglas en inglés, ACE), un método basado en el clasificación de células activadas por fluorescencia (por sus siglas en inglés, FACS) y secuenciación de próxima generación.

ACE es un poderoso complemento para los modelos de aprendizaje profundo, proporcionando el rendimiento y la fidelidad necesarios para modelar con precisión los anticuerpos afinidad de unión con hasta cuatro/cinco mutaciones en dos CDR en un solo experimento. El ensayo ACE ofrece ventajas sobre los métodos existentes para el interrogatorio de variantes de anticuerpos a gran escala, como Tite-Seq, SORTCERY y Exhibición de fagos. En primer lugar, el ensayo ACE utiliza la cepa B de E. coli SoluProTM para expresar anticuerpos intracelularmente de forma soluble, evitando los artefactos de unión asociados con los formatos de visualización en superficie.

ACE es un verdadero método de detección donde todas las variantes son medido independientemente de la fuerza de afinidad, a diferencia de los métodos de selección, como el fago pantalla, donde solo se aíslan preferentemente los aglutinantes de alta afinidad. Dado que solo una pequeña fracción de secuencias de anticuerpos son detectados en la naturaleza dentro del enorme espacio de la combinatoria; hay >108 secuencias únicas de alta calidad en el Base de datos de la OEA frente a más de 10120 secuencias de CDR únicas posibles durante el período más largo reportaron secuencias humanas.

1060 La solución que los autores presentan aplica a modelos entrenados tanto en datos de naturalidad como de afinidad, cuya intersección permite efectivamente la evaluación de un espacio en blanco más grande de secuencias de lo que se puede evaluar físicamente, al mismo tiempo que se centra la detección en los factores "naturales" más relevantes.

## 4. MODELOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO PARA EL ANÁLISIS DE ANTICUERPOS

Después de haber realizado la investigación sobre los distintos enfoques del aprendizaje automático en el análisis de la estructura de los anticuerpos, se decidió trabajar con el problema del emparejamiento de las cadenas pesadas y ligeras que componen la estructura de los anticuerpos. La diversidad combinatoria de los segmentos genéticos que codifican las regiones variables de las cadenas pesadas y ligeras es el proceso más importante en la creación de la diversidad en los anticuerpos. Para la generación de la región variable de la cadena pesada en el genoma humano se cuenta con 46 segmentos V, 23 segmentos D y 6 segmentos J.

El estudio del acoplamiento de las cadenas pesadas y ligeras tiene una gran importancia en el entendimiento del funcionamiento del sistema inmune adaptativo. Al utilizar las herramientas de secuenciación masiva se ha descubierto que dichas cadenas cuentan con una región variable y una región constante. La región variable es la encargada de realizar al acople con los antígenos para identificarlos y posteriormente el sistema inmune los elimine.

En la actualidad el costo computacional de las soluciones utilizadas para analizar el proceso de emparejamiento de cadenas, ocasiona que el desarrollo de los anticuerpos monoclonales tome demasiado tiempo, retrasando investigaciones de tratamientos de enfermedades infecciosas en los que se podrían utilizar. De manera que se propone el desarrollo de un modelo de aprendizaje automático que proporcione el emparejamiento de las cadenas pesadas y ligeras de un anticuerpo. El modelo de aprendizaje automático tendrá como entrada una de las cadenas ligeras y como resultado se obtendrá la cadena pesada que tenga mejor relación con la cadena de entrada.

Se plantea utilizar diferentes conjuntos de datos de estructuras de anticuerpos anti-SARS.COV-2 extraídos del repositorio de datos OAS. De los cuales se extraerán las secuencias de las cadenas pesadas y ligeras.

La Figura 1 muestra el diagrama de la propuesta de solución, en donde se tiene como entrada el conjunto de datos de los anticuerpos. La solución se divide en dos etapas:

Preprocesamiento de los datos. en donde se utilizarán distintas técnicas para preparar los datos y así poder aumentar la eficiencia del modelo de aprendizaje automático. Algunas de las técnicas que se propone utilizar son el análisis exploratorio de los datos y la reducción de la dimensionalidad.

Desarrollo del modelo. para esta etapa se propone seleccionar e implementar distintos algoritmos de aprendizaje automático que

 ISSN en trámite

se acoplen a los datos, comparar los rendimientos de los distintos algoritmos, seleccionar el algoritmo con mejor rendimiento, para evaluarlo utilizando un nuevo conjunto de datos y a si obtener el modelo del emparejamiento de las cadenas pesadas y ligeras.

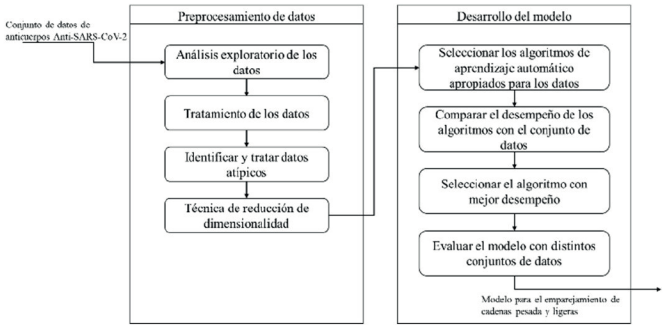



Figura 1: Propuesta de solución

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Con la revisión de la literatura se puede apreciar que el uso del aprendizaje automático en el campo del análisis de los anticuerpos ha provocado que esta rama de investigación crezca a un ritmo acelerado. Los principales motivos para automatizar los procesos son: la reducción de costos y de tiempo empleados en las investigaciones para la producción de tratamientos farmacéuticos.

Los repertorios de anticuerpos han tomado una gran importancia en la investigación de la respuesta inmunitaria y para el desarrollo de anticuerpos como agentes terapéuticos.

Aunque en la actualidad es relativamente sencillo obtener datos de estructuras de anticuerpos, se presentan inconsistencias entre los conjuntos de datos de diferentes repertorios, lo que presenta una limitación para contar con un conjunto de datos con suficientes anticuerpos de algún tipo (p. ej. Influenza, SARS-COV-2, VIH, etc.) o con algunas características en específico.

Después de realizar la revisión de la literatura sobre el análisis de la estructura de anticuerpos utilizando aprendizaje automático. Se propone tomar un enfoque para buscar los patrones que provocan que las cadenas puedan emparejarse y sean capaces de interactuar con el virus ANTI-SARS-COV-2.

Se propone el desarrollo de un modelo de aprendizaje automático que sirva para el análisis del emparejamiento de las cadenas pesadas y ligeras que conforman la estructura de los anticuerpos anti-SARS-CoV-2 tomando como base las propiedades estructurales de las proteínas en un nivel de aminoácidos. Con este trabajo se pretende disminuir la complejidad y el tiempo de desarrollo del procedimiento del emparejamiento de las cadenas pesadas y ligeras.

## REFERENCIAS

ABHINANDAN, K.R. and MARTIN, A.C.R. (2010) Analysis and prediction of VH/VL packing in antibodies. *Protein engineering, design & selection*, 23(9), pp. 689–697.

BACHAS, S. et al. (2022) Antibody optimization enabled by artificial intelligence predictions of binding affinity and naturalness. *bioRxiv*.

BOUGHTER, C.T. et al. (2020) Biochemical patterns of antibody polyreactivity revealed through a bioinformatics-based analysis of CDR loops BJORKMAN, P.J. et al. (eds.). *eLife*, 9, p. e61393.

CASELLAS GIBERT, M. et al. (2019) Farmacocinética de los anticuerpos monoclonales. *El Farmacéutico. Hospitales, 2019, vol. 215, p. 15-21*.

CHEN, X. et al. (2020) Predicting antibody developability from sequence using machine learning. *biorxiv*.

EGAJI, O.A. et al. (2020) A Machine Learning Approach for Predicting Antibody Properties. In: *Proceedings of the 2020 10th International Conference on Information Communication and Management*. pp. 20–24.

JANEWAY JR, C.A. (2001) How the immune system protects the host from infection. *Microbes and infection*, 3(13), pp. 1167–1171.

KINDT, T.J., GOLDSBY, R.A. and OSBORNE, B.A. (2007) *Inmunología de Kuby*. McGraw Hill.

LONG, X., JELIAZKOV, J.R. and GRAY, J.J. (2019) Non-H3 CDR template selection in antibody modeling through machine learning. *PeerJ*, 7, p. e6179.

MARKS, C. et al. (2021) Humanization of antibodies using a machine learning approach on large-scale repertoire data. *Bioinformatics*, 37(22), pp. 4041–4047.

OLSEN, T.H., BOYLES, F. and DEANE, C.M. (2022) Observed Antibody Space: A diverse database of cleaned, annotated, and translated unpaired and paired antibody sequences. *Protein Science*, 31(1), pp. 141–146.

OLSEN, T.H., BOYLES, F. and DEANE, C.M. (2021) Observed Antibody Space: A diverse database of cleaned, annotated, and translated unpaired and paired antibody sequences. *Protein Science*, 31(1), pp. 141–146.

PÉREZ LÓPEZ, C. and SANTIN GONZÁLEZ, D. (2007) *Minería de datos. Técnicas y Herramientas*. Editorial Paraninfo.

RUFFOLO, J.A., SULAM, J. and GRAY, J.J. (2022) Antibody structure prediction using interpretable deep learning. *Patterns*, 3(2), p. 100406.

SCHNEIDER, C., RAYBOULD, M.I.J. and DEANE, C.M. (2022) SAbDab in the age of biotherapeutics: updates including SAbDab-nano, the nanobody structure tracker. *Nucleic acids research*, 50(D1), pp. D1368–D1372.

SCHROEDER JR, H.W. and CAVACINI, L. (2010) Structure and function of immunoglobulins. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 125(2), pp. S41–S52.

WITTEN, I.H., FRANK, E. and MARK A. HALL (2011) *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. 3rd ed. KAUFMANN, M. (ed.). Elsevier.

# INGENIERÍA ELECTRÓNICA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

 ISSN en trámite

# Detección y extracción de características de señales de ECG basadas en transformadas de ondas discretas

**O. I. Coronado Reyes*. A. C. Téllez Anguiano***
**J. A. Gutiérrez Gnecchi***

*DEPI, TecnNM/Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Mich, P.C. 58120*
*(e-mail: oscar.cr@morelia.tecnm.mx, adriana.ta@morelia.tecnm.mx, jose.gg3@morelia.tecnm.mx)*

Abstract: Part of the biomedical research focuses on the analysis of ECG signals to auxiliar cardiologist in the diagnosis of heart diseases; diverse methods to detect and extract characteristics in ECG signals are developed on existing databases (PhysioNet), but do not consider specific platforms such as the ADS1293EVM. In this paper, the authors present a feature detection method based on the discrete wavelet transform to detect and extract the characteristics of the ECG signals. The algorithm, developed using the Matlab software was validated using 20 ECG recordings acquired with the ADS1293EVM platform.

*Keywords:* cardiopatía, multiresolución, daubechies, wavelet.

## 1. INTRODUCTION

La investigación de las señales Electrocardiográficas (ECG) se ha utilizado ampliamente para diagnosticar diversas enfermedades cardiacas. El electrocardiograma es un registro en tiempo y amplitud de la actividad cardiaca que se genera por la despolarización y repolarización de las aurículas y los ventrículos (Fig. 1).

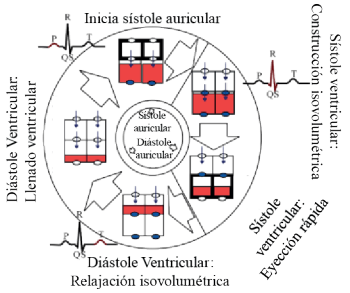



Fig. 1. Ciclo cardiaco

Un ciclo cardiaco en una señal ECG consiste en tres eventos principales, onda P, complejo QRS y onda T (Fig. 2).

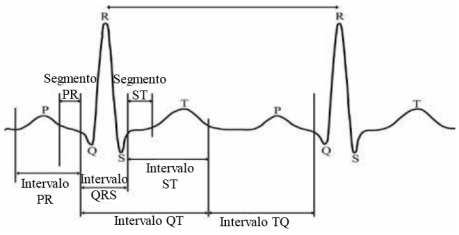



Fig. 2. Señal de ECG que muestra la onda P-QRS-T

La mayoría de la información clínicamente útil de una señal ECG se encuentra en la duración de los intervalos y amplitudes de las ondas.

La mejora en los métodos automáticos de detección y extracción de características (amplitudes e intervalos de duración) es de suma importancia para el mejoramiento en el diagnóstico de cardiopatías (Sahay *et al* , 2010).

En general, las características de una señal ECG pueden dar información importante sobre los tipos de arritmias (Gutiérrez *et al., 2017)*:

- La frecuencia cardíaca (FC) se considera normal entre 60 latidos por minuto (lpm) y 100 lpm. Basándose únicamente en la FC, las arritmias pueden clasificarse como bradiarritmias (FC < 60 lpm) y taquiarritmias (FC > 100 lpm).
- El intervalo de onda R a onda R (RR) es un indicador de la frecuencia ventricular y debe ser regular con menos de 0,12 s de diferencia entre los latidos del corazón.
- El intervalo PR normal se considera entre 0.1 y 0.2 s. Una diferencia mayor indica un defecto en el sistema de conducción.
- La duración y la morfología del complejo QRS. Si el ancho entre el comienzo de la onda Q y el final de la onda S es mayor de 0.12 s, puede haber una falla intraventricular o conducción defectuosa.

Sin embargo, las características de las señales EEG no sólo pueden emplearse para diagnosticar problemas cardíacos.

 ISSN en trámite

Algunas enfermedades, como la diabetes mellitus, han mostrado un acortamiento de los intervalos QRS y QT, aumento de la dispersión del QT intervalo, disminución de las amplitudes de las ondas de despolarización y una variabilidad en el ritmo cardiaco (Kittnar, 2015).

En la literatura, una de las técnicas más utilizadas en la extracción y detección de características de señales ECG es la transformada discreta de wavelet (DWT por sus siglas en inglés *discrete wavelet transform*). Las funciones (wavelet madre) más utilizadas en el análisis de señales ECG son haar (Gutiérrez *et al*., 2005), quadratic spline (Ieong c., 2012; Gutiérrez *et al*., 2017), daubechies (Mahmoodabadi *et al*., 2005; Barraco et al, 2008; Gualsaqui al., 2016) biortogonal (Chandra et al, 2018) o una combinación de estas funciones (Zeng *et al*., 2013), como se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1. Estado del arte.**

| Plataforma | Características | Wavelet | Exactitud | Autor |
|---|---|---|---|---|
| MIT-BIH | Complejo QRS | Haar | 98.81 % | Gutiérrez et al., 2005 |
| MIT-BIH | Interval RR | quadratic spline | 99.7 % | Ieong et al., 2012 |
| MIT-BIH | Amplitud P y R. Duración QRS. Intervalo RR y PR. | quadratic spline | 99.34 % | Gutiérrez et al., 2017 |
| MIT-BIH | Complejo QRS. Duración onda P y T. Amplitud P y T. | Daubechies 4 y 6. | 98 % | Mahmoodabadi et al., 2005 |
| Simulación de señales ECG en MATLAB | Complejo QRS. Amplitud P y T. | Daubechies 10. | 99.8 % | Barraco et al, 2008 |
| Cardio Express SL3 | Complejo QRS. Amplitud P y T. Duración P y T | Daubechies 8. | 96 % | Miranda et al., 2016 |
| MIT-BIH | Complejo QRS. Duración onda P y T. Amplitud P y T. | Biortogonal y umbralización | 99.95 % | Chandra et al, 2018 |
| MIT-BIH | Complejo QRS. | Mexican-hat. complex Morlet | 99.53 % | Zeng et al., 2013 |

Sin embargo, los trabajos analizados evalúan en su mayoría señales contenidas en bases de datos existentes (PhysioNet), que en su mayoría son señales adquiridas con equipos médicos costosos, pero no analizan señales adquiridas mediante otras plataformas, para evaluar el desempeño de los algoritmos en señales reales adquiridas en plataformas de bajo costo.

El principal objetivo de este trabajo es presentar un análisis en la extracción de características de señales obtenidas mediante una plataforma asequible de adquisición de señales ECG, el ECG-ADS1293EVM, a partir de la técnica de la transformada discreta wavelet.

## 2. MÉTODOS UTILIZADOS

Para la extracción de características en ECG basada en trasformada discreta wavelet se requiere realizar un pre-procesamiento de las señales obtenidas.

El pre-procesamiento de señales ECG consiste en corregir la línea base (isoeléctrica) y eliminar el ruido en señales ECG, ya que, se puede presentar ruido (de la red eléctrica a 60 Hz) y contaminación por artefactos (respiración y movimiento del pecho).

La trasformada discreta wavelet ha demostrado corregir la línea base, eliminar ruido y conservar de forma nítida las características en las ondas de la señal ECG (Chen *et al*, 2006).

En relación a la obtención de las características de las señales ECG se elige también la transformada wavelet, ya que ésta permite obtener la representación, descomposición y reconstrucción de señales que presentan cambios abruptos en sus componentes de tiempo-frecuencia en forma instantánea, empleando el análisis de multiresolución con ventanas de longitud variable, adaptadas al cambio de frecuencia de la señal. Es decir, la transformada wavelet permite el uso de intervalos grandes de tiempo en aquellos segmentos en los que se requiere mayor precisión en baja frecuencia, e intervalos más pequeños donde se requiere información en alta frecuencia (Nieto *et al*, 2008).

Existen una gran cantidad de funciones wavelets para el procesamiento de señales, con base en los resultados obtenidos en trabajos anteriores y en el trabajo presentado, se seleccionan la dauchechies 9 y biortogonal 6.8 (Fig. 3).

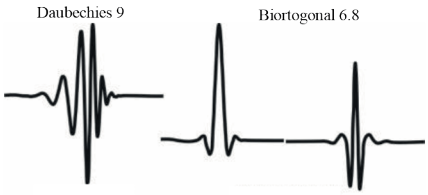



Fig. 3. Funciones wavelet

La transformada continua de wavelet está definida por (1):

$$W_f(u.s) = f * \psi_{u,s} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\frac{1}{\sqrt{s}}\psi\left(\frac{t-u}{s}\right)dt \qquad (1)$$

 ISSN en trámite

Donde $f(t)$ es la señal continua, ψ es la función wavelet (wavelet madre), $s$ representa el factor de escalamiento de la función wavelet, que se contrae si $s < 1$ y expande si $s > 1$, y $u$ es el factor de traslación para desplazar la ubicación de la función wavelet.

La DWT de una señal digital $f(n)$ está definida por (2) y (3):

$$S_{2j}f(n) = \sum_{k \in z} h_k S_{2j-1} f(n - 2^{j-1}k) \quad (2)$$

$$W_{2j}f(n) = \sum_{k \in z} g_k S_{2j-1} f(n - 2^{j-1}k) \quad (3)$$

Donde $S_{2j}f(n)$ son los coeficientes de aproximación y $W_{2j}f(n)$ son los coeficientes de detalle. $2^j$ es la escala de la transformada de wavelet de $f(n)$ y $n$ es el número de muestra. Los términos $h_k$ y $g_k$ corresponden a los coeficientes de un filtro pasa-bajas y pasa-altas(Gutiérrez *et al.*, 2017). El análisis multiresolición mediante DWT permite descomponer una señal de interés en filtros pasa-banda detalle D y aproximación A, a distintos anchos de banda con frecuencia de corte inferior Ri y frecuencia de corte superior Rs.

## 3. DESARROLLO

El procesamiento de señales en la detección y extracción de características desarrollado en este trabajo comprende las siguientes etapas:

- Determinación de los niveles de descomposición.
- Corrección de línea base.
- Detección y extracción de características.

### *3.1 Toma de muestras*

El sistema que se propone para la toma de muestras de señales ECG se basa en la tarjeta EVM1293EVM de Texas Instrument, la cual se muestra en la Fig. 4.

Fig. 4. ADS1293EVM

El sistema ADS1293EVM cuenta con las siguientes características: 24 bits de resolución, configuración de 3 y 5 derivaciones, modificación de la frecuencia de muestreo en el rango de 200 a 1900 Hz (Fs), parámetros de filtrado de la señal (eliminación de ruido de 60 Hz), importación de datos para un post-procesamiento y cuenta con su propio software para toma de muestras.

La configuración implementada en el sistema ADS1293EVM fue de 3 derivaciones (Fig. 5).

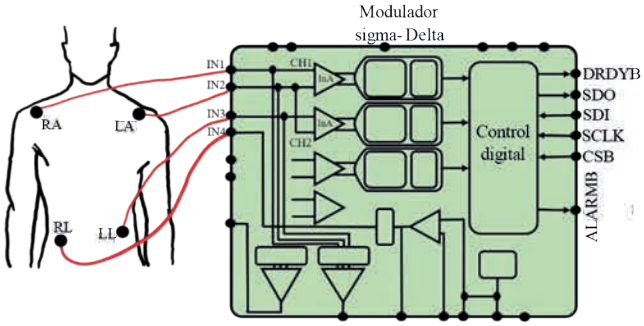



Fig. 5. Configuración 3 derivaciones

### *3.2 Niveles de descomposición*

Para detectar y extraer las características de las señales ECG se realizó el análisis multiresolución de la DWT a diferentes frecuencias de muestreo. En la Tabla 2 se muestran los rangos de frecuencia en D y A a 8 niveles de descomposición con variación en la Fs.

**Tabla 2. Niveles de descomposición**

| N | Fs=200 (Hz) | | Fs=235 (Hz) | | Fs=266 (Hz) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ri | Rs | Ri | Rs | Ri | Rs |
| A8 | 0 | 0.390 | 0 | 0.458 | 0 | 0.5195 |
| D8 | 0.390 | 0.781 | 0.458 | 0.917 | 0.519 | 1.039 |
| D7 | 0.781 | 1.562 | 0.917 | 1.853 | 1.0396 | 2.0781 |
| D6 | 1.562 | 3.125 | 1.853 | 3.61 | 2.0781 | 4.1562 |
| D5 | 3.12 | 6.25 | 3.61 | 7.34 | 4.1562 | 8.3125 |
| D4 | 6.25 | 12.5 | 7.34 | 14.86 | 8.3125 | 16.625 |
| D3 | 12.5 | 25 | 14.86 | 29.37 | 16.625 | 33.25 |
| D2 | 25 | 50 | 29.37 | 58.75 | 33.25 | 66.5 |
| D1 | 50 | 100 | 58.75 | 117.5 | 66.5 | 133 |

Con base a las frecuencias de muestreo (Tabla 2) y niveles de descomposición, se realiza el proceso de corrección de la línea base para determinar la frecuencia con mejores resultados.

### *3.3 Corrección línea base*

Conociendo los rangos de frecuencia en los coeficientes de detalle y aproximación, se descompone la señal ECG utilizando una wavelet madre tipo daubechies 9 (Db9) como se muestra en la Fig. 6.

La descomposición que se observa en la Fig. 6 muestra en los componentes de alta frecuencia (D1, D2, D3 y D4) frecuencias correspondientes al complejo QRS, mientras que los

 ISSN en trámite

componentes de baja frecuencia (D5, D6, D7 y D8) corresponden a frecuencias de la onda P y T.

Por otro lado, se observa que los componentes de menor frecuencia (A8), corresponden al movimiento en la línea base.

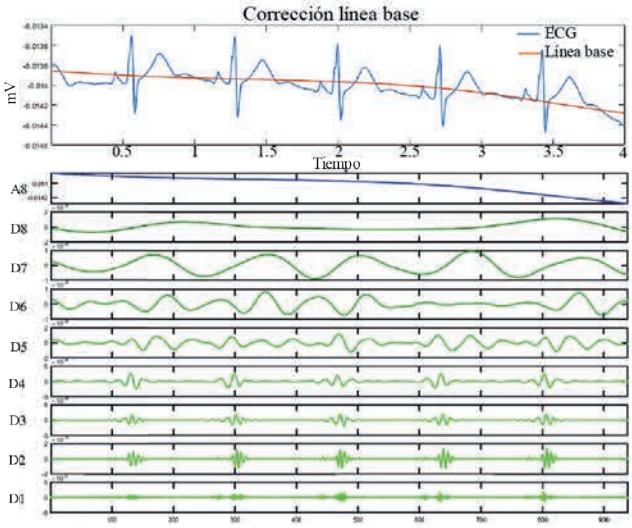



Fig. 6. Descomposición a 8 niveles con una db9

Para corregir el movimiento en la línea base provocado por un movimiento accidental o por la respiración en la toma de muestra, se restó en la señal original el componente A8 (Fig. 7).

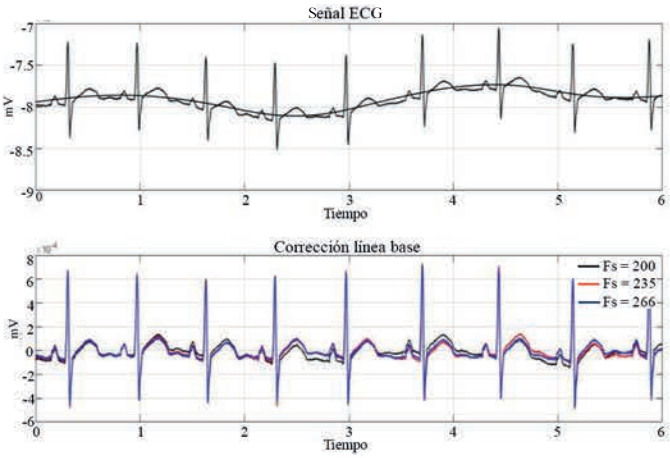



Fig. 7. Corrección línea base

Como se puede observar en las Fig.7, el aumento en la frecuencia de muestreo provoca un ligero aumento en la oscilación de la línea base, a una frecuencia mayor, mayor frecuencia en la línea base, esto se debe a que los niveles de descomposición cambian los rangos de frecuencia, una mayor frecuencia de muestreo aumenta los rangos de frecuencia en A8, lo cual provoca que componentes de la señal ECG de baja frecuencia se eliminen.

*3.4 Extracción de características*

Para conocer el efecto que provocan la frecuencia de muestreo, el tipo de wavelet madre utilizados y la frecuencia cardiaca, se realizó la detección y extracción de algunas características en la señal ECG: tiempo inicial de la onda P, tiempo final de la onda P, amplitud de la onda P, amplitud de la onda R, tiempo final del complejo QRS, amplitud de la onda T, tiempo inicial de la onda T y tiempo final de la onda T.

Se utilizaron 20 señales obtenidas en diferentes personas en un rango de frecuencia cardiaca de 44 a 160 lpm (aumento en frecuencia cardiaca por actividad física) con las tres frecuencias muestreo analizadas anteriormente (200 Hz, 235 Hz y 266 Hz). Como wavelets madres se utilizaron la Db9 y biortogonal 6.8 (bior 6.8).

En general, la tarea de la detección consiste en obtener la trasformada discreta de wavelet para identificar y obtener las características de interés en los diferentes niveles de descomposición en cada uno de los ciclos cardiacos presentes, el método empleando se muestra en la Fig. 8.

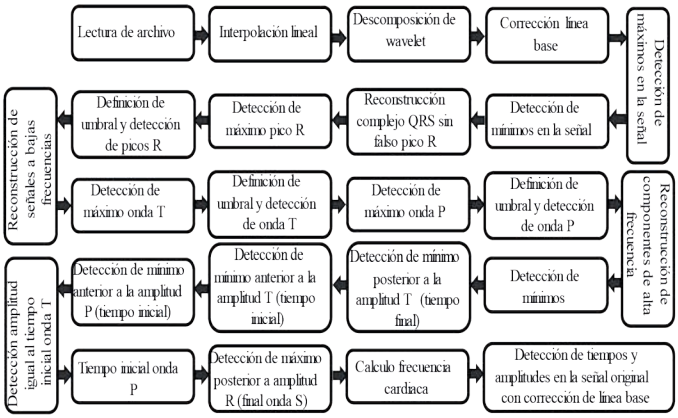



Fig. 8. Metodología de detección de características

*1)* Interpolación. La interpolación empleada es la interpolación lineal, la cual modifica la frecuencia de muestreo para variar los rangos de frecuencia de los niveles de detalle y aproximación.

*2)* Eliminación de falso pico R. Para eliminar los falsos picos R que se encuentran en la señal ECG se reconstruye la señal con los componentes de alta frecuencia que se encuentran en D2, D3 y D4.

*3)* Identificación de la onda R. La identificación en la amplitud R es basada en la detección de máximos locales en la reconstrucción con eliminación del falso pico R. En este paso, mediante un umbral en amplitud con el valor máximo global, se localizan los valores máximos locales en cada ciclo cardiaco.

*4)* Identificación de la onda P. Para identificar la onda P se reconstruyen los componentes de baja frecuencia (D5, D6, D7

 ISSN en trámite

y D8) y se localizan los máximos locales; mediante un umbral de tiempo adaptativo a la frecuencia cardiaca se localiza el máximo posterior a la onda R, y así se idéntica la onda P.

*5)* Identificación de la onda T. Para identificar la onda T se reconstruyen los componentes de baja frecuencia (D6, D7, D8) y se localizan los máximos locales; mediante un umbral de tiempo adaptativo a la frecuencia cardiaca se localiza en máximo posterior a la onda R, y así se identifica la onda T.

*6)* Detección de inicio y final de onda T. El proceso de detección del inicio y final de la onda T se basa en la reconstrucción de los componentes de frecuencia D3, D4, D5, D6, D7 y D8. Se localizan los mínimos locales anteriores y posteriores a la onda T para identificar el inicio y final de la onda respectivamente.

*7)* Detección de inicio y final de onda P. El proceso de detección del inicio y final de la onda T se basa en la reconstrucción de los componentes D3, D4, D5, D6, D7 y D8. Se localizan los mínimos locales anteriores y posteriores a la onda P para identificar el inicio y final de la onda respectivamente.

*8)* Final complejo QRS. Para identificar el final del complejo QRS componentes D2, D3, D4, D5, D6, D7 y D8. Se localizan los mínimos locales posteriores a la onda R para identificar el final del complejo QRS.

## 4. RESULTADOS

La detección de características en los ciclos cardíacos en una señal ECG se basa en la detección de máximos y mínimos.

La Fig. 9 muestra la detección de las características de interés en una señal con una frecuencia cardiaca de 44 latidos por minuto (lpm) con una wavelet madre tipo daubechies 9.

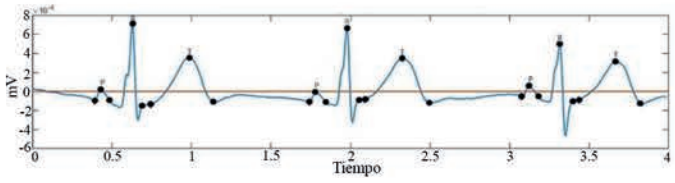



Fig. 9. Detección de características a 44 lpm.

La Fig. 10 muestra la detección de características de interés a una frecuencia cardiaca de 84 lpm (actividad física) y una wavelet madre tipo Db9, donde el marcador rojo corresponde a una característica detectada de manera errónea por el algoritmo.

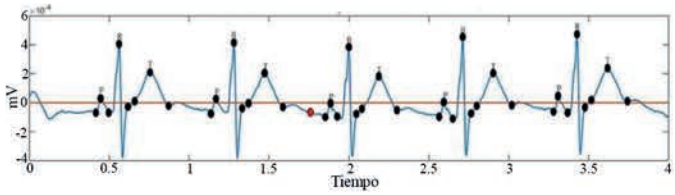



Fig. 10. Detección de características a 83 lpm.

Por último, aumentando a 160 lpm (aumento en la actividad física) (Fig. 11) y una wavelet madre Db9, el número de características detectadas y clasificadas de manera errónea (marcadores rojos) aumentó a 21, correspondiendo la mayoría a los inciso y finales de la onda P y T.

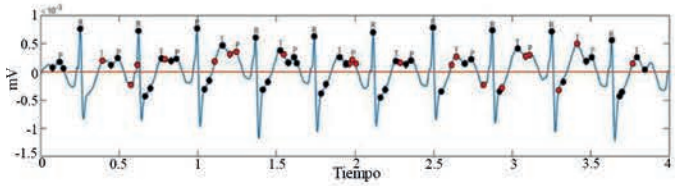



Fig. 11. Detección de características a 160 lpm.

En la Tabla 3 se muestra un resumen de los resultados al procesar los 20 registros, donde se compara el número de características detectadas a tres diferentes frecuencias de muestreo con dos diferentes tipos de wavelets (Db9 y bior 6.8).

La exactitud en la detección de características fue más alta con una Fs=235 Hz y una wavelet madre Db9. Los tiempos iniciales de la onda P (Ti-p) presentaron un porcentaje del 74.7 %, los tiempos finales de la onda P (Tf-P) de 53 %, las amplitudes P (P) del 93 %. Por otro lado, analizando en complejo QRS las amplitudes R (R) arrojaron un porcentaje de exactitud del 98.3 %, y de 90.5 % en los tiempos finales del complejo QRS. Por último, analizando la onda T las amplitudes de la onda T (T) tuvieron un porcentaje de exactitud del 96.5 %, los tiempos iniciales de la onda T (Ti-T) de 89.6 %, y los finales de la onda T (Tf-T) del 85.2 %.

**Tabla 3. Exactitud en detección de características.**

| Fs (Hz) | Wavelet | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 |
| | Ti-P (%) | | Tf-P (%) | | P (%) | | R (%) | | Ts (%) | | T (%) | | Ti-T (%) | | Tf-T (%) | |
| Real | 115 | | 115 | | 115 | | 120 | | 117 | | 116 | | 116 | | 115 | |
| 200 | 69.5 | 60 | 47.8 | 42.6 | 87.8 | 73.9 | 95 | 82.5 | 52.9 | 43.5 | 82.7 | 68.1 | 61.2 | 439 | 75.6 | 63.4 |

 ISSN en trámite

| Fs (Hz) | Wavelet | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 | Db9 | Bior 6.8 |
| | Ti-P (%) | | Tf-P (%) | | P (%) | | R (%) | | Ts (%) | | T (%) | | Ti-T (%) | | Tf-T (%) | |
| 235 | **74.7** | 63.7 | **53.0** | 40 | **93.0** | 69.5 | **98.3** | 93.3 | **90.5** | 63.2 | **96.5** | 75 | **89.6** | 47.4 | **85.2** | 69.5 |
| 266 | 60.8 | 62.6 | 41.7 | 40.8 | 85.2 | 80.8 | 97.5 | 92.5 | 72.6 | 53.8 | 75.8 | 77.5 | 75.8 | 24.1 | 78.2 | 66 |

## 5. CONCLUSIONES

El análisis presentado a lo largo de este trabajo demostró que, la técnica de la trasformada discreta wavelet basada en una db9 a una frecuencia de 235 Hz es capaz de detectar características importantes en un ECG basado en el ADS1293EVM, ya que de 8 características 4 presentaron un porcentaje mayor al 90 % en un rango de frecuencia entre 44 a 160 latidos por minuto.

El porcentaje de mayor exactitud se tuvo en la detección de la amplitud R, este parámetro es muy importante ya que define la frecuencia cardiaca. Sin embargo, se puede mencionar que los errores más grandes en la detección y clasificación se presentaron en frecuencias cardiacas superiores a 130 lpm, esto se debe al cambio en la morfología que presenta la señal a altas frecuencias.

Se puede mencionar que las características de interés pueden ser detectadas y clasificadas logrando un aumento en el porcentaje de exactitud, manteniendo un rango de frecuencia cardiaca mayor a 44 lpm y menor a 120 lpm (frecuencia cardiaca normal). Es importante mencionar que la frecuencia de muestreo, wavelet madre, niveles de descomposición y frecuencia cardiaca son los principales factores al analizar una señal ECG, el mejor resultado que se obtuvo en esta investigación fue usando una wavelet madre db9, 235 Hz frecuencia de muestreo, ocho niveles de descomposición y rango de frecuencia de 45 a 130 lpm.

Por último, en comparación a los resultados mostrados en el estado del arte con porcentajes por encima del 98 %, se puede mencionar que las técnicas implementadas en este trabajo pueden extraer características en señales ECG adquiridas en plataformas de bajo costo y con señales reales y no solo en bases de datos existentes.

## REFERENCES

Barraco, R., Persano Adorno, D. and Brai, M. (2008) 'ECG signal analysis using wavelet transform', Theory in Biosciences, 130(3), pp. 155–163. doi: 10.1007/s12064-011-0124-1.

Chandra, S., Sharma, A. and Singh, G. K. (2018) 'Feature extraction of ECG signal', Journal of Medical Engineering and Technology. Taylor & Francis, 42(4), pp. 306–316. doi: 10.1080/03091902.2018.1492039.

Chen, S. W., Chen, H. C. and Chan, H. L. (2006) 'A real-time QRS detection method based on moving-averaging incorporating with wavelet denoising', Computer Methods and Programs in Biomedicine, 82(3), pp. 187–195. doi: 10.1016/j.cmpb.2005.11.012.

Gualsaqui Miranda, M. V., Vizcaino Espinosa, I. P. and Flores Calero, M. J. (2016) 'ECG signal features extraction', 2016 IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting, ETCM 2016. doi: 10.1109/ETCM.2016.7750859.

Gutiérrez, A., Lara, M. and Hernández, P. R. (2005) 'A QRS Detector Based on Haar Wavelet, Evaluation with MIT-BIH Arrhythmia and European ST-T Databases', Computación y Sistemas, 8(4), pp. 293–302. Available at: http://www.scielo.org.mx/pdf/cys/v8n4/v8n4a4.pdf.

Gutiérrez, J. A. et al. (2017) 'DSP-based arrhythmia classification using wavelet transform and probabilistic neural network', Biomedical Signal Processing and Control, 32, pp. 44–56. doi: 10.1016/j.bspc.2016.10.005.

Ieong, C. I. et al. (2012) 'A 0.83-µW QRS detection processor using quadratic spline wavelet transform for wireless ECG acquisition in 0.35-µm CMOS', IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 6(6), pp. 586–595. doi: 10.1109/TBCAS.2012.2188798.

Kittnar, O. (2015) 'Electrocardiographic changes in diabetes mellitus', Physiological Research, 64, pp. S559–S566. doi: 10.33549/physiolres.933230.

Mahmoodabadi, S. Z. et al. (2005) 'ECG feature extraction based on multiresolution wavelet transform', Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings, 7 VOLS(5), pp. 3902–3905. doi: 10.1109/iembs.2005.1615314.

Nieto, N. and Orozco, D. M. (2008) 'El uso de la transformada wavelet discreta en la reconstrucción de señales senosoidales', Scientia et Technica, (XIV–38), pp. 381–386.

Sahay, S., A.K.Wadhwani, A. K. W. and Wadhwani, S. (2010) 'ECG Feature Extraction Techniques - A Survey Approach', International Journal of Computer Applications, 120(11), pp. 1–4. doi: 10.5120/21268-4002.

Zeng, C. et al. (2013) 'QRS complex detection using combination of Mexican-hat wavelet and complex Morlet wavelet', Journal of Computers (Finland), 8(11), pp. 2951–2958. doi: 10.4304/jcp.8.11.2951-

 ISSN en trámite

# Sintonización Espectral a Partir de Radiación UV en un Derivado de Imidazol Como Convertidor de Longitud de Onda.

**M. Ramírez Morales*, J. Gómez Pérez**, J.L Camas Anzueto*, R. Grajales Coutiño*, A. Fong González**, C. A. Megchum Ruedas***

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.*
*Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.*
***Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.*
*Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica.*

**Resumen:** En este artículo se presentan resultados parciales de la caracterización espectral de un material orgánico como medio fluorescente el cual, dos muestra de 120 mg de lofina se expone una de ellas a radiación UV de 395 nm durante 120 minutos, y otra muestra a 405 nm durante 180 minutos, esto con la finalidad de evidenciar el tiempo de sintonización a partir de las fuentes de excitación, cabe mencionar que se presenta los espectros de absorbancia de las muestra que se expusieron a radiación UV con relación al espectro de absorbancia de una muestra sin exposición UV y de una muestra blanco sin el medio activo.

*Palabras clave:* Espectro visible, Fluorescencia, Radiación UV, Fuentes sintonizables.

## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso físico en el cual se basa este trabajo de investigación es el de la fluorescencia, en la literatura la fluorescencia es un proceso de absorción y emisión de energía por las moléculas de un fluorocromo en el cual existe un proceso de conversión interna (Albani J.R., 2005).

Donde los electrones del estado basal de energía $S_0$ absorben energía, dada por la ecuación (1) pasan a un estado energético superior denominado estado excitado $S_n$ (n > 1) donde el electrón en el estado excitado $S_n$ libera su energía en forma de fotón decayendo el electrón a su estado basal $S_0$, como se muestra en la Fig.1.

Cabe mencionar que este proceso se da en un periodo corto de tiempo (Srivastava, 2003), el principio de Franck–Condon establece que el tiempo de transición entre dos estados energéticos se da en orden de $10^{-16}$ segundos, existiendo un periodo de vibración en la estructura del material en el orden de los $10^{-13}$ segundos.

Al haber un proceso de relajación del estado excitado hay perdida de energía del electrón en forma crepuscular en el orden de los $10^{-8}$ segundos, donde el electrón regresa a su estado basal de energía.

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \tag{1}$$

Donde $h$ es la constante de Planck $4.136x10^{-15}$eV. S, $v$ es la frecuencia de la luz que de desglosa en $\frac{c}{\lambda}$ en la cual $c$, es la velocidad de la luz $3x10^{8}\frac{m}{s}$, $\lambda$ es la longitud de onda expresada en nm.

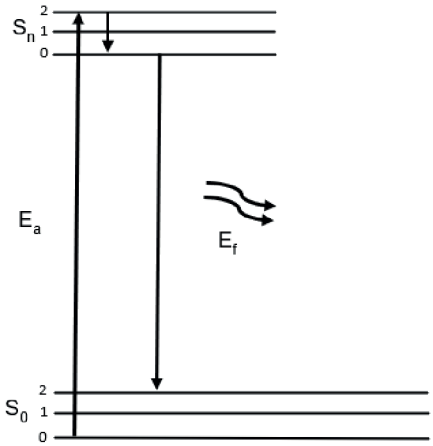



Fig. 1. Fenómeno físico de la fluorescencia absorción (Ea) y emisión (Ef).

 ISSN en trámite

Una vez descrito el fenómeno que se da en el proceso de conversión de longitud de onda, que es esencial para la caracterización de fuentes luminiscentes, diferentes autores manejan métodos y técnicas en la caracterización de fuentes de luz, como es el uso de fósforos para la generación de luz de amplio espectro, es decir luz blanca.

Hu, Guangqi y colaboradores en 2019 elaboraron una técnica de ensamblaje de QDs tricolores donde produjeron polvos con una morfología de microesfera y emitieron luz blanca (Hu *et al*., 2019), otros investigadores desarrollan optimizaciones en longitudes de onda en colores primarios que corresponden al color rojo, verde y azul.

En 2020 Rajendran y su equipo sintetizaron fósforos basado en vanadato de emisión azul $BaYV_3O_{11}$ doparon este fósforo con $Eu^{3+}$ para generar emisiones de color rojo, con la finalidad de demostrar la incorporación de tierras raras en su fósforo de vanadato obteniendo otras longitudes de onda a la del fósforo base, que emite en azul (Rajendran & Vaidyanathan, 2020).

En la literatura se menciona (Yoo *et al*., 2011) que el derivado del imidazol tiene la propiedad de cambiar su absorbancia óptica cuando la temperatura varia. Cuando existe un incremento de temperatura en el material su absorbancia es menor en comparación a las temperaturas bajas. La importancia de este elemento, como fuente principal de estudio se debe a sus propiedades únicas en el campo de la óptica (Yanover & Kaftory, 2009).

Las aplicaciones que tienen los convertidores de longitud de onda se dan en el desarrollo de sistemas optoelectrónicos es decir construcción de fósforos artificiales para la generación de luz aplicada en displays de celulares, televisiones entre otros dispositivos electrónicos, así como indicadores luminiscentes de emisión espontanea, el desarrollo de nanopartículas tiene aplicaciones como fluoróforos con alto potencial en la industria electrónica (Peter Bamfield, 2010).

En este trabajo de investigación se caracteriza a la lofina como un convertidos de longitud de onda a partir de la exposición a luz UV de 395 nm y 405 nm con la finalidad de analizar su espectro de fluorescencia con relación al tiempo de exposición de las muestras a la radiación.

## 2. METODOLOGIA

Se realizaron tres muestras de 120 mg de lofina líquida una de ellas como referencia espectral, la segunda de ellas para ser expuesta una fuente UV de 395 nm durante 120 minutos y la tercera muestra para ser irradiada con una fuente de 405 nm durante 180 minutos, donde cada 20 min se tomaba los datos correspondientes al espectro en ese intervalo de tiempo.

Los diodos Led se colocan en una de las cavidades del QPOD formando un ángulo de 90° con relación al espectrómetro Ocean Optics HR4000CG-UV-NIR para medir el espectro fluorescente, y en el centro del QPOD se inserta la muestra de lofina a caracterizar, como se muestra en la Fig. 2.

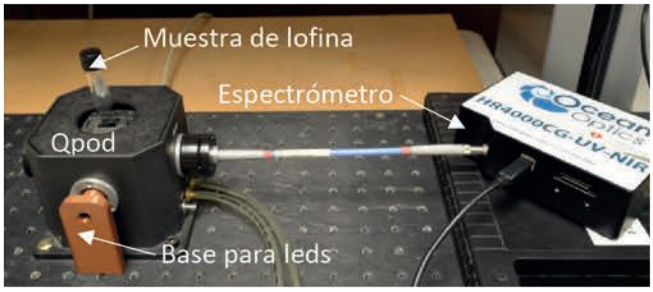
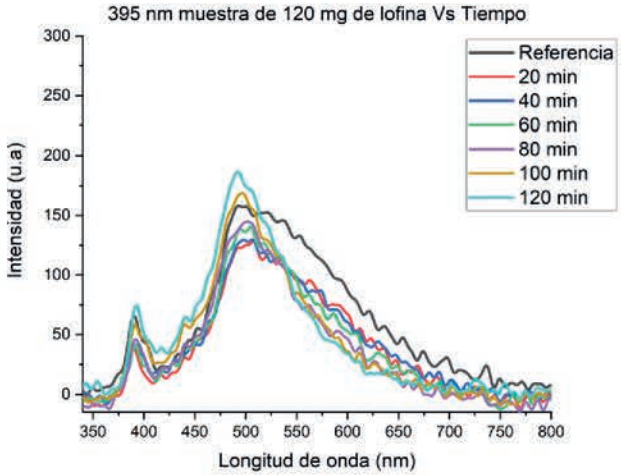



Fig. 2. Materiales para el arreglo experimental.




## 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Fig. 3. Led de 395 nm muestra de 120 mg de lofina vs Tiempo.

En este apartado puede visualizar la dependencia espectral en relación al tiempo de exposición de una fuente ultravioleta de 395 nm con la segunda muestra de lofina, se observa que el espectro fluorescente se modifica desde generar un espectro de luz blanca como se observa en el espectro de la referencia hacia el estrechamiento del espectro teniendo como longitud de onda predominante en los 475 nm a 525 nm como se observa en la Fig. 3. Sintonizando espectros dicromáticos.

ISSN en trámite

En este análisis la tercera muestra de lofina se expuso durante 180 minutos bajo luz ultravioleta de 405 nm, en ella se puede observar que el espectro fluorescente a partir de los 20 minutos a 80 minutos existe una sintonización constante, pasado los 80 minutos a 140 minutos hay una transición de estrechamiento espectral donde a los 160 a 180 minutos el espectro presenta una sintonización constate Fig. 4.

Estos resultados nos dan la oportunidad de estudiar su espectro de absorbancia de la muestra dos y la tres con relación al espectro de absorbancia de la muestra referencia y el blanco como se muestra en la Fig. 5.

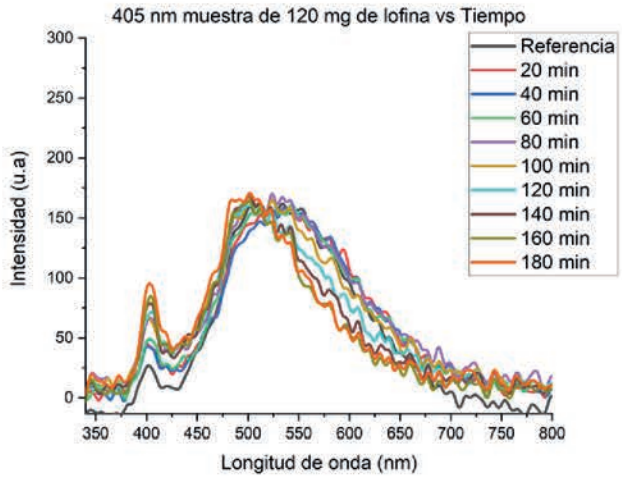



Fig. 4. Led de 405 nm muestra de 120 mg de lofina vs Tiempo.

En la Fig. 5. Se observa el espectro de absorbancia de la muestra dos que fue analizada bajo luz UV de 395 nm y la muestra tres una vez expuesta a luz UV de 405 nm con relación al análisis de absorbancia de la muestra uno de referencia y al blanco, el espectro del blanco es de los solventes que intervienen en la elaboración de la mezcla homogénea.

El resultado del análisis las muestras expuestas a luz UV modifican su espectro de absorción entre los 418 nm a 1100 nm en comparación a la muestra de referencia, cabe menciona que al incorporar el derivado de imidazol en la muestra homogénea los solventes le dan la propiedad de cambiar su ancho de máxima absorción permitiendo absorber longitudes de onda cercano al espectro visible.

Esto permite analizar el espectro fluorescente a partir de la exposición a fuentes UV cercanas a la región visible del espectro electromagnético.

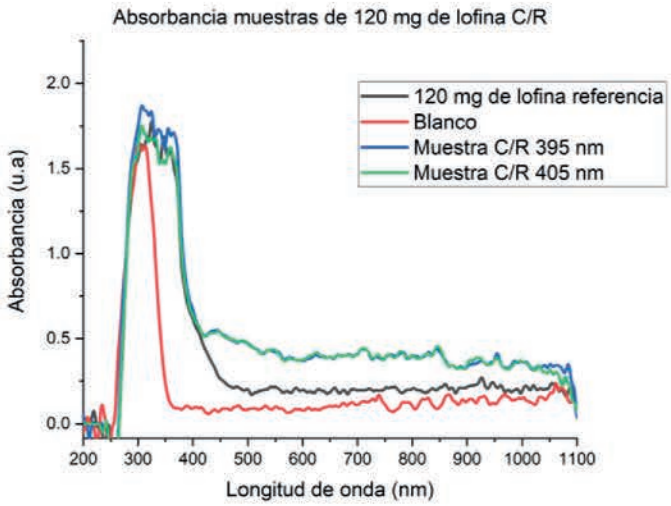



Fig. 5. Espectro de absorbancia de una muestra expuesta a radiación UV vs espectro de referencia y de la muestra blanco.

En la Fig. 6. Se observa la tonalidad espectral de las tres muestras de lofina bajo exposición de luz UV de 395 nm se ve claramente la modificación del espectro fluorescente generando un cambio irreversible en la tonalidad en comparación a una muestra que no ha sido expuesta a tiempos prolongados de radiación.

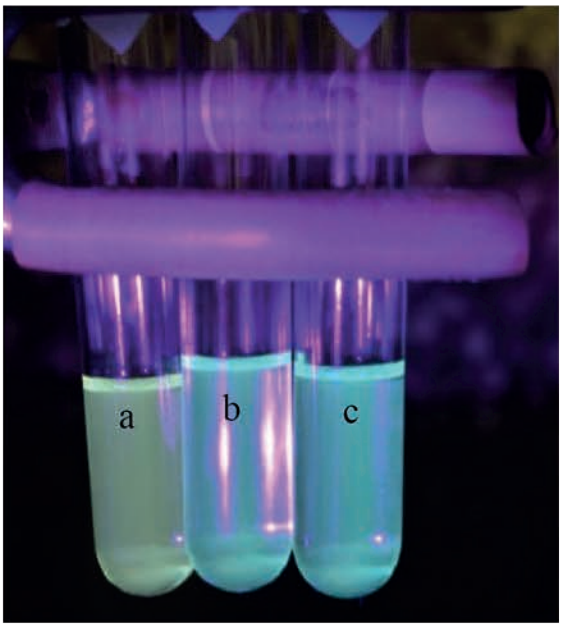



Fig. 6. Muestras de lofina bajo exposición Uv de 395 nm, referencia (a), expuesta a 395 nm (b), expuesta a 405 nm (c).

ISSN en trámite

## 4. CONCLUSIONES

En la literatura se evidencia que la lofina presenta cambios en la absorbancia del material bajo variaciones de temperatura, en este trabajo de investigación se presenta la modificación espectral del derivado de imidazol únicamente bajo radiación de luz UV durante un tiempo prolongado, el cambio espectral es irreversible, permitiendo sintonizar espectros de luz bajo excitación UV en un tiempo estimado. Abriendo la oportunidad de investigar a profundidad el mecanismo de sintonización en la estructura química, para estudiar posibles aplicaciones en la optoelectrónica moderna.

## REFERENCIAS

Albani J.R. 2005. *STRUCTURE AND DYNAMICS OF MACROMOLECULES: ABSORPTION AND FLUORESCENCE STUDIES* 1st Edition. Elsevier

Hu, G. Sun, Y., Zhuang, J., Zhang, X., Zhang, H., Zheng, M., Xiao, Y., Liang, Y., Dong, H., Hu, H., Lei, B., Hu, C., & Liu, Y. 2019. Enhancement of Fluorescence Emission for Tricolor Quantum Dots Assembled in Polysiloxane toward Solar Spectrum-Simulated White Light-Emitting Devices. *Small*, *16*(1), 1–8. https://doi.org/10.1002/smll.201905266

Peter Bamfield, M. G. H. 2010. *Chromic Phenomena Technological Applications of Colour Chemistry* (Second Edition). The Royal Society of Chemistry.

Rajendran, M., & Vaidyanathan, S. 2020. A Novel Highly Efficient Host-Sensitized Red Emitting (Ba2YV3O11: Eu3+) Phosphor for Hybrid White LEDs. *ChemistrySelect*, *5*(17), 5128–5136. https://doi.org/10.1002/slct.202000601

Srivastava, A. M. 2003. Phosphors. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)* (Third Edition, pp. 855–872). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00561-5

Yanover, D., & Kaftory, M. 2009. Lophine (2,4,5-triphenyl-1H-imidazole). *Acta Crystallographica Section E: Structure Reports Online*, *65*(4). https://doi.org/10.1107/S1600536809006552

Yoo, W. J., Seo, J. K., Jang, K. W., Heo, J. Y., Moon, J. S., Park, J.-Y., Park, B. G., & Lee, B. 2011. Fabrication and comparison of thermochromic material-based fiber-optic sensors for monitoring the temperature of water. *Optical Review*, *18*(1), 144–148. https://doi.org/10.1007/s10043-011-0012-4

 ISSN en trámite

# Estrategias de Consenso en Microrredes de CD ⋆

**Meneses-Arcos. M.A.** * **García-Beltrán. C.D.** *
**Reyes-Reyes, J.** *

* *Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, TecNM, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, MX (e-mail: {m21ce037, carlos.gb, juan.rr}@cenidet.tecnm.mx).*

Resumen: En este artículo se desarrolló una revisión de la estructura y consenso de microrredes de CD con un enfoque multiagente. Se presenta una estructura general de sistemas multiagente interconectados, con la que se acopla un modelo de unidades de generación distribuida. Cada unidad se considera como un convertidor *Buck* ideal con un filtro *RLC* conectado a una carga. Se presentan dos protocolos de consenso encontrados en la literatura, uno para consenso de voltajes y otro de consenso para distribución de corrientes con balance de voltaje. Los protocolos fueron puestos a prueba en simulación, en la que se considera incertidumbre paramétrica, ruido de medición y perturbación en uno de los agentes. Con el protocolo de consenso para distribución de corrientes se añadió una fuente de voltaje externa sin comunicación con los demás agentes y se encontró que puede tanto consumir como aportar potencia a la microrred.

*Keywords:* Multi-agent systems, Control of interconnected systems, Consensus algorithms, DC microgrids, Power/Energy systems.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables se están convirtiendo rápidamente en la meta de generación energética a nivel mundial. Esto cambia la forma de distribución y almacenamiento de la energía eléctrica. Muchas de las fuentes renovables son de generación descentralizada (Trigo et al., 2019), una de las soluciones para su integración es optar por un esquema de microrredes para su distribución, el cual ha sido considerado como el mejor camino para aprovechar el potencial de la generación distribuida (Shahbazitabar et al., 2021). Las microrredes pueden considerarse como una entidad controlable o como un sistema multiagente. La sincronización de sistemas multiagente se ha analizado ampliamente por diversos autores como (Blekhman et al., 1997), (Spanos et al., 2005), (Olfati Saber et al., 2007), (Qin et al., 2017), por lo que al enlazar el esquema multiagente con las microrredes presenta una gran oportunidad de desarrollo, al permitir mayor flexibilidad al modificar la microrred en comparación con otros esquemas de sincronización.

Se ha realizado una revisión sobre las microrredes y los sistemas multiagente, la cual se presenta en este documento. Se empieza por la estructura general de un agente en un sistema multiagente interconectado. Después se presenta la descripción de una microrred y uno de sus posibles componentes, un *Buck* con un filtro *RLC* conectado a una carga y otros *Bucks*. Posteriormente, se presentan dos protocolos de consenso encontrados en la literatura, los cuales se pusieron a prueba en simulación considerando ruido de medición, incertidumbre paramétrica y una perturbación en la corriente demandada por una carga.

### Notación y definiciones básicas

$(\cdot)^c$ superindice $c$ hace referencia a que pertenece al grafo de comunicación.
$(\cdot)^f$ superindice $f$ hace referencia a que pertenece al grafo de interconexión física.

## 2. SISTEMAS MULTIAGENTE INTERCONECTADOS

Un sistema multiagente está compuesto por agentes con dinámica propia que interactúan entre ellos por medio de una red de comunicación, la cual está representada por un grafo $\mathcal{G}_c = (\mathcal{V}, \mathcal{E}_c, \mathcal{W}_c)$, donde $\mathcal{V}$ es el conjunto de nodos o vértices que representan a cada agente, $\mathcal{E}_c$ es el conjunto de aristas de comunicación y $\mathcal{W}_c$ es el conjunto de los pesos de las aristas, los cuales suelen ser igual a 1 (Olfati Saber and Murray, 2003). Los sistemas multiagente interconectados (SMI) son aquellos en los

⋆ Espónsor Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt)

 ISSN en trámite

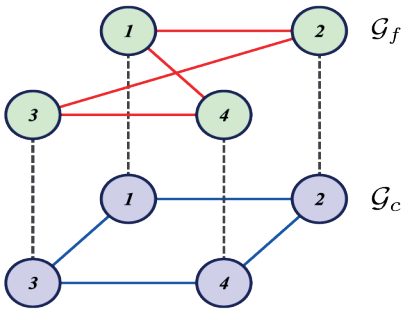



Figura 1. Grafos $\mathcal{G}_c$ y $\mathcal{G}_f$ de un SMI (Turan et al., 2021)

cuales sus agentes, además de tener una interconexión por comunicación, tienen interconexión física. Esta se representa con el grafo $\mathcal{G}_f = (\mathcal{V}, \mathcal{E}_f, \mathcal{W}_f)$, donde $\mathcal{E}_f$ y $\mathcal{W}_f$ son el conjunto de aristas y el conjunto de sus pesos de interconexión. Como se muestra en la Figura 1, los grafos $\mathcal{G}_c$ y $\mathcal{G}_f$ comparten el mismo conjunto de nodos $\mathcal{V} = \{\mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2, ..., \mathcal{V}_N\}$, donde $N$ es el número de agentes y el conjunto de vecinos del nodo $\mathcal{V}_i$ está denotado por $\mathcal{N}_i^c$ y $\mathcal{N}_i^f$, $i = 1, 2, ..., N$ respectivamente a cada grafo. Asimismo, cada grafo puede ser representado por su propia matriz *Laplaciana* $\mathcal{L}^c$ y $\mathcal{L}^f$s que representa matemáticamente su topología de interconexión. En los SMI, el comportamiento dinámico del agente $i$ se ve afectada por sus vecinos $\mathcal{N}_i^f$. Considerando un SMI con $N$ agentes homogéneos con dinámica lineal, la cual puede ser descrita como:

$$\dot{x}_i = Ax_i + A_f \sum_{j \in \mathcal{N}_i^f} w_{ij}^f (x_i - x_j) + Bu_i, \quad i = 1, 2, ..., N \quad (1)$$

donde $x_i \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados del agente $i$, $x_j \in \mathbb{R}^n$ pertenece al vector de estados de los agentes vecinos, $u_i \in \mathbb{R}$ es la entrada de control, $w_{ij}^f = w_{ji}^f \in \mathbb{R}$ es el peso de interconexión física y $A_f \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de acoplamiento físico entre los agentes (Turan et al., 2021). El error de consenso global para cada agente está dado por:

$$\xi = [\xi_1^T, ..., \xi_N^T], \quad \xi_i = x_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} x_j \quad (2)$$

y el error de consenso del sistema multiagente es $||\xi||$ (Zhongkui and Zhisheng, 2015).

## 3. MICRORRED ELÉCTRICA

Una microrred es un conjunto finito de cargas y fuentes de energía distribuida interconectadas eléctricamente, que actúan como una entidad controlable (Ton and Smith, 2012). Una microrred puede considerarse como un sistema multiagente con interconexión física, en el que cada generador distribuido o sistema de almacenamiento es un agente y las líneas eléctricas son las interconexiones. En

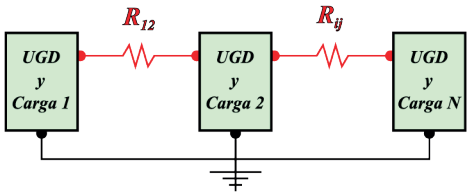



Figura 2. Diagrama de una microrred

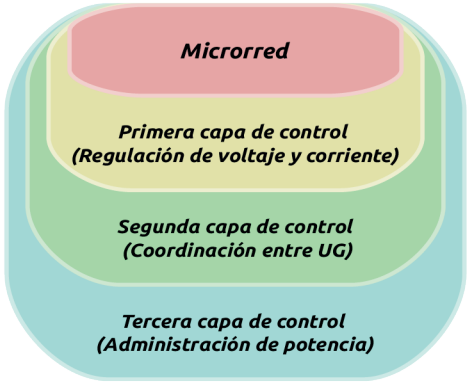



Figura 3. Diagrama de control jerárquico en una microrred (Bhargavi et al., 2021)

la Figura 2 se muestra el diagrama de una microrred, en donde cada bloque contiene una unidad de generación distribuida (UGD) y su carga $R_{Li}$. Las líneas eléctricas de interconexión están representados por las resistencias en rojo $R_{12}$ y $R_{ij}$.

El control de la microrred suele tener un esquema jerárquico, constituido por tres capas de control, como se muestra en la Figura 3. La primera capa se encarga de la regulación local de voltaje y corriente de las UGD, sus puntos de referencia están definidos por los controladores de la segunda capa. La segunda capa de control se encarga de la coordinación entre las UGDs, pudiendo llegar a la coordinación de forma centralizada, distribuida o descentralizada. Finalmente, la tercera capa regula y optimiza la generación de potencia en la microrred (Bhargavi et al., 2021).

### *3.1 Modelo microrred de corriente directa*

Se toma el modelo de (Tucci et al., 2015), se considera una microrred de CD con $N$ UGDs, cada unidad es modelada como una fuente de voltaje ideal y un convertidor reductor (*Buck*) con un filtro RLC conectado a una carga $R_{Li}$. La interconexión a las UGDs vecinas está representada por medio del resistor $R_{ij}$, la cual tiene relación con el calibre y extensión del cable que conecta las UGDs; la salida de voltaje de cada UGD vecino es identificado como $V_j$ (Figura 4). Se asume que el convertidor *Buck* cuenta con su propio controlador, la dinámica de este subsistema es muy rápida en comparación con la dinámica de la microrred y el nivel de tensión no está acotado; esto permite considerar al bloque como ideal en lo subsecuente. Cada convertidor a su vez es controlado mediante una

 ISSN en trámite

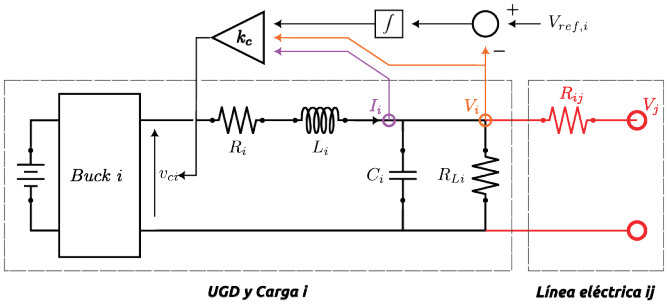



Figura 4. Diagrama de UGD y carga (Turan et al., 2021)

estrategia de retroalimentación de estados con ganancia $k_c = [k_{c1}, k_{c2}, k_{c3}]$ más una acción integral que regula el sistema y permite el seguimiento de referencia $V_{ref}$, lo que evita que $V_i$ en el punto de acoplamiento común (PAC) llegue a niveles críticos (Nahata et al., 2020). El controlador primario manipula el voltaje de referencia $v_{ci}$ del convertidor *Buck* para ajustar la corriente del inductor $L_i$, de esta forma controla el voltaje $V_i$ de salida del capacitor $C_i$.

El modelo matemático del filtro de acoplamiento se obtiene utilizando las leyes de corriente y voltaje de Kirchoff para el diagrama de la Figura 4, obteniendo el siguiente sistema dinámico:

$$\begin{aligned} C_i\dot{V}_i &= -\frac{V_i}{R_{Li}} + I_i - \sum_{j\in\mathcal{N}_i^f} \frac{1}{R_{ij}}(V_i - V_j) \\ L_i\dot{I}_i &= (k_{c1}-1)V_i + (k_{c2}-R_i)I_i + k_{c3}v_{ci} \\ \dot{v}_{ci} &= -V_i + V_{ref,i} \end{aligned} \tag{3}$$

Para el caso de la microrred el modelo de la Ecuación (3) representa al sistema de la Ecuación (1) de la forma siguiente:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{i1} \\ \dot{x}_{i2} \\ \dot{x}_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/(R_{Li}C_{ti}) & 1/C_{ti} & 0 \\ (k_{c1}-1)/L_{ti} & (k_{c2}-R_{ti})/L_{ti} & k_{c3}/L_{ti} \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ x_{i3} \end{bmatrix} \tag{4}$$
$$- \begin{bmatrix} 1/C_{ti} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \sum_{j\in\mathcal{N}_i^f} \frac{1}{R_{ij}} \left( \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ x_{i3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{j1} \\ x_{j2} \\ x_{j3} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

donde $x_i \triangleq [V_i, I_{ti}, v_{ci}]^T = [x_1, x_2, x_3]^T$ y $u = V_{ref,i}$ y cada peso de interconexión $w_{ij}^f = \frac{1}{R_{ij}}$.

## 4. COORDINACIÓN DE UNA MICRORRED CON ESTRATEGIAS BASADAS EN CONSENSO

En esta sección se presentan dos estrategias de consenso para la coordinación de UGDs en una microrred, la primera estrategia está enfocada en el consenso de voltaje en nodos y la segunda estrategia, para el consenso en la distribución de corrientes.

Se considera una microrred con $N$ UGDs con dinámica en (3). El control secundario modifica la referencia de voltaje $V_{ref,i}$ para cada agente con la finalidad de lograr el consenso de las UGDs. Esta modificación se hace mediante el incremento $\Delta V_i$ al voltaje nominal de la microrred $V_{ref}$:

$$V_{ref,i} = V_{ref} - \Delta V_i \tag{5}$$

### *4.1 Consenso de voltajes de nodo*

Para el consenso de voltajes de las UGD dentro de la microrred se emplea un protocolo de consenso básico:

$$\Delta V_i = k \sum_{j\in\mathcal{N}_i^c} w_{ij}^c (V_i - V_j), \; i = 1, 2, ..., N \tag{6}$$

la cual permite que los voltajes en la microrred lleguen al consenso si su grafo de comunicación $\mathcal{G}_c$ está conectado y su interconexión física es débil (Turan et al., 2021). En (6), $k \in \mathbb{R}$ es la ganancia de realimentación del protocolo de consenso, la cual permite cumplir con la condición de que todos los agentes en lazo cerrado sean *Hurwitz*.

### *4.2 Consenso para distribución de corrientes*

El objetivo de control de la estrategia de consenso para distribución de corrientes es lograr que todas las UGDs alimenten proporcionalmente la carga total en la microrred. Esto es deseable cuando alguna UGD no es capaz de suplir la demanda de su carga, por lo que necesita de la potencia de las demás UGDs. La distribución de la carga en proporción a la capacidad de cada UGD se consigue midiendo la corriente de salida por unidad, es decir escalando $I_i$ respecto a un factor de escalamiento, en este caso el valor de la corriente nominal $I_i^{nom}$ de cada UGD. Por lo que si se considera una corriente de carga constante, la distribución de la carga de la microrred entre las UGDs se consigue cuando:

$$\frac{I_i}{I_i^{nom}} = \frac{I_j}{I_j^{nom}} \; \forall i, j \in \mathcal{V} \tag{7}$$

Esta distribución de corrientes se logra mediante un balance de voltajes en la microrred, al lograr que el voltaje promedio de todos los voltajes $V_i$, $i = 1, 2, ..., N$ sea igual al valor de referencia de voltaje $V_{ref}$, es decir:

$$v_p = \frac{1}{N} \sum_{i\in\mathcal{V}} V_i = V_{ref} \tag{8}$$

Para solucionar el problema de la distribución de corrientes y balance de voltaje en (Tucci et al., 2018) se propone el siguiente algoritmo de consenso.

$$\Delta\dot{V}_i = k \sum_{j\in\mathcal{N}_i^c} w_{ij}^c \left[ \frac{I_i}{I_i^{nom}} - \frac{I_j}{I_j^{nom}} \right], \; i = 1, 2, ..., N \tag{9}$$

## 5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se presentan los resultados de simulación de una microrred de CD con voltaje nominal de $48V$, se consideran tres UGDs con la topología de los grafos en la Figura 5, cada línea roja representa un resistor $R_{ij} \in \{1{,}0 \; 1{,}1\}$, las líneas azules los enlaces de comunicación

 ISSN en trámite

y los nodos representan a las UGDs. El comportamiento dinámico de cada UGD es el presentado en (4). También, se considera una fuente de voltaje externa (FVE), la cual no tiene comunicación con los demás agentes, solo tiene interconexión física con el Agente 1 y tiene un voltaje fijo en $48V$. Se consideran tres escenarios en el control secundario de la microrred; el primero, se considera lazo abierto; el segundo, se aplica la estrategia para consenso de voltajes y finalmente, en el tercero, se aplica la estrategia para balance de voltaje y consenso para distribución de corrientes. La simulación se realizó en *Scilab*, se añadió ruido blanco Gaussiano a la entrada de cada protocolo de consenso para simular ruido de medición. Asimismo, se considera incertidumbre paramétrica, cada agente tiene diferentes valores paramétricos en los elementos del filtro RLC y su resistencia de carga, los cuales están en la Tabla 1.

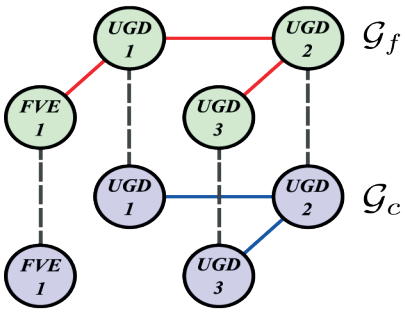



Figura 5. Grafos de microrred con 3 agentes

Tabla 1. Parámetros de las UGD (Tucci et al., 2016)

| $UGD$ | $R_i(\Omega)$ | $L_i(mH)$ | $C_i(mF)$ | $R_{Li}(\Omega)$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.2 | 1.8 | 2.2 | 8 |
| 2 | 0.1 | 2.2 | 1.7 | 12 |
| 3 | 0.6 | 2.5 | 2.3 | 24 |

### *5.1 Lazo abierto*

Se considera el voltaje de referencia $V_{ref,i} = V_{ref} = 48V$ en cada agente y en lazo abierto, se tiene la respuesta de los estados de las UGDs en la Figura 6, en la cual se puede ver que llega al voltaje de referencia en $t = 1s$ En $t = 15s$ se aplica al Agente 1 una perturbación de tipo escalón para aumentar la demanda de corriente de su carga. En la Figura 7 se muestra el comportamiento de la potencia. En líneas continuas las UGDs y la FVE; en líneas punteadas las cargas. Se puede ver que cada agente genera solo la potencia demandada por su carga.

### *5.2 Consenso de voltajes*

Considerando el voltaje de referencia $V_{ref} = 48V$, con $V_{ref,i}$ en (5) y bajo el protocolo de consenso en (6), con $k = 1$ y $w_{ij}^c = 1$, $\forall i, j \in \mathcal{V}$; se tiene la respuesta de los estados en la Figura 8. En $t = 15s$ al Agente 1 se le aplica una perturbación de tipo escalón para aumentar la demanda de corriente de su carga.

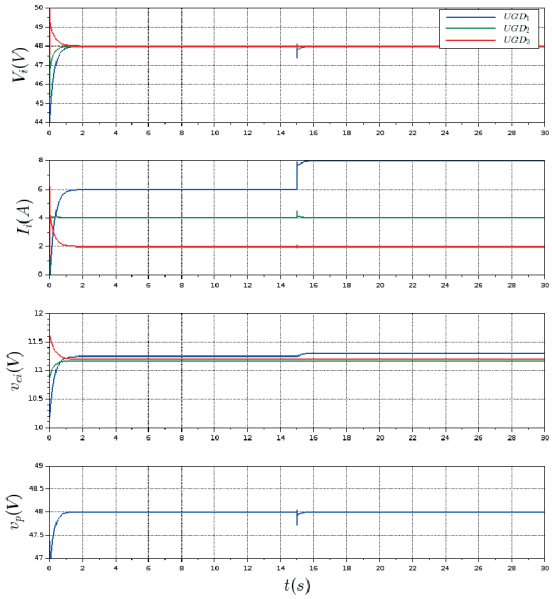



Figura 6. Estados de las UGDs en lazo abierto

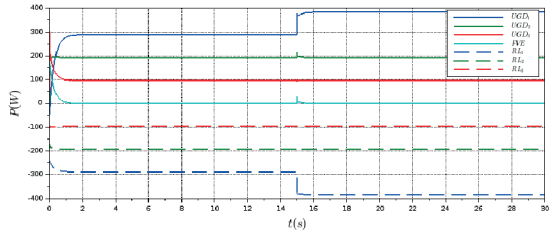



Figura 7. Potencias en la microrred en lazo abierto

En la Figura 9 se muestra el error de consenso $||\xi_v||$ para el protocolo de voltajes, el cual fue calculado con (2). Como se puede apreciar, el protocolo (6) reduce el error de consenso rápidamente, incluso después de la perturbación, pero se ve afectado por el ruido blanco a la entrada del protocolo. En la Figura 10, se muestra las potencias en la microrred con la estrategia de consenso para voltajes.

### *5.3 Consenso para distribución de corrientes y balance de voltaje*

Para probar la estrategia de consenso para el balance de voltaje y distribución de corrientes, se considera el voltaje de referencia de la microrred $V_{ref} = 48V$, con $V_{ref,i}$ en (5) y con la estrategia de consenso en (9), con $k = 1$ y $w_{ij}^c = 1$, $\forall i, j \in \mathcal{V}$. Las corrientes nominales de los agentes son: $I_1^{nom} = 10A$, $I_2^{nom} = 5A$, $I_3^{nom} = 3A$. Igualmente, en $15s$ se aplica una perturbación de tipo escalón al primer agente para aumentar la demanda de corriente de su carga.

La respuesta de los estados de las UGDs se muestra en la Figura 11. En color azul está el Agente 1, en verde el Agente 2 y en rojo el Agente 3. Como se puede ver,

 ISSN en trámite

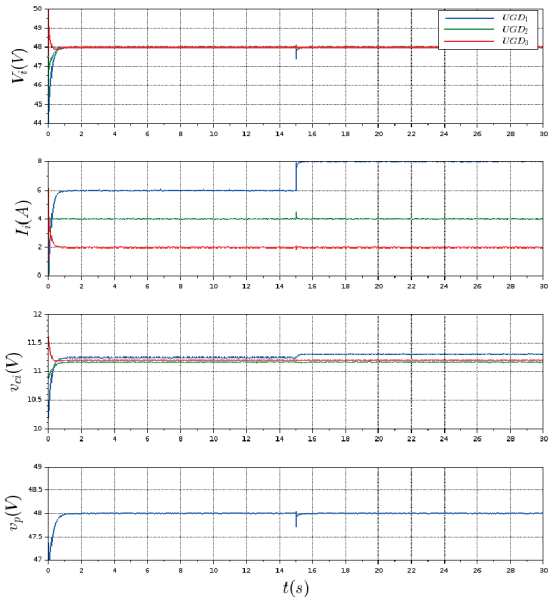



Figura 8. Estados de las UGDs con protocolo de consenso para voltajes

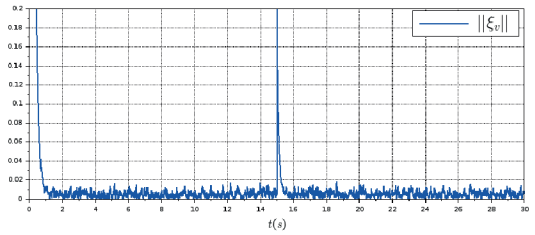



Figura 9. Error de consenso en voltajes

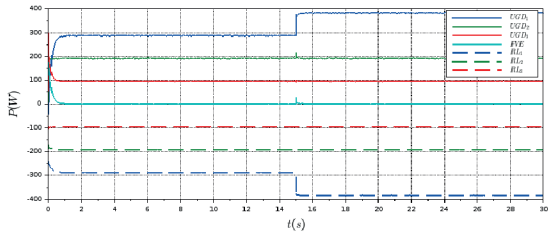



Figura 10. Potencias en la microrred con consenso en voltajes

al principio el Agente 1 mantiene un mayor voltaje para poder repartir parte de su corriente a los demás agentes. Después de la perturbación baja su voltaje para recibir corriente de los otros agentes. También se puede ver que el voltaje promedio $v_p$ se mantiene prácticamente en $48V$, aun durante la perturbación, regresa rápidamente a $48V$. Asimismo, como se muestra en la Figura 12, se logra el consenso en la corriente por unidad. Después de la perturbación, las corrientes por unidad vuelven al consenso, aunque con una dinámica más lenta, con

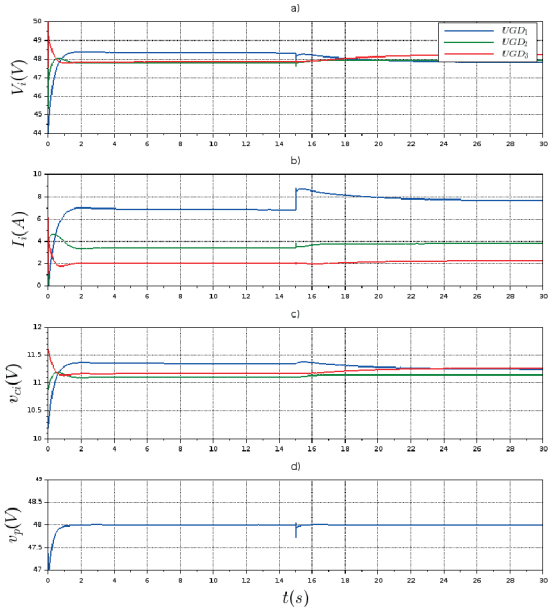



Figura 11. Estados de las UGDs con protocolo de consenso para distribución de corrientes

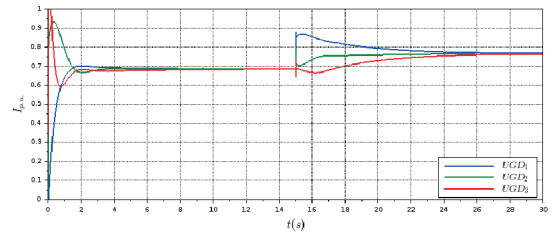



Figura 12. Corrientes por unidad

respecto al consenso de voltajes. Esto se puede apreciar mejor en la Figura 13 donde se muestra el error de consenso de corrientes $||\xi_c||$.

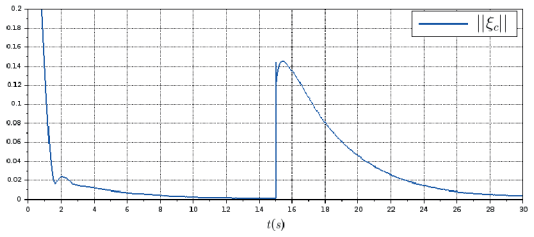



Figura 13. Error de consenso en corrientes por unidad

En la Figura 14 se muestran las potencias de la FVE, las UGDs y sus cargas. Al principio se observa que la FVE consume parte de la potencia de la microrred, pero después del aumento de la demanda de la carga del Agente 1, la FVE empieza a aportar potencia a la microrred, por lo que la carga total de la microrred también es distribuida entre la FVE, incluso si no tiene comunicación con los demás agentes.

 ISSN en trámite

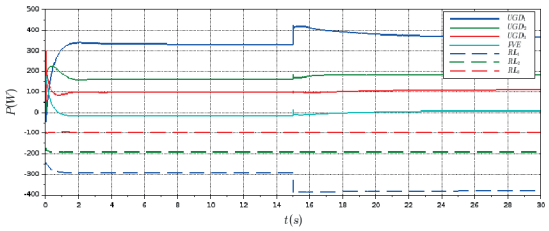



Figura 14. Potencias en microrred con consenso para distribución de corrientes

## 6. CONCLUSIONES

En este artículo se analizó una microrred con estrategias de consenso, desde un punto de vista de SMI. Se aplicaron las estrategias de consenso para voltaje; para balance de voltaje con distribución de corrientes y en lazo abierto en la segunda capa. Se pudo observar que en ambos casos, con las estrategias de consenso, se logró el consenso. Durante las simulaciones, al protocolo de consenso de voltaje propuesto en (Turan et al., 2021), se aplicó una modificación, en este artículo solo se consideró como realimentación a $V_i$, en comparación con el protocolo original en el que se realimentan todos los estados. Esto se hizo porque al considerar la incertidumbre paramétrica, los estados de los agentes son distintos, por ende al tratar de llegar al consenso con todos los estados, solo se logra aumentar el error de consenso a la salida, en este caso el voltaje $V_i$. También, se observó que se vio afectado por el ruido blanco que se agregó a la entrada del protocolo de consenso.

El segundo protocolo de consenso tienen una mayor utilidad en la microrred, porque permite distribuir proporcionalmente la carga total de la microrred entre las UGDs, inclusive entre la FVE que no tiene comunicación con los demás agentes, a diferencia de la estrategia de consenso para voltajes y lazo abierto, en donde la FVE no participa, ya que no consume ni aporta potencia a la microrred. Cabe resaltar que este segundo protocolo tiene una respuesta lenta, $15s$ en llegar al consenso estacionario, en comparación con el primer protocolo, que llega al consenso en $1s$.

Los trabajos futuros se concentrarán en evaluar una estrategia con redes neuronales artificiales en apoyo a los protocolos de consenso, tomando como base el presente artículo.

## REFERENCIAS

Bhargavi, K.M., Jayalakshmi, N.S., Gaonkar, D.N., Shrivastava, A., and Jadoun, V.K. (2021). A comprehensive review on control techniques for power management of isolated dc microgrid system operation. *IEEE Access*, 9. doi:10.1109/ACCESS.2021.3060504.

Blekhman, I., Fradkov, A., Nijmeijer, H., and Pogromsky, A. (1997). On self-synchronization and controlled synchronization. *Systems & Control Letters*, 31(5), 299–305. doi:https://doi.org/10.1016/S0167-6911(97)00047-9. Control of Chaos and Synchronization.

Nahata, P., Soloperto, R., Tucci, M., Martinelli, A., and Ferrari-Trecate, G. (2020). A passivity-based approach to voltage stabilization in dc microgrids with zip loads. *Automatica*, 113, 108770. doi: https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.108770.

Olfati Saber, R., Fax, J.A., and Murray, R.M. (2007). Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *Proceedings of the IEEE*, 95, 215–233.

Olfati Saber, R. and Murray, R.M. (2003). Consensus Protocols for Networks of Dynamic Agents. *Proceedings of the American Control Conference*, 2, 951–956. doi: 10.1109/acc.2003.1239709.

Qin, J., Ma, Q., Shi, Y., and Wang, L. (2017). Recent advances in consensus of multi-agent systems: A brief survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64, 4972–4983. doi:10.1109/TIE.2016.2636810.

Shahbazitabar, M., Abdi, H., Nourianfar, H., Anvari-Moghaddam, A., Mohammadi-Ivatloo, B., and Hatziargyriou, N. (2021). *An Introduction to Microgrids, Concepts, Definition, and Classifications*, 3–16. Springer International Publishing. doi: doi.org/10.1007/978-3-030-59750-4-1.

Spanos, D., Olfati-Saber, R., and Murray, R. (2005). Dynamic consensus on mobile networks. *The 16th IFAC World Congress*, 1–6.

Ton, D.T. and Smith, M.A. (2012). The u.s. department of energy's microgrid initiative. *The Electricity Journal*, 25(8), 84–94. doi: doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.013.

Trigo, L.I.L., Archundia, E.R., Gnecchi, J.A.G., Patiño, A.M., and Campos, G.M.C. (2019). Smart grids en méxico: Situación actual, retos y propuesta de implementación. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20, 1–12. doi:10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.015.

Tucci, M., Meng, L., Guerrero, J.M., and Ferrari-Trecate, G. (2016). A consensus-based secondary control layer for stable current sharing and voltage balancing in DC microgrids. *arXiv preprint arXiv:1603.03624*, 1–32.

Tucci, M., Meng, L., Guerrero, J.M., and Ferrari-Trecate, G. (2018). Stable current sharing and voltage balancing in DC microgrids: A consensus-based secondary control layer. *Automatica*, 95, 1–13. doi: 10.1016/j.automatica.2018.04.017.

Tucci, M., Riverso, S., Vasquez, J.C., Guerrero, J.M., and Ferrari-Trecate, G. (2015). A decentralized scalable approach to voltage control of dc islanded microgrids. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24, 1965–1979. doi:10.1109/TCST.2016.2525001.

Turan, M.S., Xu, L., and Ferrari-Trecate, G. (2021). On Consensusability of Linear Interconnected Multi-Agent Systems and Simultaneous Stabilization. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 1–12. doi: 10.1109/TCNS.2021.3106446.

Zhongkui, L. and Zhisheng, D. (2015). *Cooperative control of multi-agent systems: a consensus region approach*, volume 148. Press, CRC.

 ISSN en trámite

# Speed and position control of a robotic arm with application to a GMAW welding process ⋆

**Salvador S. Salgado** * **A.C. Téllez-Anguiano** *
**J. Alfonso-Salazar-Torres** * **R. Martínez-Parrales** *
**T.E. Sandoval-Valencia** *

* *TecNM/Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, CP 58120 México (e-mail: m13121099@tecmor.mx, adriana.ta@morelia.tecnm.mx, juan.st@morelia.tecnm.mx, ricardo.mp@morelia.tecnm.mx, tania.sv@morelia.tecnm.mx ).*

**Abstract:** Robotic welding is an application area of industrial robotics that involves technological development to achieve good-quality welding by controlling some welding process parameters, such as the speed and position of the robotic arm. This article proposes a methodology to carry out the real-time adjustment of the robotic arm speed and position by combining classical control and artificial intelligence to improve the welding quality by reducing the position errors caused by the wear of the welding cathode, material imperfections or an inadequate process speed. The proposed methodology is validated in simulation using an Epson C4 robot.

*Keywords:* Reliable measurement, Manipulator robots, Information and sensors, Robotics, Process optimization.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un robot es un mecanismo reprogramable, autónomo y multifuncional utilizado para realizar una gran variedad de tareas. Existen robots de diferentes tipos pero los más utilizados son los robots industriales que constan de varias articulaciones que funcionan de manera similar a un brazo humano; también son conocidos como manipuladores industriales y se utilizan para mover materiales, manipular objetos o manejar herramientas, facilitando o sustituyendo la labor de operadores humanos.

Una aplicación de robots en procesos industriales es el área de soldadura industrial, la cual puede representar un trabajo pesado y con riesgo para un operador humano.

En la literatura existen diversass investigaciones relacionadas con la automatización de los procesos de soldadura con el uso de robots. En Loukas et al. (2021), se presenta un modelo que relaciona el área de la sección transversal y la posición del electrodo con el ancho del cordón, para determinar automáticamente los parámetros de soldadura. En Xu and Wang (2021) se presentan investigaciones recientes relacionadas con soldadura robótica inteligente basada en sensores de visión y analiza sus características y escenarios de aplicación.

⋆ Los autores agradecesen al CONACYT por la beca otorgada para el estudio de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica.

En Maeyer and Demeester (2021) se evalúan y comparan algoritmos de planificación de movimiento para soldadura por arco robótico, para integrar planificadores comerciales y de código abierto en diferentes niveles de abstracción, aplicado a dos casos reales de soldadura.

En Wang et al. (2021) los autores estudian la optimización inteligente de trayectorias automáticas y eficientes de un robot de soldadura, empleando estrategias para evadir obstáculos. En Ku et al. (2014) se desarrolla el hardware y software de control de un robot de soldadura móvil que es capaz de asegurar la distancia entre la antorcha y la zona de soldadura.

En el presente trabajo se presenta una metodología para ajustar, en tiempo real, la velocidad y la posición de un brazo robótico en un proceso de soldadura, que combina un control clásico con un sistema de intelidencia artificial para determinar fallas en un cordón de soldadura derivado de estos parámetros. La metodología se valida en simulación, considerando un robot Epson C4.

### *1.1 Soldadura robotizada*

La soldadura es un proceso de unión de materiales que consiste en calentarlos a temperaturas lo suficientemente altas para que se fusionan, Jeffus (2009). Gracias a la robótica industrial estos procesos de soldadura se automatizan y se hacen más eficientes y seguros.

 ISSN en trámite

A la unión de la robótica y los procesos de soldadura se le conoce como soldadura robotizada. El proceso de soldadura más utilizado en soldadura robotizada es el denominado **soldadura por arco metálico con protección de gas (GMAW)** debido a la alta velocidad de soldadura y limpieza posterior, lo que produce una excelente calidad de fusión.

Hay múltiples parámetros a considerar en el proceso de soldadura GMAW pero los más importantes son la corriente, el voltaje de arco y velocidad de soldadura. Otros parámetros como la temperatura de la soldadura, la posición del arco o cátodo y el tiempo de depósito del cordón de soldadura generalmente son constantes durante el proceso, Vargas (2007).

Para un brazo robótico los parámetros importantes que están directamente relacionados con su funcionamiento son su velocidad y su posición, por lo que es necesario tener procesos de control que permitan ajustar estos parámetros para obtener una buena calidad en el cordón de soladura.

### *1.2 Controlador PID digital*

El control PID es el esquema más típico utilizado en la teoría de control clásica y en la industria moderna. Ogata (2010); Bolton (2013).

El control PID puede usarse en la robótica para corregir la posición o velocidad de las articulaciones del robot, siendo la entrada del proceso el voltaje aplicado al motor mientras que la salida del proceso es la posición del eje del motor.

El control PID se implementa como (1):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^T e(t)\mathrm{d}t + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{1}$$

Al aplicar la transformada de Laplace, se obtiene la función de tranferencia:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \tag{2}$$

donde $K_p$ es la ganancia proporcional, $T_i$ es el tiempo integral y $T_d$ es el tiempo derivativo.

Sin embargo, esta ecuación se encuentra en el dominio de tiempo y para el control digital es conveniente trabajar en el dominio de la frecuencia. Aplicando técnicas de procesamiento de señales y la transformada $Z$ se obtiene la ecuación del controlador PID digital en su forma de velocidad.

$$U(z) = -K_p Y(z) + K_i \frac{R(z) - Y(z)}{1 - z^{-1}} - \cdots - K_d(1 - z^{-1})Y(z) \tag{3}$$

donde $R(z)$ es el valor en la entrada del del controlador y $Y(z)$ es el valor en la salida del sistema. La ecuación PID en forma de velocidad es las más utilizada en los sistemas de control digital ya que presenta una mejor respuesta que la forma posicional, Ogata (1996).

Para la sintonización de un control PID se utiliza la regla de sintonía de Ziegler-Nichols usando la gráfica que se muestra en la Fig. 1 y las fórmulas que se muestran en la Tabla 1. La curva en forma de "S" es la respuesta transitoria de la planta al escalón unitario.

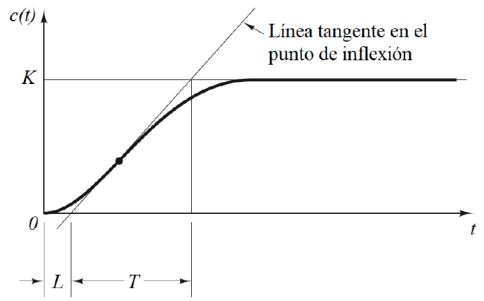



Fig. 1. Curva de respuesta en forma de S.

Table 1. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta

| Tipo de controlador | $K_p$ | $T_i$ | $T_d$ |
|---|---|---|---|
| P | $\frac{T}{L}$ | $\infty$ | 0 |
| PI | $0.9\frac{T}{L}$ | $\frac{L}{0.3}$ | 0 |
| PID | $1.2\frac{T}{L}$ | $2L$ | $0.5L$ |

### *1.3 Controlador PID y sistema de detección de fallas*

La función del controlador PID es corregir la velocidad y posición del brazo robótico en respuesta de las fallas en el proceso de soldadura detectadas por un sistema automático de detección.

En este trabajo se propone un sistema de control clásico, PID, para un brazo robótico, aplicado a un proceso de soldadura, basado en un sistema de detección de fallas que tiene como objetivo detectar anomalías en el proceso de soldadura que tengan alguna implicación en la calidad del cordón de soldadura, así como proporcionar la información necesaria para eliminar o disminuir esos errores.

Al momento de detectar una calidad de soldadura ineficiente a través de un proceso automático de reconocimiento de patrones de los cordones de soldadura, mediante los algortimos desarrollados en (Valencia (2021)), el sistema corregirá la velocidad y la posición del robot. Además, si se detecta error en la posición del arco de soldadura o que no hay contacto con la superficie a soldar se realiza la corrección de dicha posición. Los resultados obtenidos son validados en un software de programación y simulación de robots de la marca Epson.

 ISSN en trámite

## 2. METODOLOGÍA

### *2.1 Medición de velocidad*

Una velocidad adecuada en los procesos de soldadura robotizada es importante ya que si el desplazamiento es demasiado rápido no habrá una correcta fusión de los materiales y si es muy lenta puede provocar daños en los materiales que se quieren soldar.

Para medir la velocidad lineal de desplazamiento se utiliza el circuito integrado MPU6050, el cual proporciona una unidad de medición inercial o IMU (*Inertial Measurment Units*) de 6 grados de libertad, pues combina un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes. Este sensor es muy utilizado en navegación, goniometría y estabilización, entre otras aplicaciones.

El acelerómetro entrega valores de aceleración medidos en los ejes $x$, $y$ y $z$. Dichos valores en bruto deben de interpretarse y convertirse a $m/s^2$. Estos valores de aceleración se deben convertir en valores de velocidad usando (4).

$$v_{final} = v_{inicial} + (a \times t_s) \tag{4}$$

donde $v_{final}$ es la velocidad en el punto $B$, $v_{inicial}$ la velocidad en el punto $A$, $a$ la aceleración en el punto B y $t_s$ el tiempo de desplazamiento entre el punto $A$ y el punto $B$.

En un desplazamiento en un plano solo se considera la velocidad en los ejes $x$ y $y$. Utilizando la Ec. (4), se calculan las velocidades en cada eje cartesiano en cada instante de tiempo. Para determinar la magnitud de la velocidad total, se toma la magnitud de ambas velocidades obtenidas aplicando (5).

$$v_{total} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \tag{5}$$

### *2.2 Medición de posicionamiento*

Por lo general, la distancia entre el arco de soldadura y la superficie del material a soldar es constante. Sin embargo, en algunas ocasiones ocurren pequeñas variaciones producidas por desgaste en el electrodo, variaciones en el arco o imperfecciones en la superficie a soldar que pueden provocar defectos de soldadura. Por esta razón es necesario ajustar la posición del robot para que la distancia entre el arco y el material sea constante.

La manera más simple de comprobar que existe un contacto perfecto del arco con la superficie a soldar es con un sensor de contacto, el cual consiste de émbolo dentro de un cilindro que tiene contacto con la superficie. Cuando existe una variación en la altura del émbolo, el sensor calcula internamente la cantidad de desplazamiento.

### *2.3 Reconocimiento de patrones de los cordones de soldadura*

Para identificar la calidad de la soldadura se hace uso de un proceso de reconocimiento automático de la calidad de los cordones de soldadura. Dicho proceso consiste en un algoritmo de clasificación que usa diferentes métodos de procesamiento de imágenes e inteligencia artificial (IA). De acuerdo a ciertas características de los cordones se puede detectar una soldadura adecuada o defectuosa e implementar los resultados obtenidos para el control del sistema, garantizando la disminución de las fallas, Valencia (2021).

En la Fig. 2 se muestran los efectos en un cordón de soldadura de la variación de diferentes parámetros en un sistema automatizado de soldadura aplicado sobre acero al carbono.

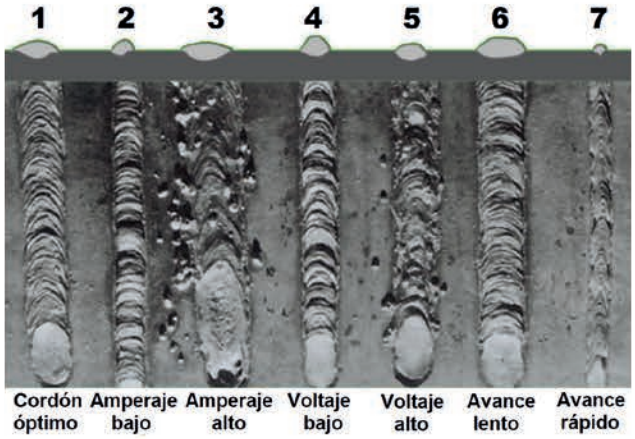



Fig. 2. Cordones de soldadura considerando la variación de diferentes parámetros.

Los resultados del reconocimiento de patrones se envían al microcontrolador en forma de un arreglo de datos que corresponden a los patrones de soldadura detectados. Los cordones que se consideran para este trabajo son los numerados 1, 6 y 7 en la Fig. 2.

### *2.4 Simulación y comunicación*

El brazo robótico Epson C4 es un manipulador pequeño pero con avanzada tecnología que le permite realizar tareas complejas y con gran eficiencia. La programación de este robot se lleva a cabo a través de comunicación serial por medio de un software propio de la marca.

La comunicación serial también permite que algunos elementos externos al software de Epson puedan comunicarse con el robot, ya sea por medio de un computadora con Matlab o por un microcontrolador.

El software de Epson también permite crear un simulación con un modelo 3D completamente funcional del robot Epson C4, que también se puede comunicar de manera serial.

 ISSN en trámite

La mejor manera de simular y comunicarse con el robot Epson C4 es a través un microcontrolador. En este trabajo se utiliza un microcontrolador MSP430FR6989 de Texas Instruments.

### *2.5 Ajuste de posición*

Para un ajuste de posición automático, primero se establece un punto deseado sobe el eje $z$ emulando una superficie real de contacto.

Posteriormente, el robot Epson le envía al microcontrolador la información actual de su posición y si ésta no coincide con el punto $z$ deseado, la etapa de control, a través del microcontrolador, desplaza las articulaciones del robot sobre el eje $z$ hasta este punto.

En la Fig. 3 se muestra un diagrama general del proceso de ajuste de posición.

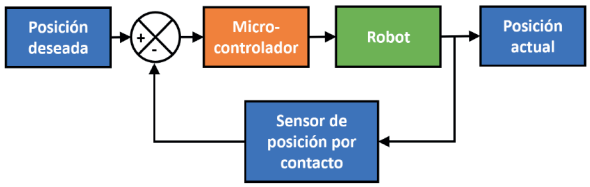



Fig. 3. Proceso para el ajuste de posición.

### *2.6 Ajuste de velocidad*

Para la simulación del ajuste de velocidad se emplean los resultados de la investigación sobre reconocimiento de patrones mencionada en la Sección 2.3.

Con base en los resultados de la clasificación se asigna un valor para una soldadura óptima, en este caso, un valor de 0. Para una soldadura defectuosa provocada por baja velocidad se asigna un valor de 1 y para una soldadura producida por una velocidad alta un 2.

Dependiendo del valor de calidad del cordón de soldadura, el microcontrolador hace un ajuste automático de la velocidad. Para medir la velocidad se hacen uso de los datos obtenidos por el giroscopio MPU6050 colocado en el extremo final del brazo robótico.

De los datos obtenidos en la investigación de reconocimiento de la calidad del cordón de soldadura se determina que la velocidad óptima para un procesos de soldadura GMAW se encuentra entre los 7 y 8.5 mm/s, Valencia (2021).

De manera casi simultánea al depósito del cordón de soldadura, se determina la calidad de éste y la velocidad se ajusta hasta tener una soldadura adecuada. En la Fig. 4 se muestra el diagrama genral del proceso de ajuste de velocidad.

### *2.7 Modelo matemático*

Se utiliza un modelo matemático simple para determinar el ajuste automático de los parámetros de velocidad y

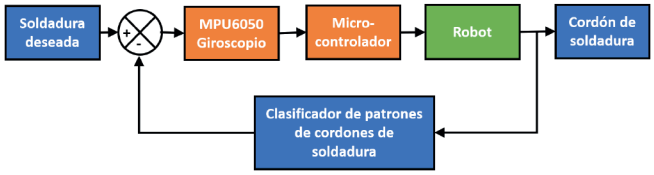



Fig. 4. Proceso para el ajuste de velocidad.

posición del brazo robótico empleado para el proceso de soldadura.

Se tiene una trayectoria de soldadura dada por (6).

$$\begin{aligned} x &= 40\,mm - (8.0\,mm/s)t \\ y &= 0.0\,mm \\ z &= -400.0\,mm \end{aligned} \tag{6}$$

De manera vectorial, el desplazamiento entre $t = 0.0\,s$ y $t = 10.0\,s$ es

$$\begin{aligned} \Delta \boldsymbol{r} &= \boldsymbol{r}_{10} - \boldsymbol{r}_0 \\ &= (-40.0\,mm)\hat{\imath} + (0.0\,mm)\hat{\jmath} - (400.0mm)\hat{k} \\ &- (40.0\,mm)\hat{\imath} - (0.0\,mm)\hat{\jmath} + (400.0mm)\hat{k} \\ &= (-80.0\,mm)\hat{\imath} \end{aligned} \tag{7}$$

Para conocer las componentes de la velocidad instantánea en cada uno de los dos puntos, se obtienen las derivadas de las coordenadas respecto a $t$.

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} = -(8.0\,mm/s) \\ v_y &= \frac{dy}{dt} = 0 \\ v_z &= \frac{dz}{dt} = 0 \end{aligned} \tag{8}$$

Esto indica que la velocidad instantánea en todo momento será constante de $8\,mm/s$ con un ángulo de 0° respecto al eje $y$. Esta información es medida por el MPU6050 y se emplea como referencia de la velocidad deseada.

Para el desplazamiento vertical en el eje $z$ se tiene,

$$z = -400.0\,mm - (0.5\,mm/s)t \tag{9}$$

Ya que el desplazamiento es variable según el desgaste del electrodo de soldadura, no es posible determinar con exactitud el punto al que se quiere llegar.

El brazo se desplazará sobre el eje $z$ hasta que el sensor de posición por contacto vuelva enviar una señal que indique que el electrodo está haciendo contacto adecuadamente con la superficie a soldar.

 ISSN en trámite

*2.8 Sintonización del controlador PID para el ajsute de velocidad*

Para sintonizar el controlador PID encargado de la velocidad es necesario hacer una aproximación del modelo del servomotor que se encuentra en la base del brazo robótico, éste es un motor de AC de 400 W. Con base en sus características y el análisis mostrado en Nise (2011) y Kuo (1996), se obtuvo (10) como función de transferencia del servo-motor.

$$G(s) = \frac{10.0437}{s(6.054 \times 10^{-2}s + 2.0358)} \tag{10}$$

Usando Matlab se puede simular la respuesta transitoria al escalón unitario obteniendo la curva de la Fig. 5

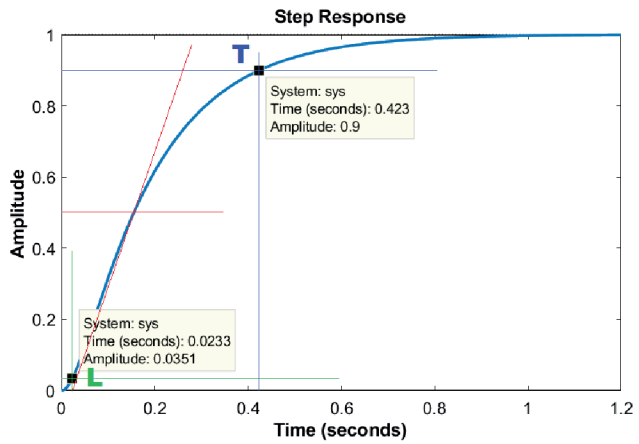



Fig. 5. Curva de respuesta para la Eq. (10)

Como se observa en la Fig. 5 se traza una tangente en el punto de inflexión; de manera gráfica se puede observar que $L \approx 0.0233\,s$ y $T \approx 0.423\,s$.

Usando los datos de la Tabla 1 se obtienen los siguientes parámetros:

$$k_p = 1.2 \times \frac{0.423}{0.0233} = 21.78 \tag{11}$$

$$k_i = \frac{k_p}{T_i} = \frac{k_p}{2L} = \frac{21.78}{2(0.423)} = 25.75 \tag{12}$$

$$k_d = k_p T_d = 0.5Lk_p = 0.5(0.0233)(21.78) = 0.2538 \tag{13}$$

Susituyendo (11), (12) y (13) en (3)

$$U(z) = -21.78Y(z) + 25.75\frac{R(z) - Y(z)}{1 - z^{-1}} - \cdots - 0.2538(1 - z^{-1})Y(z) \tag{14}$$

De este modo se obtiene la función de transferencia del controlador PID digital para el servomotor.

## 3. RESULTADOS

Como se explicó en la sección 2.4, es posible crear una simulación del brazo robótico Epson C4 que puede comunicarse con un microcontrolador para hacer pruebas de funcionamiento.

En la Fig. 6 se muestra el entorno de simulación del robot Epson C4. La simulación consiste en tener el robot en una posición inicial y desde ese punto hacer un movimiento sobre el plano XY a velocidad constante de un punto A un punto B para después volver al punto inicial.

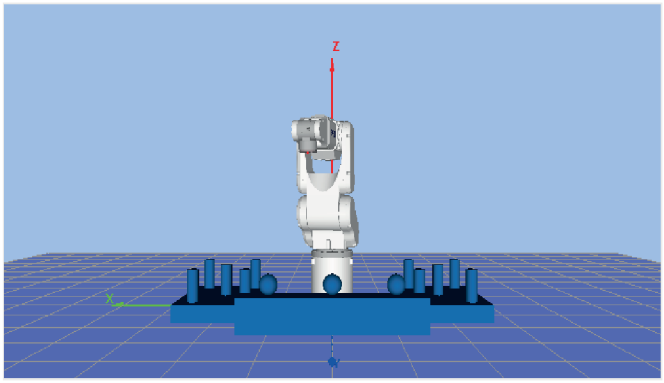



Fig. 6. Entorno 3D de simulación para el Epson C4.

*3.1 Ajuste de posición*

En la Fig. 7 se observa como el offset va cambiando mientras el robot va ajustando su posición hasta el punto deseado, el cual es punto ubicado 5 mm debajo del punto inicial en $z = -400$ mm. Como se observa, el ajuste es lineal, preciso y rápido gracias a las características del robot C4.

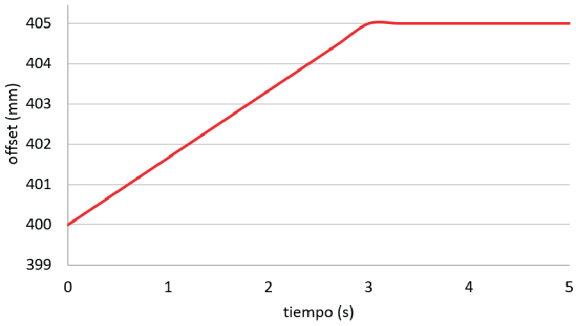



Fig. 7. Ajuste automático de la posición en el eje $z$.

*3.2 Ajuste de velocidad*

En la Fig. 8 se muestra el ajuste de velocidad hasta llegar a la velocidad adecuada para obtener un buena calidad de soldadura, en este caso se inicia con una velocidad alta.

En la Fig. 9 se muestra el resultado cuando se inicia con una velocidad baja. Cuando se obtiene una buena calidad de soldadura el robot se mantiene en esa velocidad.

 ISSN en trámite

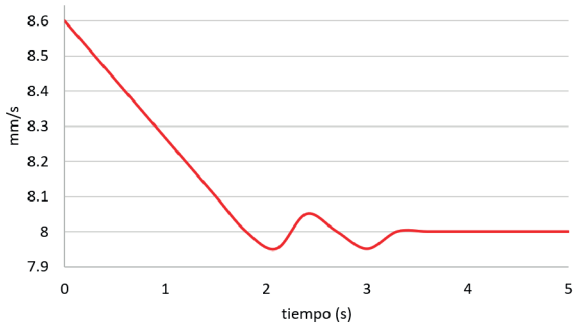



Fig. 8. Ajuste de velocidad, velocidad inicial rápida.

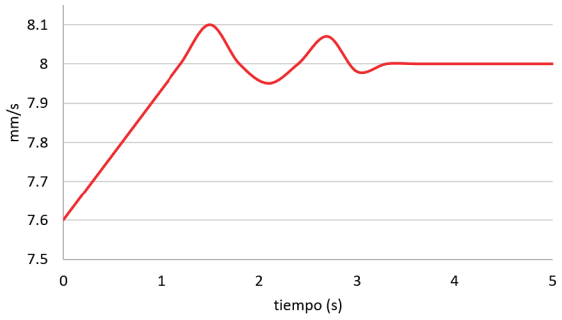



Fig. 9. Ajuste de velocidad, velocidad inicial lenta.

Como se observa en las gráficas, la velocidad se ajusta en los 8 mm/s aproximadamente, este valor está dentro del margen de velocidad requerida para un proceso de soldadura GMAW. Es importante notar que si se llega a alcanzar la velocidad requerida pero el instrumento de clasificación detecta una calidad de soldadura no deseada, se comunicará con el robot para hacer el ajuste de velocidad hasta obtener la calidad deseada.

Por último, en las gráficas se observa que el proceso de ajuste toma aproximadamente dos segundos, con oscilaciones derivadas de las constantes de control seleccionadas. Este tiempo se ajusta en función de las condiciones, elementos, electrodos y calidad deseada en el proceso de soldadura.

## 4. CONCLUSIONES

Los resultados de simulación muestran que es posible ajustar la velocidad y posición del robot Epson C4 empleando un microcontrolador que responda a información específica de la calidad del cordón de soldadura. Además, la ayuda del sensores externos e inteligencia artificial permiten implementar un sistema de soldadura robotizada que puede ser independiente del hardware del robot.

Debido a que la etapa de control requiere un monitoreo constante de la calidad de la soldadura obtenida durante el proceso, también es necesario detectar fallas y hacer correcciones de manera automática. De este modo, si después de varios ajustes se sigue teniendo una mala calidad en la soldadura, se puede proceder a investigar otras causas de falla que ya no se encuentran en el robot sino en otros parámetros como la corriente, voltaje o temperatura que dependen de la máquina de soldar.

Sin embargo, si bien en la simulación presentada el ajuste de velocidad es relativamente lento para trayectorias pequeñas, mediante el ajuste de los parámetros de control es factible obtener resultados con tiempos de respuesta adecuados para un proceso industrial. También es posible considerar configuraciones PI que cambien esta velocidad de ajuste y mejorar la respuesta del sistema al considerar los sensores que posee el robot Epson C4.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT por la beca otorgada para el estudio de Maestría en Ciencias.

## REFERENCES

Bolton, W. (2013). *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario.* Alfaomega, México, 5th edition.

Jeffus, L. (2009). *Soldadura. Principios y aplicaciones*, volume III. Editorial Paraninfo, Madrid, 5th edition.

Ku, N., Ha, S., and Roh, M. (2014). *Design of controller for mobile robot in welding process of shipbuilding engineering*, volume 1. Journal of Computational Design and Engineering.

Kuo, B.C. (1996). *Sistemas de Control Automático.* Prentice Halll, México, 7th edition.

Loukas, C., Williams, V., Jones, R., Vasilev, M., MacLeod, C., Dobie, G., Sibson, J., Pierce, S.G., and Gachagan, A. (2021). *A cost-function driven adaptive welding framework for multi-pass robotic welding*, volume 67. Journal of Manufacturing Processes.

Maeyer, J. and Demeester, E. (2021). *Benchmarking framework for robotic arc welding motion planning*, volume 97. Procedia CIRP.

Nise, N.S. (2011). *Control System Engineering.* John Wiley & Sons, Incl, California, 6th edition.

Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering.* Prentice Hill, New Jersey, 5th edition.

Ogata, K. (1996). *Sistemas de control en tiempo discreto.* Prentice Hill, México, 2nd edition.

Valencia, T.E.S. (2021). *Análisis de defectos en soldadura basado en parámetros eléctricos y su correlación con procesamiento de imágenes.* México.

Vargas, L.R. (2007). *Estudio del efecto de los parámetros de soldadura robotizada en un componente estructural de aceros disímiles por medio de GMAW.*

Wang, X., X., Z., Xia, Z., and Gu, X. (2021). *A survey of welding robot intelligent path optimization*, volume 63. Journal of Manufacturing Processes.

Xu, Y. and Wang, Z. (2021). *Visual sensing technologies in robotic welding: Recent research developments and future interests*, volume 320. Sensors and Actuators A: Physical.

 ISSN en trámite

# Instrumentación industrial aplicada a sistemas de supervisión de intercambiadores de calor en procesos de pasteurización de jugos.

**S.Y. García-Fernández[1], P.E. Alvarado-Méndez[2], C.M. Astorga-Zaragoza[2], A. Gómez-Molina[1]**

*[1]Tecnologico Nacional de México Campus ITESCO, CARRETERA, Antigua a Minatitlán KM 16.5, Reserva Territorial, 96536 Coatzacoalcos, Ver.*
*(ibqa18.sgarciaf@itesco.edu.mx, agomezm@itesco.edu.mx).*
*[2]Tecnologico Nacional de México Campus CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Palmira, 62490 Cuernavaca, Mor.*
*(D17CE052@cenidet.tecnm.mx, carlos.az@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: En el presente artículo se muestra el funcionamiento dinámico de un intercambiador de calor describiendo cada una de su nomenclatura, se presenta el desarrollo de un observador adaptable como método para conocer los estados y parámetros desconocidos partiendo de la utilización de un sistema no lineal. Se procedió a realizar una prueba de estabilidad para garantizarlo. En cuanto a los resultados se presentan mediante simulaciones representadas de manera gráficamente. Como ejemplo de escenario de falla se eligió la pasteurización de jugos ya que es un proceso industrial en el cual se puede aplicar y para poder monitorear los comportamientos y determinar las fallas se propone un sensor de flujo de calor.

*Keywords:* Intercambiador de Calor, Sistemas no lineales, Observador Adaptable.

## 1. INTRODUCCIÒN

El proceso mediante el cual se transmite energía de un medio o material a otro de menor temperatura se conoce con el nombre de transferencia de calor. Usualmente relacionamos este proceso exclusivamente dentro de la industria química pero no es así, tiene diversas aplicaciones tal es el caso de la industria alimentaria. La transferencia de calor ocurre en los tratamientos térmicos a los que se someten los alimentos, con el objetivo de aumentar su durabilidad.

Existen tres diferentes mecanismos de transferencia de calor: conducción. convección y radiación. [Cabanzón Labat, 2018] Para llevarse a cabo este procedimiento se deben utilizar ciertos equipos que lo faciliten uno de ellos es el intercambiador de calor que se puede, entonces, definir como aquellos equipos en los que se transfiere energía térmica entre dos o más fluidos que ingresan a diferentes temperaturas. Un proceso donde se puede aplicar el intercambiador de calor es la pasteurización.
Existen varias técnicas de conservación de jugos que inactiva microorganismos patógenos y alterantes, pero los más utilizados son los tratamientos térmicos. Uno de los métodos más comunes es la pasteurización, la cual consiste en un calentamiento a temperaturas menores que la de ebullición. El objetivo es destruir a los microorganismos patógenos y además inactivar las enzimas pectolíticas que hidrolizan la pectina y causan la precipitación de los sólidos en suspensión.

La aplicación de los intercambiadores de calor en la industria de bioprocesos varía en un amplio rango, desde el tratamiento térmico de alimentos fluidos hasta la concentración de jugos hasta el enfriamiento de yogures batidos o la congelación de líquidos, donde juegan un papel importante en el proceso de enfriamiento.

En distintas áreas se han aplicado los intercambiadores de calor, por ejemplo: [Perilla, 2022] utiliza la implementación del intercambiador de calor con material de cambio de fase (PCM-HX) en un sistema de refrigeración de moldes de inyección de termoplásticos. [Miranda-Rivero, 2022] establece diversos criterios de dimensionamiento, justificados en base a resultados realizó el dimensionamiento del intercambiador de calor E-205 dentro del proceso de obtención de acetona a través de cálculos manuales, encontrando parámetros óptimos y adecuados según heurísticas.

Existen un sinfín de intercambiadores de calor que se pueden utilizar para diversos procesos estos equipos registran imperfecciones que pueden ser causadas por el mal funcionamiento de alguno de sus parámetros o por un incorrecto mantenimiento dentro del mismo y que ocasionan daños a los productos finales por eso es de suma relevancia estudiarlos para tener un registro de las posibles fallas que pueden presentarse, otro punto problemático que se aborda es que estos errores no pueden detectarse a simple vista y esto genera la inquietud de

 ISSN en trámite

aplicar observadores adaptables que permitirán analizar los parámetros internos y poder detectar si existe presencia de fallas para así anticipadamente proponer una instrumentación adecuada que permita la corrección oportuna de estas imperfecciones y en el caso del proceso de la pasteurización nos brinde alimentos y bebidas libres de microorganismos patógenos que garanticen ser aptos para el consumo humano.

A lo largo de los años cada vez se han utilizado los observadores adaptables en numerosas áreas, por mencionar algunos casos se encuentra: [Mosaja-Churata, 2017] donde el autor muestra que un observador, también conocido industrialmente como sensor, es un estimador de estados, cuyo fin práctico es conocer el valor de variables que no pueden ser medidas directamente. Su aplicación para el diagnóstico de fallos consiste en la estimación de otras variables de proceso que permitan inferir cuando la medición real se desvía o presenta una falla. [Alvarado-Mendez, 2019] los autores presentan el estudio y diseño de observadores adaptables para sistemas mecánicos no lineales. Eligiendo como caso de estudio un modelo matemático de una cuarta parte de un vehículo con una suspensión semiactiva y lo parametriza.

En la sección 2 se muestra el funcionamiento del sistema dinámico del intercambiador de calor, sección 3 se muestra el desarrollo del observador adaptable, en la sección 4 se muestra la aplicación del intercambiador con el observador adaptable aplicado a la elaboración de jugos, sección 5 se muestra la propuesta de instrumentación, en la sección 6 se muestra las conclusiones del trabajo desarrollado y finalmente las referencias.

## 2. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DINÁMICO

*Figura 1: Intercambiador de calor RCT 100.*

| Nomenclatura | Descripción |
|---|---|
| Tci, Thi | Temperaturas de entrada en el lado frío y caliente, respectivamente, K |
| Tco,Tho | Temperaturas de salida en el lado frío y caliente, respectivamente, K |
| U | Coeficiente de transferencia de calor J/(m2 K s) |
| A | Área superficie del intercambiador de calor, m2 |
| Cpc | Calor especifico en el lado frio, J/(KgK) |
| Cph | Calor especifico en el lado caliente, J/(KgK) |
| Pc | Densidad del fluido frio, Kg/m3 |
| Vc | Volumen en el lado frio, m3 |
| Vh | Volumen en el lado caliente, m3 |
| vc | Caudal en el lado frio, m3/s |
| vh | Caudal en el lado caliente, m3/s |

*Tabla 1. Nomenclatura descrita.*

Se aborda el funcionamiento de un Intercambiador de Calor [Astorga-Zaragoza et al., 2007].

$$\dot{T}_{co} = \frac{2}{V_c}\left[V_c(T_{ci} - T_{co}) + \frac{UA}{C_{pc}\rho_c}\Delta T\right] \quad \text{Ec. 1}$$

$$\dot{T}_{ho} = \frac{2}{V_h}\left[V_h(T_{hi} - T_{ho}) + \frac{UA}{C_{ph}\rho_h}\Delta T\right] \quad \text{Ec. 2}$$

Donde $T_{co}$ y $T_{ho}$ representan temperaturas de salida en el lado frío y caliente, del intercambiador, pero que no son los únicos involucrados en el comportamiento del sistema, sino que además se deben considerar todos los parámetros anteriormente mostrados en la tabla 1.

$\Delta T$ se define como diferencial de temperatura, la cual para una amplia y mayor comprensión se debe analizar desarrollada. Como se muestra a continuación.

$$\Delta T = \Delta T_{\ell} \triangleq \frac{(T_{ho} - T_{ci}) - (T_{hi} - T_{co})}{\ln\left(\frac{T_{ho} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{co}}\right)} \quad \text{Ec. 3}$$

En primera instancia los valores utilizados fueron los siguientes, en los cuales se pueden observar desde valores constantes como el área que son datos que no cambian, sino que se mantienen y, por otro lado, también datos que si es posible modificar posteriormente para comparativa de los comportamientos.

| Constante | Valor | Constante | Valor |
|---|---|---|---|
| Tci | 301.5 K | A | 0.014 $m^2$ |
| Thi | 343.1 K | Cpc | 4174 J/Kg K |
| Tco | 28.74 K | Cph | 4179 J/kg K |
| Tho | 141.27 K | $\rho c$ | 991.8 Kg/$m^3$ |
| U | 1049 J/$m^2$ Ks | $\rho h$ | 983.3 kg/$m^3$ |
| vc | 7.25x10$^{-6}m^3$/s | Vc | 135x10$^{-6}m^3$ |
| vh | 1.33x10$^{-5}m^3$/s | Vh | 15.51x10$^{-6}m^3$ |

*Tabla 2. Parámetros.*

Por otra parte, los estados y entradas son:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{co} \\ T_{ho} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{ci} \\ T_{hi} \end{bmatrix}$$

 ISSN en trámite

Las variables $T_{co}/T_{ho}$ no se colocan enlistados junto con los demás ya que son valores por encontrar: son las temperaturas de salida en el lado frío y caliente.

Por otro lado, las entradas son las u que en tal caso son $T_{ci}/T_{hi}$ , las cuales son las temperaturas de entrada en el lado frío y caliente, respectivamente.

## 3. DESARROLLO DE OBSERVADOR ADAPTABLE

Considerando los sistemas no lineales presentados en [Ekramian et al., 2013] se obtiene el siguiente:

$$SYS: \begin{cases} \dot{x} = Ax + \Psi(y,u) + \Phi_1(x,u) + B\Phi_2(x,u)\theta \\ y = Cx \end{cases} \qquad \text{Ec. 4}$$

θ representa el parámetro desconocido.
Donde $x \in \mathbb{R}^n$ y $\theta \in \mathbb{R}^q$ son los vectores de estado y parámetro a estimar. Los vectores $u \in \mathbb{R}^m$ y $y \in \mathbb{R}^p$ representan las variables de entrada y salida respectivamente y $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n\times l}$, y $C \in \mathbb{R}^{p\times n}$ son matrices de dimensiones apropiadas.

En base a la Ec. 4, se obtiene el siguiente observador adaptable, con el fin de estimar el parámetro desconocido y los estados del sistema.

$$\mathcal{O}: \begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \Psi(y,u) + \Phi_1(\hat{x},u) + B\Phi_2(x,u)\hat{\theta} \\ \qquad + L(y - C\hat{x}) \\ \dot{\hat{\theta}} = \Gamma\Phi_2^T H(y - C\hat{x}), \text{ donde } \Gamma > 0, \end{cases} \qquad \text{Ec. 5}$$

Siendo $\hat{x}$ y $\hat{\theta}$ las estimaciones de los vectores de estado y parámetro. Las matrices L y H son las ganancias del observador y deben seleccionarse para garantizar la convergencia de los estados y parámetros estimados a los reales, siempre y cuando la función $\Phi(x(t),\theta(t),u(t),t)$ sea Lipschitz.

**Prueba de estabilidad.**

Partiendo de las ecuaciones dinámicas del error:

$$\begin{aligned} \dot{e}_x(t) &= (A + LC)e_x(t) + (\Phi_1(x,u) - \Phi_1(\hat{x},u)) + B\Phi_2(x,u,t)e_\theta(t) \\ \dot{e}_\theta(t) &= -\Gamma\Phi_2(x,u,t)KCe_x(t) \end{aligned} \qquad \text{Ec. 6}$$

Se propone la siguiente función cuadrática de Lyapunov:

$$V(e) = {e_x}^T P e_x + {e_\theta}^T Q e_\theta \qquad \text{Ec. 7}$$

Obteniendo el siguiente resultado:

$$\dot{V}(e) \le {e_x}^T[(A + LC)^T P + P(A + LC)]e_x + 2{e_x}^T P e_{\Phi_1} \qquad \text{Ec. 8}$$

Donde $P > 0$ y $Q > 0$ son matrices simétricas, entonces la estabilidad del observador se garantiza, al asegurar que $\dot{V}(t) < 0$.

## 4. RESULTADOS Y PRUEBAS REALIZADAS

Las Ecs. (1) y (2) del intercambiador de calor, se ajusta a su forma adaptable con el fin de estimar el parámetro desconocido que es el coeficiente de transferencia de calor, con el fin de detectar el momento que el intercambiador necesita mantenimiento preventivo o correctivo.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix}}_{\dot{x}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{2v_c}{V_c} & 0 \\ 0 & -\frac{2v_h}{V_h} \end{bmatrix}}_{A} \underbrace{\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}}_{x(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{2v_c}{V_c}u_1(t) \\ \frac{2v_h}{V_h}u_2(t) \end{bmatrix}}_{\Psi(y(t),u(t))} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{2A}{V_c C_{pc}\rho_c} \\ -\frac{2A}{V_h C_{ph}\rho_h} \end{bmatrix}}_{B} \underbrace{[\Delta T(t)]}_{\Phi(x(t),u(t))} \underbrace{U}_{\theta} \qquad \text{Ec. 9}$$

Donde:

$$\Delta T(t) = \frac{(x_2(t) - u_1(t)) - (u_2(t) - x_1(t))}{ln(\frac{x_2(t)-u_1(t)}{u_2(t)-x_1(t)})}$$

Los estados y entradas son:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{co} \\ T_{ho} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{ci} \\ T_{hi} \end{bmatrix}$$

Considerando que U(t) es el parámetro por estimar que corresponde al coeficiente de transferencia de calor, por lo tanto, el observador Ec. 5, para el sistema Ec. 9 es:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \end{bmatrix}}_{\dot{\hat{x}}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{2v_c}{V_c} & 0 \\ 0 & -\frac{2v_h}{V_h} \end{bmatrix}}_{A} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \end{bmatrix}}_{\hat{x}(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{2v_c}{V_c}u_1(t) \\ \frac{2v_h}{V_h}u_2(t) \end{bmatrix}}_{\Psi(y(t),u(t))} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{2A}{V_c C_{pc}\rho_c} \\ -\frac{2A}{V_h C_{ph}\rho_h} \end{bmatrix}}_{B} \underbrace{[\Delta T(t)]}_{\Phi(\hat{x}(t),\theta(t),u(t))} \hat{\theta}(t) - L(y(t) - C\hat{x}(t)) \qquad \text{Ec. 10}$$

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = \Gamma[\Delta T(t)]^T H(y(t) - C\hat{x}(t)) \qquad \text{Ec. 11}$$

En este caso se elige Γ = 15, debido a que este valor permite un tiempo de convergencia adecuado del observador. La ganancia del observador se obtiene resolviendo la LMI con el Toolbox YALMIP para MATLAB, con la cual se obtienen las siguientes matrices:

$$L = \begin{bmatrix} 0.3952 & 0.6049 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0.00896 & 0 \end{bmatrix}$$

ISSN en trámite

Una vez teniendo los datos anteriores, procedemos a simular donde el escenario consta de un sistema operando de manera óptima, donde no se presentan fallas. Obteniendo los siguientes resultados:

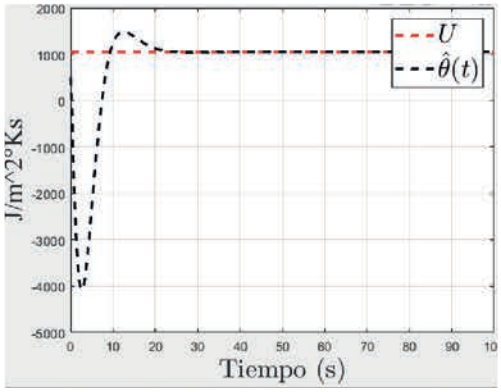



*Figura 2: Parámetro vs Parámetro estimado*

En donde la línea roja es el valor constante, o sea los 1049 el valor fijo que tiene de coeficiente de transferencia de calor, donde $\hat{\theta}(t)$ es el parámetro desconocido que se está encontrando por medio del observador. Y se ve el tiempo que le cuesta al observador seguir al valor original, para poder tener la misma respuesta.

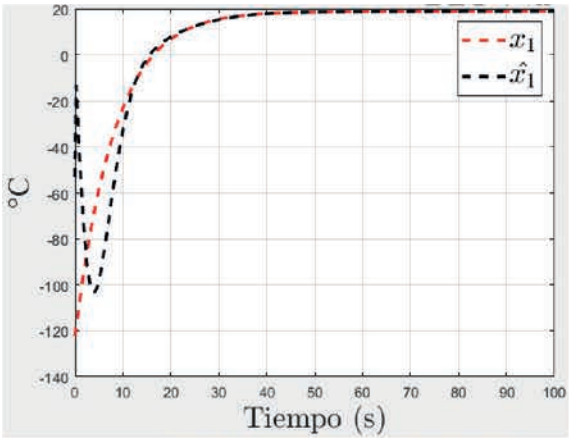



*Figura 3: Estado $x_1$ vs estado estimado $\hat{x}_1$*

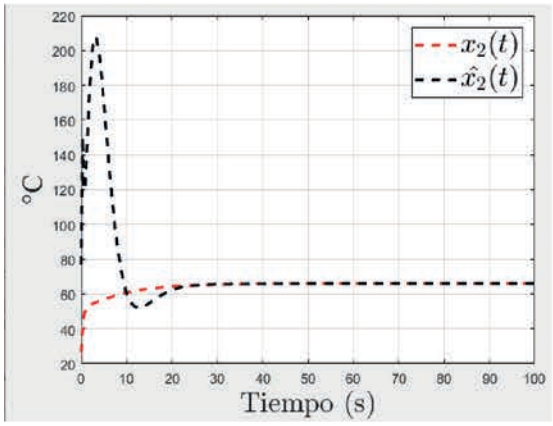



*Figura 4: Estado $x_2$ vs estado estimado $\hat{x}_2$*

Las líneas rojas nos muestran el comportamiento de los estados originales, mientras que las líneas negras punteadas nos muestran la del observador y su comportamiento, la cual se puede visualizar que el observador está funcionando de forma óptima al tener un comportamiento con los valores nominales.

Es importante mencionar que el comportamiento del observador dependerá del escenario de falla que se presente en el sistema y junto con ello la posible respuesta del sistema.

**Propuesta de falla.**

El proceso seleccionado es la pasteurización de jugos debido a que como ya se ha estado mencionando con anterioridad es un proceso de gran relevancia en la industria alimentaria.

**Elaboración de jugos.**

Para poder llegar el jugo a nuestros hogares son varias etapas que deben realizarse, pero para este trabajo nos enfocamos en la pasteurización, ya que es la parte donde se utilizan los intercambiadores de calor.

**Pasteurizado:** El producto es sometido a tratamiento térmico a una temperatura de 65 °C durante 35 minutos.

Para poder llevarse a cabo una simulación con valores reales se tomó de [Kim et al., 2013].

Una vez conocidos los valores que se utilizan en el proceso de pasteurización de jugos se procede a simular una falla de tipo intermitente que se hace presente en el coeficiente de transferencia de calor, ya que este tipo de fallas puede presentarse en el proceso al aumentar y disminuir las temperaturas.

Obteniendo las siguientes ganancias:

$$L = \begin{bmatrix} 0.3265 & 0.7431 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0.04422 & 0 \end{bmatrix}$$

Se obtiene los siguientes resultados:

 ISSN en trámite

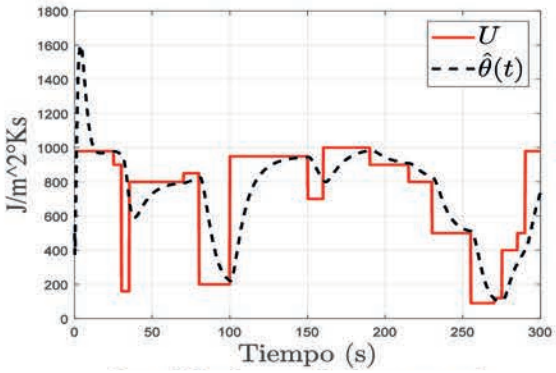



*Figura 5: Parámetro vs Parámetro estimado*

Podemos observar que se trata de una falla de tipo intermitente ya que desciende drásticamente a los 35 segundos luego vuelve a subir manteniéndose un poco debajo del rango normal en cantidades rondando a los 800 j/m^2Ks por un periodo de los 35 a los 70 segundos, posteriormente decrece hasta 200 j/m^2Ks por 20 segundos del segundo 80 al 100, y sube casi alcanzando el valor deseado durante 50 segundos y de nuevo baja a 500 j/m^2Ks en los 150 segundos, del segundo 150 hasta el 250 se crea una especie de escalones pero en cantidades no tan cambiantes y en el segundo 255 presenta una caída bastante pronunciada hasta los 90 j/m^2Ks, posteriormente sube y regresa a su estado original de 980 j/m^2Ks en el segundo 300.

Considerándose de tal modo una falla y no una avería porque vuelve a funcionar.

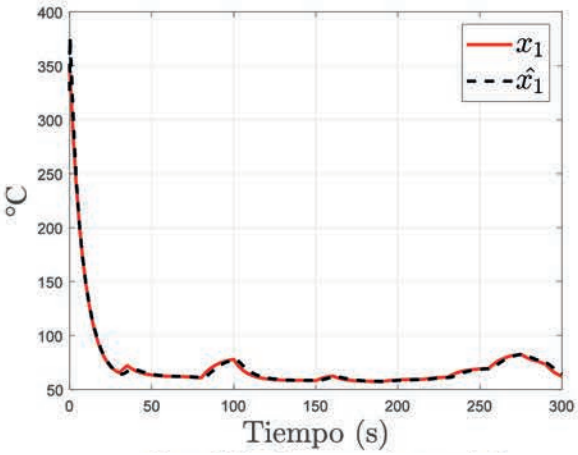



*Figura 6: Estado $x_1$ vs estado estimado $\hat{x}_1$*

El observador es capaz de seguir el comportamiento de la falla que se hace presente exactamente donde se efectúa y sin perturbaciones.

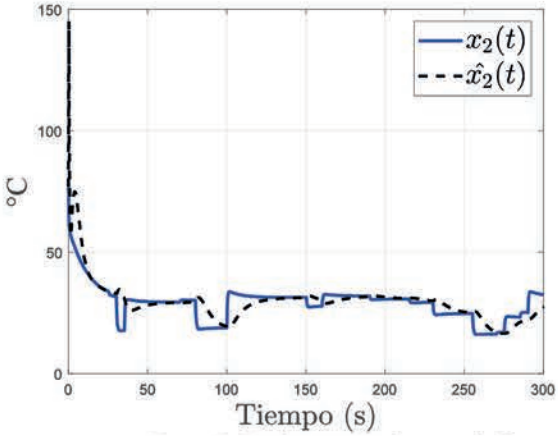



*Figura 7: Estado $x_2$ vs estado estimado $\widehat{x_2}$*

En el caso de esta grafica se puede observar que ya no son trazos tan limpios y esto indica que al observador le cuesta un poco seguir tan de cerca el comportamiento de la falla. No obstante, realiza un buen trabajo.

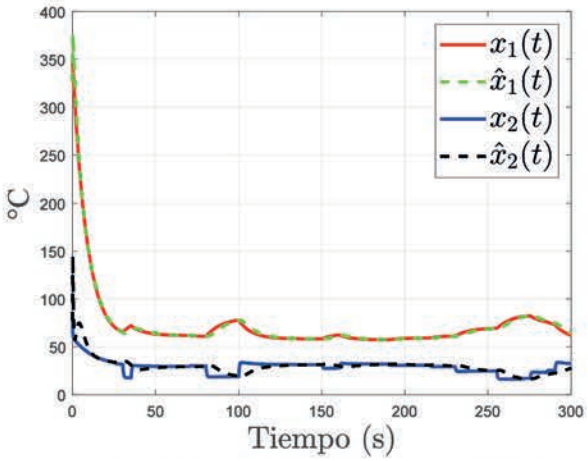



*Figura 8: Estados del sistema vs estados estimados*

En este grafico se observa cómo se comporta el sistema con y sin falla, donde a la presencia de falla la salida de temperatura de agua fría fue de 33.24 °C y la temperatura de agua caliente baja a 67.73°C.

## 5. PROPUESTA DE INSTRUMENTACIÓN

Se eligió el sensor de flujo de calor propuesta de instrumentación el sensor anteriormente mostrado debido a que cumple con las siguientes características:

- Es flexibles
- Posee sensor de temperatura integrado
- Dispone de dispersores térmicos para reducir la dependencia de la conductividad térmica.

 ISSN en trámite

- El rango de temperatura nominal es de -70 a +120 °C.
- Mide el flujo de calor por conducción, radiación y convección.

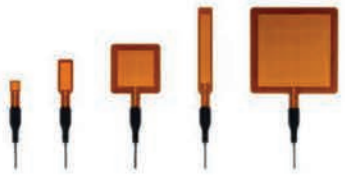


*Figura 9: Sensor de flujo de calor de capa fina FHFO5 series*

En la siguiente figura, se observa el modo de instalación del sensor con el fin de monitorear el rendimiento del intercambiador.

*Figura 10: Instalación del sensor de flujo de calor en el tubo*

Se eligió este tipo de sensor por la gran cantidad de especificaciones con las que cuenta y porque entre ellas destacan un rango de temperatura de uso de -70 a +120 °C y cumplen con las temperaturas utilizadas en el proceso de pasteurización de jugos que es 65ºC.

Para una mayor precisión se propone anexar al intercambiador dos sensores para una mayor confianza en las lecturas. Uno en el cabezal y el otro en el tubo de transferencia al ser puntos estratégicos donde se concentran los fluidos.

## 6. CONCLUSIONES

Se puede concluir que alcanzamos los objetivos planteados ya que se logró el entendimiento y creación de escenarios de falla para poder simular distintos comportamientos que ocurren dentro de un intercambiador de calor, desde comprender los factores y parámetros necesarios para su buen funcionamiento hasta distintos problemas ejecutados y con ello proponer una instrumentación que permita la alerta anticipada de cualquier anomalía que se presente dentro de los procesos y como resultado se eviten múltiples perdidas y aunado a ello se obtenga la optimización de la pasteurización garantizando seguridad alimentaria.

## REFERENCIAS

Alvarado-Mendez, P. E. (2019). Detección de fallas en la suspensión de un automóvil basada en observadores adaptables. [Tesis de maestría TECNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico]. Repositorio del TECNM https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/1415

Cabanzón Labat, J. (2018). Diseño y cálculo de un intercambiador de calor.

Ekramian et al., (2013) Ekramian, M., Sheikholeslam, F., Hosseinnia, S., and Yazdanpanah, M.-J. (2013). Adaptive state observer for Lipschitz nonlinear systems. Systems & Control Letters, 62(4):319–323.

Kim, H. B., Tadini, C. C., & Singh, R. K. (1999). Heat transfer in a plate exchanger during pasteurization of orange juice. Journal of Food Engineering, 42(2), 79-84.

Miranda-Rivero, R. F. (2022). Dimensionamiento y selección del intercambiador de calor e-205 dentro del proceso de obtención de acetona (tesis doctoral).

Mosaja-Churata, J. A. (2017). Desarrollo de un sistema de diagnóstico de fallas basado en filtros no lineales de rápido seguimiento: aplicación a un proceso hidráulico de cuatro tanques acoplados.

Perilla Arango, D. A. Implementación de un intercambiador de calor con material de cambio de fase (PCM-HX) en un sistema de refrigeración de moldes de inyección de termoplásticos.

Astorga-Zaragoza, C. M., Zavala-Río, A., Alvarado, V. M., Méndez, R. M., & Reyes-Reyes, J. (2007). Performance monitoring of heat exchangers via adaptive observers. *Measurement*, *40*(4), 392-405.

 ISSN en trámite

# Estimación de variables de estado de una suspensión semi-activa con amortiguador magnetoreológico utilizando el enfoque intervalar

**Jorge Yusef Colín Castillo** * **Gloria Lilia Osorio Gordillo** *
**Gerardo Vicente Guerrero Ramírez** *

* *Tecnológico Nacional de México - CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México (e-mail: d18ce085@cenidet.tecnm.mx, gloria.og@cenidet.tecnm.mx, gerardo.gr@cenidet.tecnm.mx).*

**Abstract:** En este artículo se presenta el diseño de un observador intervalar con señales lineales conmutadas en tiempo discreto, para un sistema cuasi-lineal de parámetros variantes (Q-LPV) en presencia de perturbaciones. El diseño del observador se lleva a cabo por medio de la positividad interna del sistema sin la necesidad de realizar un cambio de coordenadas. Las ganancias del observador garantizan tanto la estabilidad como la convergencia de los intervalos de los errores de estimación, dichas ganancias se sintetizan resolviendo un problema de desigualdades matriciales lineales (LMIs). El resultado teórico está respaldado por simulaciones numéricas.

*Keywords:* Observador Intervalar, Sistema Cuasi-LPV conmutado, 1/4 de Vehículo, Diseño de LMI

## 1. INTRODUCCIÓN

La estimación de estados para los sistemas dinámicos en presencia de incertidumbres (perturbaciones, error de modelado y ruido) es un problema desafiante (García et al. (2018), Solsona and Valla (2003)). En la teoría de control los observadores tienen la capacidad de reconstruir el estado interno desconocido de estos sistemas a partir de los datos disponibles de las entradas y salidas de estos mismos. Sin embargo, en la práctica, la precisión de los estados estimados depende principalmente de la calidad de los modelos utilizados para el diseño de observadores. En el caso de los sistemas lineales, numerosos enfoques han sido propuestos para resolver dicho problema. Por ejemplo, el clásico observador Luenberger (G. Ciccarella (1993), Celani (2006),Coutinho and Pereira (2005)) y filtro de Kalman para sistemas lineales de tiempo discreto (Girgis and Hart (1989), Chen (2012)). Sin embargo, en la práctica, las incertidumbres en los sistemas son poco conocidas y no se pueden describir con precisión. Por tal motivo, el termino observador intervalar se presenta (Gouzé et al. (2000), Meseguer et al. (2008)) bajo las suposiciones de que las incertidumbres están acotadas, los observadores intervalares pueden proporcionar los límites superior e inferior de las variables de estado utilizando los datos disponibles de los dos puntos del observador de manera en que la dinámica del error de estimación sea tanto cooperativa como estable. Los observadores intervalares han recibido una atención considerable en los últimos años. Se han propuesto muchos enfoques para tratar con diferentes clases de sistemas dinámicos de tiempo continuo como en discreto tales como (Efimov et al. (2012), Blesa et al. (2014)). Recientemente, el concepto de observador de intervalo se ha extendido a las clases conmutada (Guo and Zhu (2017), Ifqir et al. (2020), Su et al. (2020)), donde la idea es aplicar una combinación de transformaciones de similitud constantes que varíen en el tiempo junto a las ganancias del observador, las cuales permiten garantizar tanto la positividad como la estabilidad práctica de la dinámica conmutada de los errores de estimación, por ejemplo, en (Dinh et al. (2019),Li et al. (2022), Huang (2022)).

En este trabajo se aborda el diseño de un observador el cual se basa en la estructura tipo Luenberger en tiempo discreto, el diseño se lleva cabo por medio de la positividad interna del sistema sin la necesidad de realizar un cambio de coordenadas. Las ganancias del observador garantizan tanto la estabilidad como la convergencia de los intervalos de los errores de estimación, dichas ganancias se sintetizan resolviendo un problema de desigualdades matriciales lineales (LMIs).

**Lema** 1 **(Desigualdad de Young's)**
(Dragomir (2016), Rabehi et al. (2020), Garbouj et al.

 ISSN en trámite

(2020)). Considerando $\gamma > 0$ un escalar y $P \in \mathbb{R}^{n\times n}$ una matriz simétrica definida positiva, entonces

$$2a^T xb \leq \gamma a^T xa + \frac{1}{\gamma} b^T xb \tag{1}$$

**Lema 2 (Complemento de Schur)**
(Cottle (1974)). Las matrices $S_{11} = S_{11}^T$, $S_{22} = S_{22}^T$ y $S_{12}$ son de dimensiones apropiadas. Las siguientes LMIs son equivalentes:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix} < 0 \tag{2}$$

$$S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0 \tag{3}$$

$$S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0 \tag{4}$$

## 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considere un sistema no lineal discreto bajo el marco de representación Q-LPV como

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \sum_{i=1}^{M} \mu_i(\rho(k))(A_i x(k) + B_i u(k)) + w(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \tag{5}$$

donde $x(k) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u(k) \in \mathbb{R}^q$ es el vector de entradas del sistema, $y(k) \in \mathbb{R}^p$ representa las variables de salidas medidas y $w(k)$ es una entrada exógena como perturbación. Las matrices $A_i \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $B_i \in \mathbb{R}^{n\times q}$ y $C \in \mathbb{R}^{l\times n}$ son conocidas y de dimensiones apropiadas.

**Suposición 1.** Los valores exactos de $w(k)$ son desconocidos pero son considerados acotados dentro de un intervalo, es decir

$$\underline{w}(k) \leq w(k) \leq \overline{w}(k) \tag{6}$$

**Suposición 2.** El vector de estado inicial $x(k_0)$ satisface

$$\underline{x}(k_0) \leq x(k_0) \leq \overline{x}(k_0) \tag{7}$$

donde $\underline{x}(k_0)$, $\overline{x}(k_0) \in \mathbb{R}^n$ son vectores constantes.

El modelo Cuasi-Lineal de Parámetros Variantes (Q-LPV) se puede obtener mediante las no linealidades del sistema. Este enfoque considera variables de programación $\rho(k) = [\rho_1(k), \cdots, \rho_m(k)]^T$, las cuales se consideran medibles. $\rho(k)$ es el vector de $m$ parámetros variables que incluye las no linealidades. Las funciones de ponderación se definen como

$$\sum_{i=1}^{M} \mu_i(\rho(k)) = 1, \quad 0 \leq \mu_i(\rho(k)) \leq 1 \tag{8}$$

donde $M = 2^m$ es el número de combinaciones posibles de los límites del parámetro variable.

**Suposición 3.** El sistema (5) es observable si

$$rango \begin{bmatrix} C \\ CA_i \\ CA_i^2 \\ \vdots \\ CA_i^{n-1} \end{bmatrix} = n, \quad \forall_i = 1, ..., M \tag{9}$$

Considerando el sistema Q-LPV (5) se propone un observador intervalar en tiempo discreto

$$\begin{aligned} \underline{\hat{x}}(k+1) &= \sum_{i=1}^{M} \mu_i(\rho(k))((A_i - \underline{L}_i C)\underline{\hat{x}}(k) + B_i u(k) + \\ &\quad \underline{L}_i(y(k)) + \underline{w}(k) \\ \underline{\hat{y}}(k) &= C\underline{\hat{x}}(k) \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} \overline{\hat{x}}(k+1) &= \sum_{i=1}^{M} \mu_i(\rho(k))((A_i - \overline{L}_i C)\overline{\hat{x}}(k) + B_i u(k) + \\ &\quad \overline{L}_i(y(k))) + \overline{w}(k) \\ \overline{\hat{y}}(k) &= C\overline{\hat{x}}(k) \end{aligned} \tag{11}$$

donde $\underline{\hat{x}}(k)$ y $\overline{\hat{x}}(k)$ son las estimaciones intervalares de $x(k)$, las variables $\underline{L}_i$ y $\overline{L}_i$ son las ganancias del observador usadas para calcular las cotas inferiores y superiores de los estados estimados.

## 3. DISEÑO DEL OBSERVADOR

El objetivo del diseño del observador intervalar (10-11) es estimar una cota superior y una cota inferior, la cual permita encerrar el conjunto de valores admisibles de las variables de estado del sistema (5) mientras se asegura la convergencia de los errores de estimación. Para asegurar la convergencia de los errores de estimación es necesario considerar los límites de la perturbación (6).

La dinámica de ambos límites de error de estimación $\underline{e}(k) = x(k) - \underline{\hat{x}}(k)$ y $\overline{e}(k) = \overline{\hat{x}}(k) - x(k)$ son descritas por el siguiente sistema

$$\begin{aligned} \underline{e}(k+1) &= \sum_{i=1}^{M} \mu_i(\rho(k))[(A_i - \underline{L}_i C)\underline{e}(k)] + \psi_1(k) \\ \overline{e}(k+1) &= \sum_{i=1}^{M} \mu_i(\rho(k))[(A_i - \overline{L}_i C)\overline{e}(k)] + \psi_2(k) \end{aligned} \tag{12}$$

donde $\psi_1(k) = (w(k) - \underline{w}(k))$ y $\psi_2(k) = (\overline{w}(k) - w(k))$

Debido al acoplamiento de la dinámica de los errores máximos y mínimos, definimos de una manera compacta la dinámica de error de la siguiente manera.

$$\varepsilon(k+1) = \sum_{i=1}^{M} \mu_i(\rho(k))[(\mathbf{A}_i \varepsilon(k)] + \delta(k) \tag{13}$$

 ISSN en trámite

donde $\varepsilon(k) = \begin{bmatrix} \underline{e}(k) \\ \overline{e}(k) \end{bmatrix}$, $\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} (A_i - \underline{L}_i C) & 0 \\ 0 & (A_i - \overline{L}_i C) \end{bmatrix}$, $\delta(k) = \begin{bmatrix} w(k) - \underline{w}(k) \\ \overline{w}(k) - w(k) \end{bmatrix}$

**Teorema 1.** Manteniendo la suposición (1) y (2), existe una matriz simétrica definida positiva $P$, un escalar positivo $\beta$ y un escalar positivo $\gamma$, tal que la siguiente LMI

$$\begin{bmatrix} -P + \beta I_n & \mathbf{A}_i^T P \\ P\mathbf{A}_i & -\dfrac{P}{1+\gamma} \end{bmatrix} < 0 \tag{14}$$

se puede verificar, obteniendo así las matrices de ganancia $\underline{L}_i$, $\overline{L}_i$ que satisface la estabilidad del observador de intervalos (10-11) para el sistema Q-LPV en tiempo discreto (5).

*Demostración:* Para realizar la estimación intervalar del observador (10-11), proponemos la siguiente función cuadrática de Lyapunov para el error de estimación aumentado

$$V(\varepsilon(k)) = \varepsilon^T(k) P \varepsilon(k) > 0 \quad \text{con} \quad P > 0 \tag{15}$$

cuya función incremento es expresada de la siguiente manera

$$\Delta V(\varepsilon(k)) = V(\varepsilon(k+1)) - V\varepsilon(k) \tag{16}$$

se requiere que la función $\Delta V(\varepsilon(k))$ sea definida negativa

$$\begin{aligned} \Delta V(\varepsilon(k)) = \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M} \mu_i(\rho(k))\mu_j(\rho(k)) \Big[ & \varepsilon(k)^T \mathbf{A}_i^T P \mathbf{A}_j \varepsilon(k) + \\ & \varepsilon(k)^T \mathbf{A}_i^T P \delta(k) + \delta(k)^T P \mathbf{A}_i \varepsilon(k) + \delta(k)^T P \delta(k) - \\ & \varepsilon(k)^T P \varepsilon(k) \Big] < 0 \end{aligned} \tag{17}$$

reescribiendo la función incremento de $\Delta V(\varepsilon(k))$ obtenemos

$$\begin{aligned} \Delta V(\varepsilon(k)) = \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M} \mu_i(\rho(k))\mu_j(\rho(k)) \Big[ & \varepsilon(k)^T \mathbf{A}_i^T P \mathbf{A}_j \varepsilon(k) + \\ & + 2(\varepsilon(k)^T \mathbf{A}_i^T P \delta(k)) + \delta(k)^T P \delta(k) - \\ & \varepsilon(k)^T P \varepsilon(k) \Big] < 0 \end{aligned} \tag{18}$$

Utilizando el Lema (1) para cualquier escalar $\gamma$ positivo $2a^T xb \leq \gamma a^T xa + \frac{1}{\gamma} b^T xb$ obtenemos

$$\Delta V(\varepsilon(k)) = \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M} \mu_i(\rho(k))\mu_j(\rho(k)) \tag{19}$$

$$\begin{aligned} & \Big[ \varepsilon(k)^T \Big( (1+\gamma)\mathbf{A}_i^T P \mathbf{A}_j - P \Big) \varepsilon(k) + \\ & \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \delta(k)^T P \delta(k) \Big] < 0 \end{aligned} \tag{20}$$

Considerando el segmento $(1+\gamma)\mathbf{A}_i^T P \mathbf{A}_j - P$ de (20), se propone la siguiente desigualdad

$$(1+\gamma)\mathbf{A}_i^T P \mathbf{A}_j - P + \beta I_n \leq 0 \tag{21}$$

donde $\beta$ es un escalar positivo.
Utilizando el Lema (2) en la desigualdad (21), se obtiene la siguiente expresión

$$\begin{bmatrix} -P + \beta I_n & \mathbf{A}_i^T P \\ P\mathbf{A}_i & -\dfrac{P}{(1+\gamma)} \end{bmatrix} < 0 \tag{22}$$

donde $\beta > 0$, $\gamma > 0$ y $P = P^T > 0$. Considerando $\mathbf{A}_i$ y $P$ como $\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} (A_i - \underline{L}_i C) & 0 \\ 0 & (A_i - \overline{L}_i C) \end{bmatrix}$ y $P = \begin{bmatrix} \underline{P} & 0 \\ 0 & \overline{P} \end{bmatrix}$.
En el producto $\mathbf{A}_i P$ se tiene una bilinealidad entre $P$, $\underline{L}_i$ y $\overline{L}_i$ que se agrupa como $\underline{Q}_i = P\underline{L}_i$ y $\overline{Q}_i = P\overline{L}_i$.

Resolviendo la desigualdad (22), las ganancias del Observador (10 - 11) pueden ser calculadas de la siguiente manera

$$\underline{L}_i = P^{-1}\underline{Q}_i \quad \text{y} \quad \overline{L}_i = P^{-1}\overline{Q}_i \quad \forall i = 1, \cdots, M \tag{23}$$

## 4. APLICACIÓN Y RESULTADOS

El enfoque propuesto es aplicado a un modelo vibratorio de 1/4 de vehículo (Do et al. (2010)). La Figura (1) presenta un diagrama de 1/4 de vehículo con una suspensión semi-activa, compuesta por un amortiguador magnetoreológico. Este tipo de amortiguadores tienen propiedades que les permiten cambiar su factor de amortiguamiento en pequeños periodos de tiempo.

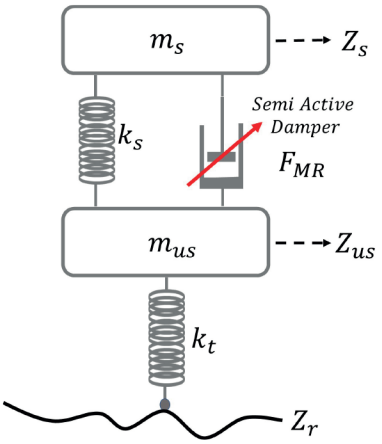



Fig. 1. Diagrama vibratorio de 1/4 de vehículo

El modelo matemático del 1/4 de vehículo con suspensión semi-activa, se encuentra dado por

$$\begin{aligned} \ddot{Z}_s = & -\frac{k_s(Z_s - Z_{us})}{m_s} - \frac{c_o(\dot{Z}_s - \dot{Z}_{us})}{m_s} - \frac{k_o(Z_s - Z_{us})}{m_s} - \\ & \frac{f_I tanh(c_1(\dot{Z}_s - \dot{Z}_{us}) + k_1(Z_s - Z_{us}))}{m_s} \end{aligned} \tag{24}$$

 ISSN en trámite

$$\ddot{Z}_{us} = \frac{k_s(Z_s - Z_{us})}{m_{us}} + \frac{c_o(\dot{Z}_s - \dot{Z}_{us})}{m_{us}} + \frac{k_o(Z_s - Z_{us})}{m_{us}} + \frac{f_I tanh(c_1(\dot{Z}_s - \dot{Z}_{us}) + k_1(Z_s - Z_{us}))}{m_{us}} - \frac{k_t(Z_{us} - Z_r)}{m_{us}} \tag{25}$$

donde $m_s$ representa la masa suspendida del chasis, $m_{us}$ es la masa no suspendida de la rueda, $k_s$ es el coeficientes de rigidez de la suspensión, $k_t$ representa al coeficientes de rigidez de la rueda, $c_1$, $k_1$ son los parámetros en zona pre-esfuerzo, $c_o$, $k_o$ son los parámetros en zona post-esfuerzo del amortiguador magnetoreológico y $f_I$ es la fuerza controlada del amortiguador que depende de una corriente eléctrica.

La nomenclatura de las variables y parámetros del modelo se muestran en la Tabla 1.

Table 1. Nomenclatura del modelo.

| Variable | Unidad | Valor |
|---|---|---|
| $m_s$ | kg | 315 |
| $m_{us}$ | kg | 37.5 |
| $k_s$ | N/m | 29500 |
| $k_t$ | N/m | 210000 |
| $z_r$ | cm | ——— |
| $c_o$ | Ns/m | 810.78 |
| $k_o$ | Ns/m | 620.79 |
| $c_1$ | s/m | 13.76 |
| $k_1$ | 1/s | 10.54 |
| $Z_s$ | cm | ——— |
| $Z_{us}$ | cm | ——— |
| $f_{Imax}$ | N | 800 |
| $f_{Imin}$ | N | 0 |

### *4.1 Modelo Q-LPV*

Para aplicar el esquema propuesto, el modelo no lineal (24 - 25) se transforma en el sistema (5) considerando las no linealidades del modelo representadas por $\rho_1(t)$ y $\rho_2(t)$

$$\begin{aligned} \rho_1(t) &= tanh(m_o x(t)) \\ \rho_2(t) &= \frac{\rho_1(t)}{m_o x(t)} \end{aligned} \tag{26}$$

donde $m_o = [\, k_1 \;\; c_1 \;\; -k_1 \;\; -c_1 \,]$ y $x(t) = \left[\, Z_s(t) \;\; \dot{Z}_s(t) \;\; Z_{us}(t) \;\; \dot{Z}_{us}(t) \,\right]^T$ Esto nos lleva a la siguiente representación:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^{M} \mu_i(\rho(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) + w(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \tag{27}$$

donde

$$(B_1, B_2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{\overline{\rho}_1}{m_s} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{\overline{\rho}_1}{m_{us}} & \frac{K_t}{m_{us}} \end{bmatrix}, \; (B_3, B_4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{\underline{\rho}_1}{m_s} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{\underline{\rho}_1}{m_{us}} & \frac{K_t}{m_{us}} \end{bmatrix},$$

$$(A_1, A_3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1 F_o}{m_s}\overline{\rho}_2 & -\frac{c_1 F_o}{m_s}\overline{\rho}_2 & \frac{k_1 F_o}{m_s}\overline{\rho}_2 & \frac{c_1 F_o}{m_s}\overline{\rho}_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_1 F_o}{m_{us}}\overline{\rho}_2 & \frac{c_1 F_o}{m_{us}}\overline{\rho}_2 & -\frac{k_1 F_o}{m_{us}}\overline{\rho}_2 & -\frac{c_1 F_o}{m_{us}}\overline{\rho}_2 \end{bmatrix},$$

$$(A_2, A_4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1 F_o}{m_s}\underline{\rho}_2 & -\frac{c_1 F_o}{m_s}\underline{\rho}_2 & \frac{k_1 F_o}{m_s}\underline{\rho}_2 & \frac{c_1 F_o}{m_s}\underline{\rho}_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_1 F_o}{m_{us}}\underline{\rho}_2 & \frac{c_1 F_o}{m_{us}}\underline{\rho}_2 & -\frac{k_1 F_o}{m_{us}}\underline{\rho}_2 & -\frac{c_1 F_o}{m_{us}}\underline{\rho}_2 \end{bmatrix}$$

y $C = [\, 1 \;\; 0 \;\; -1 \;\; 0 \,]$

$\mu_i(\rho(t))$ son las funciones de ponderación dadas por

$$\begin{aligned} \mu_1(\rho(t)) &= \left(\frac{\rho_1(t) - \underline{\rho}_1}{\overline{\rho}_1 - \underline{\rho}_1}\right)\left(\frac{\rho_2(t) - \underline{\rho}_2}{\overline{\rho}_2 - \underline{\rho}_2}\right) \\ \mu_2(\rho(t)) &= \left(\frac{\rho_1(t) - \underline{\rho}_1}{\overline{\rho}_1 - \underline{\rho}_1}\right)\left(\frac{\overline{\rho}_2 - \rho_2(t)}{\overline{\rho}_2 - \underline{\rho}_2}\right) \\ \mu_3(\rho(t)) &= \left(\frac{\overline{\rho}_1 - \rho_1(t)}{\overline{\rho}_1 - \underline{\rho}_1}\right)\left(\frac{\rho_2(t) - \underline{\rho}_2}{\overline{\rho}_2 - \underline{\rho}_2}\right) \\ \mu_4(\rho(t)) &= \left(\frac{\overline{\rho}_1 - \rho_1(t)}{\overline{\rho}_1 - \underline{\rho}_1}\right)\left(\frac{\overline{\rho}_2 - \rho_2(t)}{\overline{\rho}_2 - \underline{\rho}_2}\right) \end{aligned} \tag{28}$$

Considerando el sistema (27) ante una perturbación con el siguiente intervalo $-4 \leq w(k) \leq 4$.

El modelo de 1/4 de vehículo es simulado teniendo en cuenta las siguientes condiciones iniciales $x(0) = [\, 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \,]^T$, $\underline{x}(0) = [\, -2 \;\; -2 \;\; -2 \;\; -2 \,]^T$, $\overline{x}(0) = [\, 2 \;\; 2 \;\; 2 \;\; 2 \,]^T$ y la fuerza controlada del amortiguador magnetoreológico se encuentra dentro del siguiente intervalo $0 \leq u(k) \leq 400N$

### *4.2 Resultados*

El enfoque de estimación propuesto se pretende utilizar en trabajos futuros para la implementación de técnicas zonotopicas las cuales se trabajan únicamente en sistemas discretos, es por ello, que el modelo de la suspensión de 1/4 de vehículo es considerado en tiempo discreto. El sistema Q-LPV (27) es discretizado con un tiempo de muestreo $T_{ms} = 0.0001$, considerando los parámetros de la Tabla 1 que conducen a las siguientes matrices para los modelos locales discretos:

$$(A_1, A_3) = \begin{bmatrix} 1 & 9.99 \times 10^{-5} & 5.23 \times 10^{-7} & 9.96 \times 10^{-8} \\ -0.0108 & 0.9980 & 0.0102 & 0.0020 \\ 4.5410 \times 10^{-6} & 8.36 \times 10^{-7} & 1 & 9.91 \times 10^{-5} \\ 0.0907 & 0.0167 & -0.64 & 0.98 \end{bmatrix},$$

$$(A_2, A_4) = \begin{bmatrix} 1 & 9.99 \times 10^{-5} & 4.75 \times 10^{-7} & 1.28 \times 10^{-8} \\ -0.0096 & 0.9980 & 0.0095 & 2.57 \times 10^{-4} \\ 4.01 \times 10^{-6} & 1.08 \times 10^{-7} & 1 & 9.98 \times 10^{-5} \\ 0.0802 & 0.0022 & -0.6396 & 0.99 \end{bmatrix},$$

$$(B_1, B_2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -3.14 \times 10^{-7} & 5.57 \times 10^{-4} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.55 \end{bmatrix},$$

 ISSN en trámite

$$(B_3, B_4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 3.14 \times 10^{-7} & 5.57 \times 10^{-4} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.55 \end{bmatrix}$$

Resolviendo la desigualdad (14) del Teorema 1 considerando el valor de $\beta = 3.5$ y $\gamma = 3$ como grados de libertad adicional, las ganancias del observador intervalar son

$$(\underline{L}_1, \overline{L}_1, \underline{L}_3, \overline{L}_3) = \begin{bmatrix} 0.50 \\ -0.01 \\ -0.50 \\ 0.36 \end{bmatrix}, (\underline{L}_2, \overline{L}_2, \underline{L}_4, \overline{L}_4) = \begin{bmatrix} 0.50 \\ -0.0095 \\ -0.50 \\ 0.35 \end{bmatrix}$$

$$(\underline{P}, \overline{P}) = \begin{bmatrix} 2.63 & -0.0028 & -1.71 & 0.23 \\ -0.0028 & 0.77 & -0.0024 & -0.009 \\ -1.71 & -0.0024 & 2.63 & 0.23 \\ 0.23 & -0.009 & 0.23 & 0.78 \end{bmatrix}$$

Los resultados de la simulación se presentan en las Figuras (2 - 6). Las Figuras (2 - 5) muestran la estimación de los estados (la línea de color negro representa el comportamiento no lineal del estado, la línea punteada azul y rojo representa la estimación intervalar inferior y superior, respectivamente), la Figura (6) muestra la perturbación y la Figura (7) representa la evolución del error intervalar el cual se obtiene mediante la resta de cada uno de los intervalos estimados $e_1 = \overline{\hat{x}}_1 - \underline{\hat{x}}_1$, $e_2 = \overline{\hat{x}}_2 - \underline{\hat{x}}_2$, $e_3 = \overline{\hat{x}}_3 - \underline{\hat{x}}_3$ y $e_4 = \overline{\hat{x}}_4 - \underline{\hat{x}}_4$.

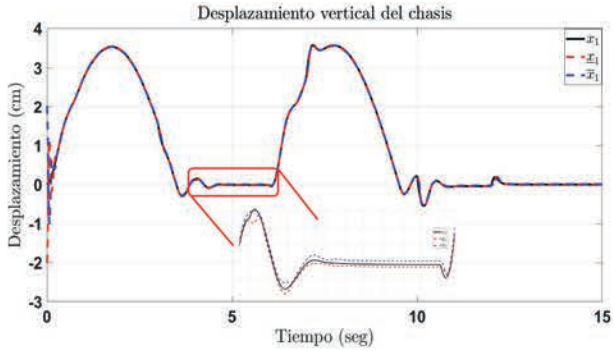



Fig. 2. Estimación intervalar de $x_1(k)$.

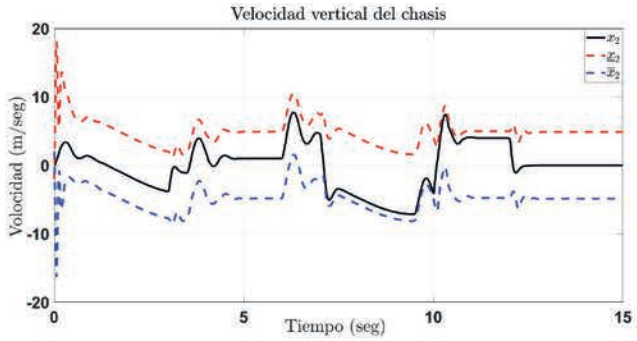



Fig. 3. Estimación intervalar de $x_2(k)$.

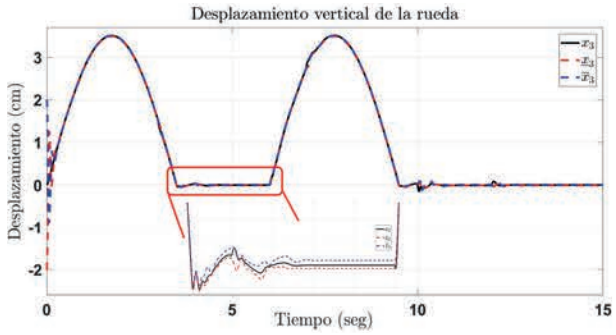



Fig. 4. Estimación intervalar de $x_3(k)$.

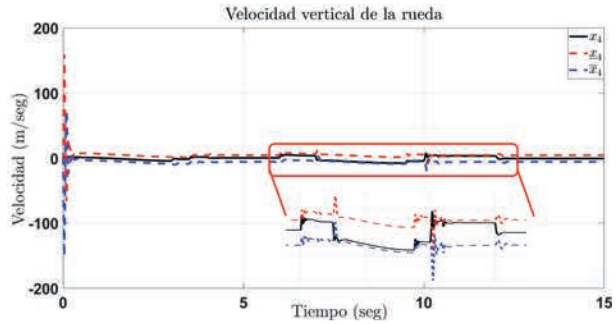



Fig. 5. Estimación intervalar de $x_4(k)$.

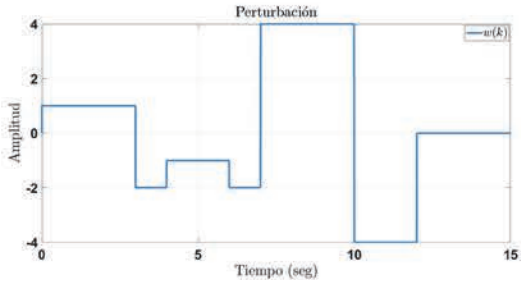



Fig. 6. Perturbación $w(k)$.

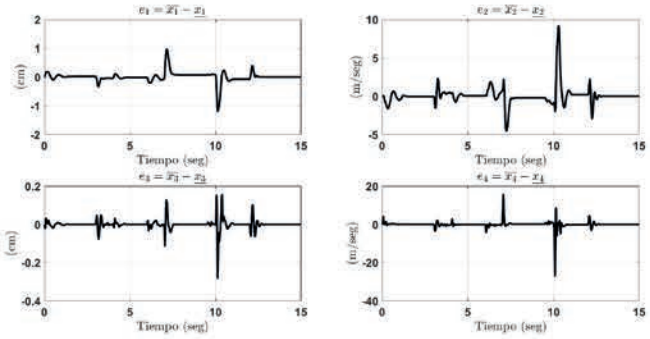


Fig. 7. Error de estimación intervalar $e_i(k)$.

 ISSN en trámite

## 5. CONCLUSIÓN

El observador propuesto permite obtener la estimación intervalar de las variables de estados considerando la presencia de una perturbación, la cual se modela en un contexto acotado. La estimación del observador intervalar proporciona además de la estimación de los estados desconocidos, un intervalo de incertidumbre. El observador intervalar es diseñado para permitir un rango de estimación, mediante la solución de un conjunto de condiciones LMI.

## REFERENCES

Blesa, J., Rotondo, D., Puig, V., and Nejjari, F. (2014). FDI and FTC of wind turbines using the interval observer approach and virtual actuators/sensors. *Control Engineering Practice*, 24, 138–155. doi: 10.1016/j.conengprac.2013.11.018.

Celani, F. (2006). A luenberger-style observer for robot manipulators with position measurements. In *2006 14th Mediterranean Conference on Control and Automation*. IEEE. doi:10.1109/med.2006.328806.

Chen, S.Y. (2012). Kalman filter for robot vision: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(11), 4409–4420. doi:10.1109/tie.2011.2162714.

Cottle, R.W. (1974). Manifestations of the schur complement. *Linear Algebra and its Applications*, 8(3), 189–211. doi:10.1016/0024-3795(74)90066-4.

Coutinho, D. and Pereira, L. (2005). A robust luenberger-like observer for induction machines. In *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005*. IEEE. doi: 10.1109/iecon.2005.1568872.

Dinh, T.N., Marouani, G., Raïssi, T., Wang, Z., and Messaoud, H. (2019). Optimal interval observers for discrete-time linear switched systems. *International Journal of Control*, 93(11), 2613–2621. doi: 10.1080/00207179.2019.1575518.

Do, A.L., Spelta, C., Savaresi, S., Sename, O., Dugard, L., and Delvecchio, D. (2010). An LPV control approach for comfort and suspensiontravel improvements of semi-active suspension systems. *Hal 49th IEEE Conference on Decision and Control*.

Dragomir, S.S. (2016). A note on young's inequality. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A. Matemáticas*, 111(2), 349–354. doi:10.1007/s13398-016-0300-8.

Efimov, D., Fridman, L., Raïssi, T., and Ali Zolghadri, a.R.S. (2012). Interval estimation for LPV systems applying high order sliding mode techniques. *Automatica*, 48(9), 2365–2371. doi: 10.1016/j.automatica.2012.06.073.

G. Ciccarella, M. Dalla Mora, A.G. (1993). A luenberger-like observer for nonlinear systems. *International Journal of Control*.

Garbouj, Y., Ngoc, T., Raissi, T., Zouari, T., and Ksouri, M. (2020). Optimal interval observer for switched takagi-sugeno systems: an application to interval fault estimation. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1–1. doi:10.1109/tfuzz.2020.2997333.

García, M., Puig, V., Astorga-Zaragoza, and Osorio-Gordillo, G. (2018). Robust fault estimation based on interval takagi-sugeno unknown input observer. *IFAC-PapersOnLine*, 51(24), 508–514. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.09.624.

Girgis, A. and Hart, D. (1989). Implementation of kalman and adaptive kalman filtering algorithms for digital distance protection on a vector signal processor. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(1), 141–156. doi: 10.1109/61.19200.

Gouzé, J., Rapaport, A., and Hadj-Sadok, M. (2000). Interval observers for uncertain biological systems. *Ecological Modelling*, 133(1-2), 45–56. doi:10.1016/s0304-3800(00)00279-9.

Guo, S. and Zhu, F. (2017). Interval observer design for discrete-time switched system. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 5073–5078. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.957.

Huang, Z. (2022). Application of interval state estimation in vehicle control. *Alexandria Engineering Journal*, 61(1), 911–916. doi:10.1016/j.aej.2021.04.074.

Ifqir, S., Puig, V., Ichalal, D., Ait-Oufroukh, N., and Mammar, S. (2020). Set-membership switched observers based on interval characterization of the estimation error. *21st IFAC World Congress*. URL `https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02877939`.

Li, D., Chang, J., Chen, W., and Raïssi, T. (2022). IPR-based distributed interval observers design for uncertain LTI systems. *ISA Transactions*, 121, 147–155. doi:10.1016/j.isatra.2021.03.026.

Meseguer, J., Puig, V., and Escobet, T. (2008). Robust fault detection linear interval observers avoiding the wrapping effect. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 11570–11575. doi:10.3182/20080706-5-kr-1001.01961.

Rabehi, Djahid, Meslem, Nacim, Ramdani, and Nacim (2020). An LMI approach to design interval observers for discrete-time linear switched systems. URL `https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02517130`. Working paper or preprint.

Solsona, J. and Valla, M. (2003). Disturbance and nonlinear luenberger observers for estimating mechanical variables in permanent magnet synchronous motors under mechanical parameters uncertainties. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50(4), 717–725. doi: 10.1109/tie.2003.814866.

Su, Q., Fan, Z., Lu, T., Long, Y., and Li, J. (2020). Fault detection for switched systems with all modes unstable based on interval observer. *Information Sciences*, 517, 167–182. doi:10.1016/j.ins.2019.12.071.

 ISSN en trámite

# Diseño de Incertidumbre y estudio del caos en un modelo del crecimiento de tumores cancerígenos de orden entero

**H. J. Contreras-Mendoza** * **J. M. Muñoz-Pacheco** ** **F. E. Serrano-Moncada** *** **R. Torrealba-Melendez** ****

* *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Puebla, Pue. C.P.72570 México (e-mail: hector.contrerasme@alumno.buap.mx).*
** *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Pue. C.P.72570 México (e-mail: jesusm.pacheco@correo.buap.mx)*
*** *Instituto de Investigación en Energía (IIE), Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH), Tegucigalpa, Honduras C.P. 11101 (e-mail: serranofer@eclipso.eu)*
**** *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Pue. C.P.72570 México (e-mail: richard.torrealba@correo.buap.mx)*

Resumen: Es bien sabido que el cáncer es una de las causas principales de muerte a nivel mundial, es una enfermedad que no se ha dejado de estudiar a través del tiempo y la investigación en esta enfermedad ha permitido tener un impacto creciente en su conocimiento. En este artículo se presenta un modelo que describe el crecimiento de tumores cancerígenos, este modelo genera caos, por lo que se presentan algunas propiedades del comportamiento dinámico de este sistema, así como su atractor caótico y los primeros pasos para el diseño e implementación de un control robusto, modelando su incertidumbre usando el algoritmo de steepest descent.

*Keywords:* Caos, atractor caótico, sistema dinámico, control en sistema biológico, incertidumbre, control robusto, steepest descent.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cáncer comienza como un proceso en el que se sabe que las células constituyen al cuerpo humano. Las células crecen y se dividen para producir células según como el cuerpo las necesita, cuando un cambio genético interfiere en las células nuevas, puede que crezcan de manera descontrolada y pueden formar una masa llamada tumor, que pueden ser malignos o benignos con información de Cancer.Net Conocimiento para triunfar sobre el cáncer (2019). En el artículo de Pavlopoulou et al. (2015) menciona que existen diversos proyectos para la comprensión del cáncer que diferentes instituciones los realizan como The International Cancer Genome Consortium (ICGC) y The Cancer Genome Atlas (TCGA). El cáncer se divide y se clasifica en función del lugar donde comienza, es por eso que los clasifican en grupos según Folkman (1975). Así como existe una división para los tipos de cáncer, también es conocido que hay etapas para el crecimiento de tumores, estos tiene una fase avascular, una fase vascular y una fase metastásica.

No se ha apreciado ampliamente que una fase avascular para el crecimiento de un tumor exista y esto es porque durante este tiempo los tumores son imperceptibles nos dice Folkman (1975), son extremadamente pequeños, estrictamente se habla de que el tejido no contiene estructuras vasculares en su interior. En la mayoría de los sistemas la fase vascular aparece cuando el tumor ya contiene vasos sanguíneos, esto provoca el crecimiento exponencial en un tiempo muy corto en lo presentado por Folkman (1975), en esta fase se produce angiogénesis que es la proliferación de vasos sanguíneos que se introducen al tumor, por consiguiente se habla de que ahora existe un tumor vascular que contiene estructuras las cuales le aportan oxígeno y nutrientes, lo que hace que el tumor pueda crecer. En la última fase, la metástasis tumoral consiste en el traslado de células tumorales a otros órganos. Las células tumorales deben invadir el tumor primario, para después adherirse a un tejido y crecer en el nuevo lugar, explica Steeg (2006). Para entender mejor esta fase, se dice que es un proceso biológico que implica la diseminación de las células cancerosas a sitios de órganos distantes, nos dicen Valastyan and Weinberg (2011). En esta última fase se habla que el tumor ya tuvo un crecimiento exponencial en el tiempo.

 ISSN en trámite

Ahora bien, tanto los modelos matemáticos como los modelos de controladores son una herramienta no invasiva que nos permite conocer la interacción entre variables que conforman un sistema biológico, en muchos casos, los modelos matemáticos han contribuido enormemente a comprender estos fenómenos explica Ogata (2003) en su libro. Existen $n$ cantidad de modelos matemáticos que ayudan a la comprensión de los tratamientos incluyendo modelos matemáticos, inferencia computacional y señales, algunas representaciones se pueden encontrar en Beerenwinkel et al. (2014) y Bachmann et al. (2012).

Tomando en consideración lo antes mencionado, caemos en cuenta en que la enfermedad del cáncer es un sistema biológico, por lo tanto se puede modelar matemáticamente. En muchos intentos, se ha intentado responder a estas preguntas mediante el análisis de sistemas dinámicos. La razón de esto es que el crecimiento de tumores malignos se puede describir como modelos de ecuación diferencial ordinaria (ODE) que incluyen dos poblaciones principales: células efectoras y células tumorales. Para entender el crecimiento de algún tumor y su desarrollo, se desarrollan modelos matemáticos más específicos como expone Chaplain (2005). Y encontramos muchos más modelos en los artículos que presentan Rodríguez Martín (2020), Tavazoei (2020) y Gómez Gómez and Gaspar Lorenz (2000), donde se utilizan diferentes métodos y operadores matemáticos tanto en sistemas de orden entero como orden fraccional. De igual forma actualmente existe una variedad de modelos matemáticos que describen sistemas caóticos, como el que se analizará en las siguientes secciones y esto se menciona porque se presentan gráficas del atractor caótico que genera el sistema y esto quiere decir que el sistema trabaja de una forma anormal, por lo tanto se muestran estos resultados.

En cuanto al sistema que se presenta se sabe que es un sistema biológico por lo tanto tiene incertidumbres, esto quiere decir que puede tener errores de diseño, por lo tanto entra la parte de control, ya que a lo largo del tiempo se han tratado de crear diferentes sistemas de control para de alguna u otra forma poder controlar un sistema biológico y con esto se han utilizado varias técnicas dependiendo del sistema biológico a tratar, algunos ejemplos de lo antes mencionado se puede encontrar en los artículos publicados por Liu et al. (2008), McLain and Henson (1996) y B.Wakchaure and Chaskar (2019). Por ello se elije el control robusto para el cáncer como una estrategia de control en este sistema tumoral del cáncer pues trabaja bajo incertidumbres que se asemejan con los errores que pueda tener la descripción del sistema dinámico.

Es bien sabido que esta enfermedad es la causante de millones de muertes a nivel mundial, es por eso el interés de estudiarla y contribuir al entendimiento de distintos modelos matemáticos que describen diferentes procesos, así como la búsqueda de diversas respuestas de los sistemas con estrategias matemáticas e ingenieriles, es por estas razones que se pretende aportar una investigación como la que se presenta en este trabajo. Para ello se presenta en las secciones siguientes los primeros pasos para aplicar una estrategia de control robusto, y este primer paso es el modelado de la incertidumbre.

Para el estudio del sistema en orden entero y del diseño de la incertidumbre, diversas simulaciones han sido realizadas usando MATLAB, mostrando el atractor, así como su dinámica. En la sección 2 se presenta el modelo matemático que describe el crecimiento de tumores cancerígenos propuesto por Sourailidis et al. (2021), veremos el comportamiento caótico de este sistema; en la sección 3 se habla sobre el control robusto, las partes que lo conforman para la búsqueda de la incertidumbre, en esta misma sección se presenta el diseño de la incertidumbre aplicando el algoritmo de Steepest Sescent, cabe resaltar que se elije una estrategia de control para estabilizar la dinámica caótica. Los resultados se presentan en la sección 4, en la sección 5 se describen las conclusiones y por último en la sección 6 se describen los trabajos futuros.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

La evolución de los tumores también se puede describir con el uso de sistemas dinámicos. Se pueden aplicar al sistema aspectos de la teoría de control y se puede mitigar la evolución del tumor de proliferación y muerte de células malignas, células sanas y células T, así como el entorno del tumor, se describen mediante ecuaciones en un artículo de Beerenwinkel et al. (2014).

En 2016 Llanos-Pérez presentó un novedoso modelo de crecimiento tumoral, que describe el desarrollo del cáncer a través de las tres etapas básicas, avascular, vascular y metástasis, en base a evidencias experimentales. Usando el modelo antes mencionado un sistema de tres ecuaciones diferenciales ordinarias ecuación (1), que describe el crecimiento tumoral avascular, vascular y metástasis ha sido creado y presentado en el artículo de Sourailidis et al. (2021).

$$\begin{cases} \dot{x} = x(2N - x) - Hxz \\ \dot{y} = y(4 - 0.14y) + 0.5X^2 - Iy - 0.5Hyz + 0.001z^2 \\ \dot{z} = -Iz + 0.07y^2 + 0.5Hyz - 0.002z^2 \end{cases} \tag{1}$$

En este sistema las variables $x, y, z$, representan las células tumorales proliferantes en las fases avascular, vascular y metástasis respectivamente. Además, el parámetro $N$ representa la población de células normales, $H$ la población de células huésped e $I$ la población de células inmunitarias, que son los linfocitos T, así como las células asesinas naturales, nos dice Sourailidis et al. (2021) en su artículo.

Los parámetros $N$ y $H$ son constantes con valores $N = 5$ y $H = 3$ porque estos grupos de células son mucho más numerosos que las células cancerosas, mientras que $I$ es parámetro de control, porque la población de células inmunitarias contra estas células cancerosas puede

 ISSN en trámite

incrementar o disminuir nos presenta Sourailidis et al. (2021). De la misma forma, para el estudio de este modelo se consideran las siguientes condiciones iniciales $(x_0, y_0, z_0) = (1, 0, 0)$.

Los datos anteriores, fueron usados para realizar la simulación numérica que se verá en la sub-sección siguiente donde se muestra la dinámica del comportamiento. Sabiendo que este sistema es un sistema dinámico no lineal y para trabajos futuros se muestra el cálculo de los puntos de equilibrio en esta sección. Se sabe que todo sistema dinámico tiene puntos de equilibrio, ya que con ellos se puede analizar la estabilidad del sistema. Se usan los parámetros con estos valores definidos $N = 5, H = 3, I = 0.337$, a partir del sistema en ecuación (1) y sustituyendo tenemos la ecuación (2).

$$\begin{cases} \dot{x} = x(10 - x) - 3xz \\ \dot{y} = y(4 - 0.14y) + 0.5X^2 - 0.337y - 1.5yz + 0.001z^2 \\ \dot{z} = -0.337z + 0.07y^2 + 1.5yz - 0.002z^2 \end{cases} \tag{2}$$

Resolviendo el sistema se tiene que los puntos de equilibrio son 8 pero se reduce a una serie de 3 puntos de equilibrio, esto se debe a que al ser un sistema biológico, los puntos de equilibrio negativos se deprecian, los puntos de equilibrio positivos son los siguientes:

$$x = 0, y = 0, z = 0$$
$$x = 0, y = 0.2269320832, z = 2.438285205$$
$$x = 0.672101844, y = 0.228031966, z = 3.109299385$$

Para determinar la estabilidad de los puntos de equilibrio se calcula la matriz Jacobiana del sistema, por lo tanto el $\mathbb{J}$ para las variables $[x, y, z]$ es el siguiente:

$$\mathbb{J} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{11} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Donde:

$$a_{11} = 10 - 2x - 3z \qquad a_{12} = 0$$
$$a_{13} = -3x \qquad a_{21} = 1.0x$$
$$a_{22} = 3.663 - 0.28y - 1.5z \qquad a_{23} = -1.5y + 0.002z$$
$$a_{31} = 0 \qquad a_{32} = 0.14y + 1.5z$$
$$a_{33} = -0.337 + 1.5y - 0.004z$$

De esta manera se procede a evaluar los puntos de equilibrio en la matriz $\mathbb{J}$.

PE 1 $(x, y, z) = (0, 0, 0)$, su estabilidad corresponde a un punto silla índice 2:

$$L1 = 10$$
$$L2 = 3.663$$
$$L3 = -0.337$$

PE 2 $(x, y, z) = (0, 0.2269320832, 2.4382855205)$, su estabilidad corresponde a un espiral silla índice 1:

$$L1 = 2.685143440$$
$$L2 = -0.03216214014 + 1.1122678171i$$
$$L3 = -0.03216214014 - 1.1122678171i$$

PE 6 $(x, y, z) = (0.672101844, 0.228031966, 3.109299385)$, su estabilidad corresponde a un espiral silla índice 2:

$$L1 = 0.2360422136 + 1.815516118i$$
$$L2 = -2.216373547$$
$$L3 = 0.2360422136 - 1.815516118i$$

### *2.1 Atractor caótico*

Los valores de los parámetros usados para el sistema están dados por Sourailidis et al. (2021), estos valores no se modifican para generar un atractor caótico, por lo tanto se realizó una simulación en MATLAB usando el método de Fordward-Euler, con pasos de integración de 0.01 y un tiempo final de 160s para ambas simulaciones, para la primera simulación se demuestra que solo cambiando el parámetro $I$ el sistema deja de generar caos y se estabiliza y se puede observar en la Fig. 1, la estabilidad del sistema se observa en la Fig. 1a donde después de un tiempo se queda estático.

Por el contrario, con el mismo tiempo de simulación, el sistema ya se comporta de manera muy diferente, pero ahora con el parámetro $I = 0.337$ pues ahora se puede observar que el sistema genera caos Fig. 2. Se puede decir que la existencia de caos indica un estado anormal, por lo que no se sabe como es el crecimiento de un tumor.

En la Fig. 3 se presenta una gráfica en donde se puede observar la dinámica del comportamiento del atractor caótico con respecto a las variables $x, y, z$ al tiempo final de 160s, cada una de las variables está representada por un color diferente.

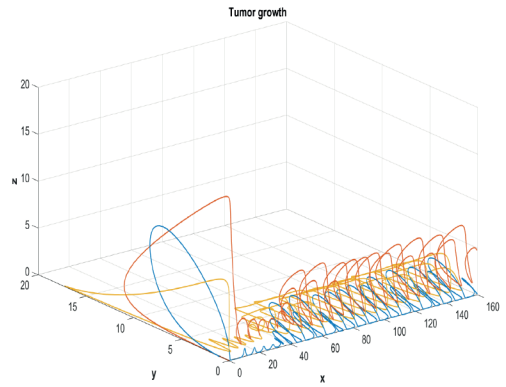
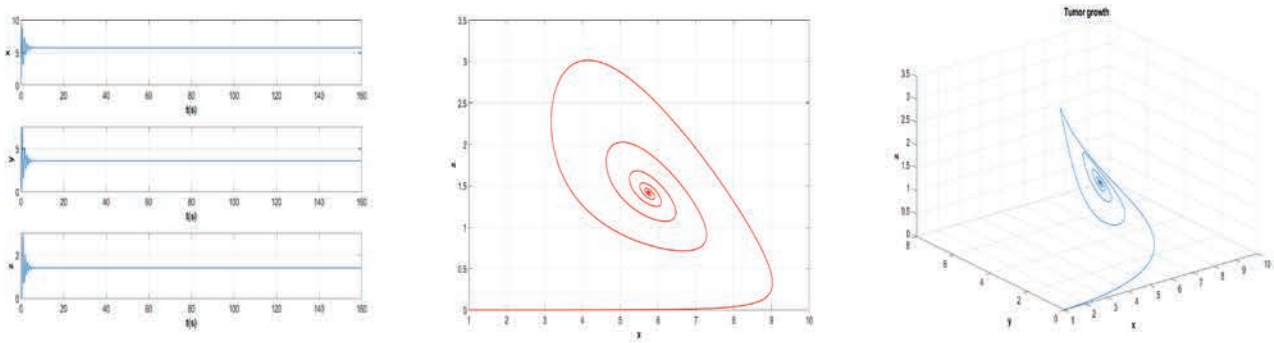



Figura 3. Evolución de la dinámica del sistema.

## 3. CONTROL ROBUSTO

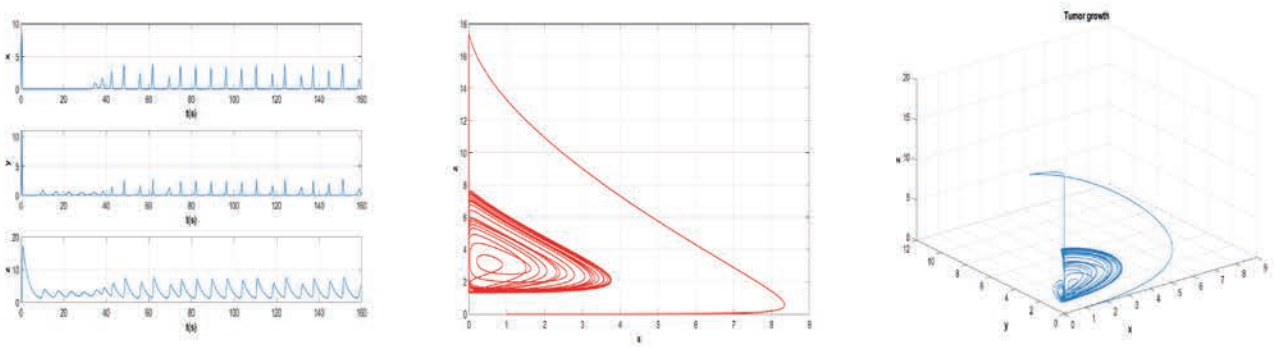
Se pueden aplicar al sistema aspectos de la teoría de control y se puede mitigar la evolución del tumor de proliferación y muerte de células malignas, células sanas

 ISSN en trámite




(a) Serie de tiempo (b) Atractor en x-z (c) Dinámica de variables

Figura 1. Sistema dinámico del crecimiento de tumores con tiempo de simulación a $t = 160s$, $N = 5, H = 3, I = 6$ (1a) Serie de tiempo, (1b) Plano x-z, (1c) Dinámica de variables




(a) Serie de tiempo (b) Atractor en x-y (c) Atractor caótico

Figura 2. Sistema dinámico del crecimiento de tumores con un tiempo de simulación a $t = 160s$, $N = 5, H = 3, I = 0.337$ (2a) Serie de tiempo, (2b) Plano x-z, (2c) Atractor caótico

y células T expresan Sourailidis et al. (2021). Cualquier modelo matemático de un proceso real va a ser en mayor o menor grado impreciso, o dicho de otra forma va a contar con incertidumbres o errores de modelado. Si se desea controlar de manera eficiente un proceso real, se deberá de tener información sobre las posibles fuentes de incertidumbres, evaluando su efecto sobre el comportamiento del sistema completo como presenta Rubio and Sánchez (1996).

El control robusto está formado específicamente por determinados bloques, esto bloques que se ven en la Fig. 4 hacen referencia al diagrama de configuración general de control robusto.

Donde $\Delta$ es el bloque de incertidumbre, $G$ la planta generalizada y $K$ el controlador.

### *3.1 Incertidumbre*

Se sabe que existen diferentes tipos de incertidumbres, por lo que para este sistema se selecciona una incertidumbre aditiva, que para los sistemas no lineales esta incertidumbre se expresa como muestra Serrano (2022):

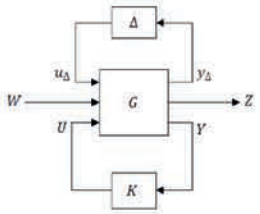



Figura 4. Diagrama de bloques general de control robusto.

$$\ddot{x} = f_0(x) + \Delta f_x + (g_0(x) + \Delta g(x))u \tag{4}$$

Para modelar la incertidumbre es importante recordar que este tipo de sistemas poseen la propiedad de lo que se denomina parametrización lineal, que consiste básicamente en la definición de un regresor y un vector de parámetros. La parametrización lineal del sistema queda de la siguiente forma ecuación (5) tomando como referencia ecuación (1) realizando una sustitución en donde $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ ahora se representan como $(x_1, x_2, x_3)$ respectivamente.

 ISSN en trámite

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \end{bmatrix}}_{Y} \underbrace{\begin{bmatrix} 2N \\ H \\ -I \\ I-1 \end{bmatrix}}_{\Theta} \tag{5}$$

Donde:

$$\begin{aligned} A_{11} &= x_1 \\ A_{12} &= -x_1 x_3 \\ A_{13} &= x_1^2 \\ A_{14} &= x_1^2 \\ A_{21} &= 0 \\ A_{22} &= -0.5 x_2 x_3 \\ A_{23} &= x_2 - 0.5x_1^2 - 4x_2 + 0.14x_2^2 - 0.001x_3^2 \\ A_{24} &= -0.5x_1^2 - 4x_2 + 0.14x_2^2 - 0.001x_3^2 \\ A_{31} &= 0 \\ A_{32} &= 0.5 x_2 x_3 \\ A_{33} &= x_3 - 0.07x_2^2 + 0.002x_3^2 \\ A_{34} &= -0.07x_2^2 + 0.002x_3^2 \end{aligned} \tag{6}$$

El siguiente paso para el modelado es considerar la siguiente función de rendimiento:

$$J = \sum_{k=1}^{N} \| \hat{x}_k - x_k \|^2 \tag{7}$$

Donde $\hat{x}$ es la variable estimada y $x$ es la variable calculada. El parámetro ajustado para el sistema incierto se realiza por medio del algoritmo Steepest Descent (SD) dado por:

$$\Theta_{i+1} = \Theta_i - \mu \nabla J \tag{8}$$

Donde $\mu$ es la constante de ajuste. Este algoritmo se emplea en el sistema del crecimiento de tumores cancerígenos usando el sistema parametrizado linealmente de la ecuación (5) y los resultados se presentan en la siguiente sección.

## 4. RESULTADOS

Implementando el algoritmo antes mencionado, se obtienen los siguientes resultados, en los cuales en la Fig. 5 se observan los resultados, con un tiempo de simulación a 160s, cabe mencionar que se trabaja con el mismo sistema dinámico y el mismo método numérico para resolver las ecuaciones, se muestra en la gráfica la dinámica calculada y la estimada por el algoritmo. Con la dinámica estimada lo que se busca es hacer un seguimiento de la solución real, por lo que con las iteraciones dadas se observa que sigue perfectamente a la calculada, con esto se puede decir que el algoritmo con busca de puntos mínimos realizó bien el cálculo y el resultado es el esperado.

En la Fig. 6 tenemos que el índice de rendimiento $J$ va creciendo muy rápido hasta llegar aproximadamente a las 250 epochs que son las iteraciones del algoritmo en donde se llama que llega a una estabilización, numéricamente el índice de rendimiento es muy alto y esto representa

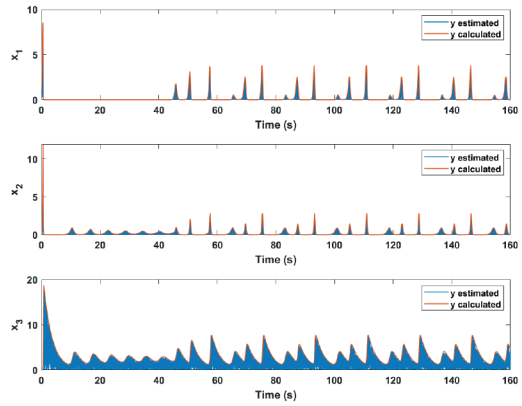



Figura 5. Serie de tiempo para $y$ estimada y $y$ calculada.

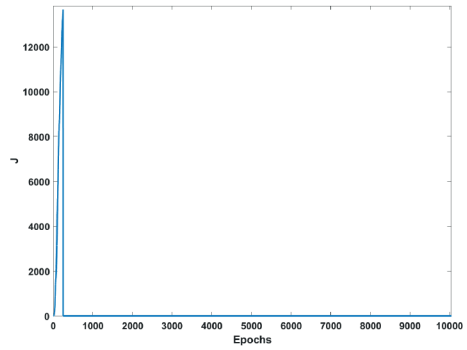



Figura 6. Índice de rendimiento J.

ser bueno para el algoritmo pues los parámetros inciertos tendrán una aproximación más cercana la cual este parámetro $J$ mide las diferencias entra la salida original y las producidas por el modelo.

Por último en la Fig. 7 se observa que los parámetros expresados como $\Delta$ son la incertidumbre paramétrica, y su dinámica para los cuatro parámetros es parecida al llegar a 250 epochs por lo que estos $\Delta$ se tendrán que representar matemáticamente para de esta forma tener el modelado de la incertidumbre. Numéricamente estos parámetros tienen un valor muy pequeño, al llegar al número de iteraciones se sabe que el valor incierto se ha calculado, para cada parámetro su valor numérico incierto es muy pequeño, este valor es el error que tiene el modelo original.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo presentado de investigación se presentó el análisis del modelo del crecimiento de tumores cancerígenos en orden entero, este modelo describe las 3 fases del crecimiento del tumor, el parámetro $I$ es el encargado de modificar la dinámica del sistema, cambiándolo a un sistema no saludable ya que las células inmunes si son mayores, tiende a ser un sistema estable, por el contrario si estas células son menores el sistema se vuelve inestable,

 ISSN en trámite

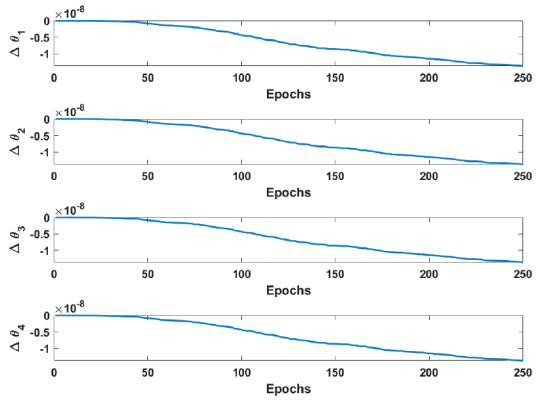



Figura 7. Convergencia de los parámetros expresados en $\Delta$.

cayendo en cuenta que el valor que se usó es el número con el cual el sistema genera caos, de igual forma tiene que ser un tiempo después de 70s aproximadamente para poder observar el atractor caótico. Al ser un sistema dinámico se sabe que las condiciones iniciales afectan la respuesta por lo que este no es una excepción.

Siendo este sistema un sistema dinámico no lineal generador de caos, se muestra que se puede analizar el sistema para tratar de llevarlo a un sistema estable, para ello se comienza a modelar un sistema de control. Con los resultados obtenidos se puede decir que es de amplio interés estudiar este tipo de sistemas ya que es un sistema biológico que es de interés mundial por el tipo de enfermedad. Los resultados numéricos para la búsqueda de la incertidumbre se hacen mediante el método de Steepest Descent, pero se podría ocupar algún otro método de optimización para encontrar las incertidumbres como Levenberg Marquardt o Particle Swarm Optimization con estos métodos se podría comparar la incertidumbre encontrada. Hasta ahora se tiene el comportamiento y las diferentes respuestas con cambios de parámetros y condiciones iniciales y por ello se puede estudiar y generar diversas estrategias para poder controlar su respuesta.

## 6. TRABAJOS FUTUROS

A partir de los resultados obtenidos, se seguirá trabajando con el sistema que describe el crecimiento de tumores cancerígenos, pero ahora se pretende pasar este modelo a orden fraccional lo cual dará aproximaciones más exactas, a este modelo se le aplicará la técnica de control robusto, para de esta forma lograr una estabilización del sistema, por ello es que el modelado de la incertidumbre se presenta en este artículo ya que es una parte importante de la planta generalizada.

## REFERENCIAS

Bachmann, J., Raue, A., Schilling, M., Becker, V., Timmer, J., and Klingmüller, U. (2012). Predictive mathematical models of cancer signalling pathways. *Journal of internal medicine*, 271(2), 155–165.

Beerenwinkel, N., Schwarz, R.F., Gerstung, M., and Markowetz, F. (2014). Cancer Evolution: Mathematical Models and Computational Inference. *Systematic Biology*, 64(1), e1–e25. doi:10.1093/sysbio/syu081.

B.Wakchaure, V. and Chaskar, U. (2019). Integral order pid controller for linear time invariant of nonlinear model of dynamic biological systems. In *2019 3rd International Conference on Recent Developments in Control, Automation Power Engineering (RDCAPE)*, 307–312. doi:10.1109/RDCAPE47089.2019.8979037.

Cancer.Net Conocimiento para triunfar sobre el cáncer, A.S.o.c.O. (2019). Conceptos básicos sobre el cáncer, tipo @ONLINE. URL `https://onx.la/07ff2`.

Chaplain, M.A. (2005). Mathematical models of cancer growth and development. *The Cancer Handbook*.

Folkman, J. (1975). Tumor angiogenesis: a possible control point in tumor growth. *Annals of internal medicine*, 82(1), 96–100.

Gómez Gómez, M. and Gaspar Lorenz, F.J. (2000). Modelos matemáticos en oncología. simulación numérica.

Liu, P., Zhang, Q., Yang, X., and Yang, L. (2008). Passivity and optimal control of descriptor biological complex systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 53(Special Issue), 122–125. doi: 10.1109/TAC.2007.911341.

McLain, R. and Henson, M. (1996). An adaptive nonlinear control strategy derived from a biological control system. In *Proceedings of 28th Southeastern Symposium on System Theory*, 66–70. doi: 10.1109/SSST.1996.493473.

Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.

Pavlopoulou, A., Spandidos, D.A., and Michalopoulos, I. (2015). Human cancer databases. *Oncology reports*, 33(1), 3–18. doi:10.3892/or.2014.3579.

Rodríguez Martín, M. (2020). Introducción al cálculo fraccionario ya los modelos de crecimiento tumoral clásicos y fraccionarios.

Rubio, F.R. and Sánchez, M.J.L. (1996). *Control adaptativo y robusto*, volume 9. Universidad de Sevilla.

Serrano, F.E. (2022). Mathematical definition of uncertainties found in dynamics systems.

Sourailidis, D., Volos, C., Moysis, L., and Stouboulos, I. (2021). Antimonotonicity, crisis, and route to chaos in a tumor growth model. In *Handbook of Research on Modeling, Analysis, and Control of Complex Systems*, 583–596. IGI Global.

Steeg, P.S. (2006). Tumor metastasis: mechanistic insights and clinical challenges. *Nature medicine*, 12(8), 895–904.

Tavazoei, M. (2020). Fractional order chaotic systems: history, achievements, applications, and future challenges. *Eur. Phys. J. Spec. Top. 229*, 887–904. doi: 10.1140/epjst/e2020-900238-8.

Valastyan, S. and Weinberg, R.A. (2011). Tumor metastasis: molecular insights and evolving paradigms. *Cell*, 147(2), 275–292.

[redacted]

# Control de velocidad de un motor de CD

Carlos Alberto B. I.* Oscar C. de J.* Francisco Javier C. G.* Juan Carlos H.L.* Instituto Tecnológico de Cuautla, TecNM, México

## RESUMEN

En el presente trabajo, se realiza el análisis del proceso del diseño de control de velocidad de un motor de CD, los motores de CD cuentan con diferentes variables susceptibles de controlar, por ejemplo, la velocidad, el torque y el suministro de potencia.
En el presente documento, se estudia primeramente el modelo matemático del sistema electromecánico, para desarrollar posteriormente un control de velocidad.

## Planteamiento

Se lleva a cabo en el presente trabajo, el análisis del modelo matemático de un motor de CD, con el propósito de diseñar un controlador de velocidad para el sistema.

## Modelo matemático del motor

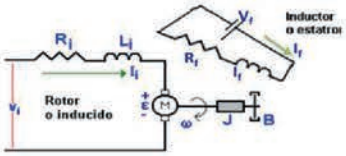



Figura 1. Motor de CD [2]

El modelo matemático que describe el sistema, se representa mediante las siguientes ecuaciones diferenciales.

$$\begin{cases} L_i \frac{dI_i(t)}{dt} = V_i(t) - R_i(t) - \varepsilon \\ \varepsilon = K_b w(t) \\ J\frac{dw(t)}{dt} = Te - Bw(t) \\ Te = K_p Ii(t) \end{cases}$$

Donde $L_i$ es la inductancia del bobinado, $I_i$ es la corriente de armadura, $V_i$ es la tensión de alimentación del rotor, $R_i$ Es la resistencia del bobinado del rotor, $\varepsilon$ es la fuerza contraelectromotriz del motor $K_b$ es la constante de fuerza contraelectromotriz, w es la velocidad angular, J es el momento de inercia, $Te$ es el torque electromagnético, B es el coeficiente de rozamiento viscoso y $K_p$ es la constante de torque electromagnético.

Por transformada de Laplace, se obtiene:

$$\begin{cases} L_i S I_i(s) = V_i(s) - R_i(s) - \varepsilon \\ \varepsilon = K_b w(s) \\ JSw(s) = Te - Bw(s) \end{cases}$$

Finalmente se obtiene la función de transferencia.

$$\frac{w(s)}{V_i(s)} = \frac{Kb}{L_i J s^2 + (R_i J + LB)s + R_i B + K_b K_p}$$

## Control proporcional

Un controlador proporcional (Kp) tendrá el efecto de reducir el tiempo de elevación y reducirá sin jamás eliminar, el error de estado estacionario

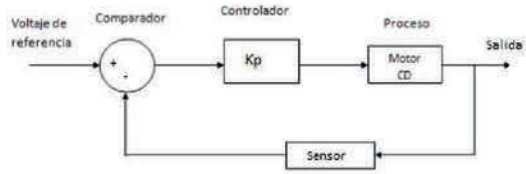



Figura 2. Diagrama de bloques del sistema

## Resultados

Se realizan las siguientes simulaciones del sistema , como se muestra en la Fig. 3 y el comportamiento del sistema controlado, tal como se muestra en la Fig. 4.

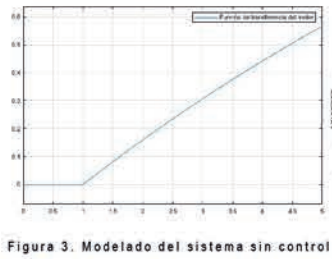


Figura 3. Modelado del sistema sin control

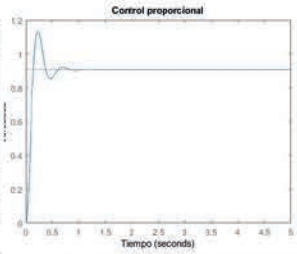



Figura 2. Control proporcional

## Conclusión

Se llevó a cabo el análisis matemático del un motor de CD, para implementar un sistema de control, Capaz de obtener la salida deseada, la importancia del control en los motores DC radica en potenciar el trabajo que realizar, la finalidad de obtener un control para un motor de CD es, ahorrar tiempo, además de evitar imprevistos no deseados.

## Referencias

1. V. B. Ángel, S. H. Eduardo, Z. N. Oscar. "Obtención de la función de transferencia de un motor de DC mediante el análisis de la curva de reacción, "Revista de Aplicación Científica y Técnica, Vol. 3, no. 10, pp. 1-10, diciembre 2017.
2. M. S. A. Alvarado, "Modelo matemático de un motor de corriente continua separadamente excitado: Control de velocidad por corriente de armadura, "Instituto de Ciencias Físicas, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 10 de marzo de 2012.
3. R. B. Ramírez, F. A. Valenzuela, F. Martínez, C. E. Castañeda, O. A. Morfín, J. A. Olmos. "Control de velocidad de un motor de CD basado en mediciones de la corriente de armadura, "Ingeniería Investigación y Tecnología, vol. 19, 1 agosto de 2017.
4. Mazzone, Virginia (2002) - Controladores PID

ISSN en trámite

ISSN en trámite

SEP
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

# onsumo eléctrico del sistema de enfriamiento en un fotobiorreactor a partir de la implementación de estrategias de control basadas en el uso de convertidores electrónicos de potencia.

Jesús Gonzalo Valenzuela Páez, Ing. Jonathan Arenas Robles, Dr. Manuel Adam Medina, Dr. Miguel Ángel Franco Nava.

## ecedentes/Problemática:

a humanidad busca nuevas fuentes de energía que menos dañinas para nuestro planeta, tal es el caso bioenergía.

ura 1.- Fotobiorreactores productores de biomasa microalgal para la producción de biocombustible.

En el TecNM 2010, se inició un ete tecnológico de un biorreactor productor de asa microalgal en colaboración las instituciones ITMAZ, IDET, CIAD y CONACyT [1].

Figura 2.- Fotobiorreactor.

México, como ejemplo de muchos países presenta temperatura variable, siendo esta un parámetro en la ucción de biomasa microalgal, se utilizan sistemas icos, es decir, sistemas de enfriamiento y de facción, los cuales aumentan el consumo eléctrico otobiorreactor [2][3].

Figura 3.- Temperatura (°C) promedio mensual en México 2021 [3].

## Motivación/Justificación:

El uso de sistemas de enfriamiento en fotobiorreactores aumentan el consumo eléctrico de éste y por ende disminuyen su eficiencia por lo que es importante implementar estrategias de control a partir de convertidores electrónicos de potencia para reducir el consumo eléctrico del fotobiorreactor.

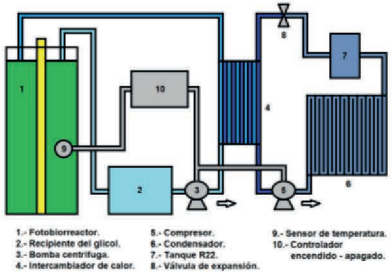



Figura 4.- Esquema del sistema de enfriamiento del fotobiorreactor.

## Objetivo general:

Reducir el consumo eléctrico del sistema de enfriamiento de un fotobiorreactor a través de estrategias de control basadas en el uso de convertidores electrónicos de potencia.

## Objetivos específicos:

**1.-** Evaluar el consumo eléctrico del sistema de enfriamiento.

**2.-** Implementar estrategias de control basadas en el uso de convertidores electrónicos de potencia en el sistema de enfriamiento.

**3.-** Determinar el modelo eléctrico del sistema de enfriamiento.

## Propuesta de solución:

Se propone un modelo eléctrico del sistema de enfriamiento del fotobiorreactor que tome en cuenta la implementación de una estrategia de control basada en el uso de convertidores electrónicos de potencia con el fin de reducir el consumo eléctrico del sistema de enfriamiento y por ende aumentar la eficiencia del fotobiorreactor.

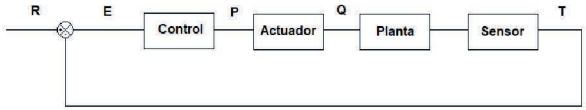



Figura 5.- Diagrama de proceso del sistema de enfriamiento del fotobiorreactor.

Donde:
Q = variable de entrada = caudal
T = variable de salida = temperatura del cultivo
R = referencia = temperatura deseada
E = error = diferencial de temperatura
P = variable manipulada = frecuencia

La estrategia de control propuesta es a partir de un controlador proporcional integral derivativo y el convertidor electrónico de potencia a utilizar se basa en una fuente conmutada.

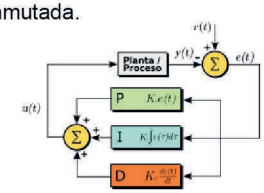



Figura 6.- Control PID.

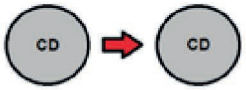



Figura 7.- Fuente conmutada.

## Alcances:

A través de la implementación de nuevas tecnologías se busca aumentar la producción de biomasa microalgal en relación a su consumo eléctrico, contribuyendo cada vez más a la rentabilidad de los fotobiorreactores para fines energéticos.

. Jiménez, *Diseño, modelado y control de un fotobiorreactor,* Cuernavaca, Morelos, México: CENIDET, 2017.
. Bastida. *Modelado y control de temperatura de un fotobiorreactor escala piloto con intercambiador de calor.*. Cuernavaca. Morelos. México: CENIDET. 2020.





cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

 ISSN en trámite

# Instrumentación industrial aplicada a sistemas de supervisión de intercambiadores de calor en la producción de polietileno.

**L. Antonio Pérez** P.E. Alvarado Méndez***
**C.M. Astorga Zaragoza*R. Figueroa Sánchez****

**CENIDET, Internado Palmira s/n, C.P. 62490 Cuernavaca,Mor., México (e-mail: D17CE052, carlos.az }@cenidet.tecnm.mx).*
***ITESCO, Carretera Antigua Minatitlán-Coatzacoalcos Km. 16.5, C.P. 96536 Coatzacoalcos, Veracruz ,México (e-mail: imct18.lantoniop, rfigueroas }@itesco.edu.mx).*

**Resumen:** En este artículo se presenta el diseño y propuesta de un método de supervisión en intercambiadores de calor usados para la producción de polietileno de baja densidad a partir del bioetanol. El método propuesto se basa en el uso de un observador adaptable para sistemas Lipschitz para monitorear y dar seguimiento al coeficiente global de transferencia de calor U(t), donde a pesar de las fallas que se presenten, esta puede mantener los valores nominales para que a la salida del intercambiador los fluidos del lado frío y caliente no se vea afectado, y a su vez no altere la calidad de la producción de polietileno. Los resultados experimentales se demuestran mediante simulaciones.

*Keywords:* fallas, instrumentación, intercambiadores de calor, observadores adaptables, polietileno, sensor.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales térmicos se han optimizado con el paso del tiempo para obtener mejores resultados en los productos que requieren en su elaboración la transmisión eficiente de calor; Uno de los tantos dispositivos diseñados para cumplir con tal propósito se les conoce como intercambiadores de calor, la cual facilita el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evita al mismo tiempo que se mezclen entre sí (Çengel, 2007).

La mejora constante del dispositivo y su permanencia en una amplia variedad de procesos de ingeniería lo ha hecho un dispositivo indispensable para la industria. En 1852 el intercambiador de carcasa y tubos se usó por primera vez para el condensado de vapor de navíos fluviales (Meriño-Díaz, 2018); Por su parte los intercambiadores de tipo plato, se han aplicado comúnmente en bioprocesos, la cual se define como un proceso que involucra métodos de la ingeniería química a los procesos biotecnológicos teniendo como ejemplo: la alimentaria, procesos criogénicos, esterilización, etc. (Agarwal et al., 2014) remontándose a 1878, año en que fue patentado y aplicado por primera vez a la industria de los alimentos y bebidas (Brezáni & Bartae, 2014).

Estos dispositivos operan durante largos periodos de tiempo en las mismas condiciones (Çengel, 2007) y su exposición prolongada al entorno afectan su vida útil ,ocasionando así fallas parciales o totales (Adam-Medina et al., 2013). Su rendimiento y operación efectiva dependen del monitoreo de sus parámetros óptimos de operación. Uno de los criterios requeridos para evaluar el funcionamiento del intercambiador de calor es el Coeficiente de transferencia de calor *(U),* ya que permite determinar el factor de incrustación e impacto de las deposiciones (Sánchez & Góngora, 2018).

Actualmente, los investigadores han desarrollado sistemas de diagnóstico de fallos en intercambiadores calor, específicamente en el diseño de observadores de estado (sensores virtuales) para la estimación del valor del estado que es supervisado (Mosaja & Arias, 2020), otros trabajos relacionados con la estimación del coeficiente de transferencia de calor emplean métodos y estrategias en línea y fuera de línea (Chávez et al., 2017); Existen otros tipos de diseños de observadores aplicables a los intercambiadores de calor como son los observadores difusos, filtros de Kalman extendidos (Guerrero et al., 2006), de gran ganancia y proporcional integral (Hernández-González, 2008). No obstante, en este trabajo se aplica como técnica de supervisión un observador adaptable, los cuales han sido aplicados exitosamente a una amplia variedad de sistemas dinámicos (Escobar et al., 2009) estos tipos de observadores básicamente estiman tanto los parámetros como las variables de estado del sistema (Astorga-Zaragoza, 2007), analizando así la dependencia del parámetro $U$ con la temperatura y con el flujo. (Escobar et al, 2009). Se emplea el observador adaptable para dar seguimiento del coeficiente global de transferencia de calor $U(t)$ de un intercambiador de calor por contracorriente. Se realiza una estimación periódica y se puede determinar si el dispositivo requiere algún tipo de mantenimiento (Astorga-Zaragoza, 2007) y a su vez detectar el deterioro del rendimiento en el intercambiador de calor usado para la producción de polietileno de baja densidad a partir del bioetanol (Lora et al., 2019) el cual es un biocombustible que se obtiene a partir de carbohidratos solubles de origen vegetal como la sacarosa, o de polímeros

 ISSN en trámite

simples como el almidón, (Zamora-Hernández et al., 2014), siendo una alternativa para la fabricación de plásticos más comunes y a su vez sustentable (Fonseca-Pillares, 2016). El observador diseñado es evaluado con datos reales del proceso.

Nomenclaturas usadas para medir la eficiencia térmica del intercambiador de calor.

**Tabla 1. Nomenclaturas del intercambiador**

| Nomenclatura | Descripción | Unidades |
|---|---|---|
| $T_{ci}$ , $T_{hi}$ | Temperaturas de entrada en el lado frío y caliente. | $K$ |
| $T_{co}$ , $T_{ho}$ | Temperaturas de salida en el lado frío y caliente. | $K$ |
| $U$ | Coeficiente de transferencia de calor. | $J/(m^2\ K\ s)$ |
| $A$ | Área superficie del intercambiador de calor. | $m^2$ |
| $C_{pc}$ | Calor especifico en el lado frío. | $J/(Kg\ K)$ |
| $C_{ph}$ | Calor especifico en el lado caliente. | $J/(Kg\ K)$ |
| $\rho_c$ | Densidad del fluido frío | $Kg/m^3$ |
| $\rho_h$ | Densidad del fluido caliente | $Kg/m^3$ |
| $V_c$ | Volumen en el lado frío. | $m^3$ |
| $V_h$ | Volumen en el lado caliente. | $m^3$ |
| $v_c$ | Caudal en el lado frío. | $m^3/s$ |
| $v_h$ | Caudal en el lado caliente. | $m^3/s$ |

Este artículo está organizado de la siguiente manera: En la sección 2 se presenta el modelado del sistema del intercambiador de calor. En la sección 3 el desarrollo del observador adaptable basado en el modelado matemático de la sección 2, la sección 4 las pruebas realizadas con los valores nominales del proceso de producción de polietileno a partir de biocombustibles. En la sección 5 la propuesta de instrumentación y finalmente la sección 6 las conclusiones.

## 2. MODELADO DEL SISTEMA

En un intercambiador de calor, el líquido fluye por el tubo interior y es calentado por otro líquido que fluye concurrentemente alrededor del tubo, tal como se aprecia en la Fig. 1 y 2 en donde la temperatura y el flujo del líquido no solo cambian con el tiempo, sino que también cambian a lo largo de la dirección axial x (Fazlur-Rahman & Devanathan, 1994).

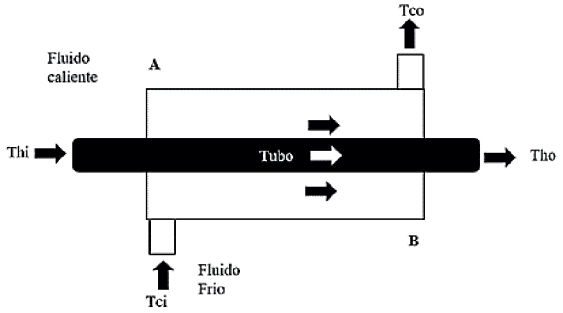



Fig. 1. Intercambiador de calor concurrente.

Por lo tanto si se quiere representar de forma grafica el comportamiento del intercambiador de calor se obtiene lo siguiente:

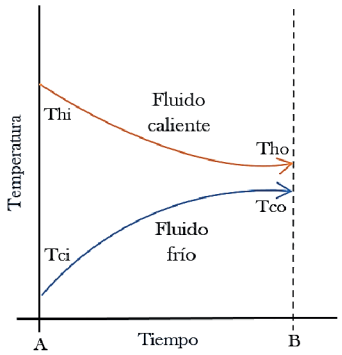



Fig. 2. Comportamiento de las temperaturas de entrada y salida.

### *2.1 Modelado del Sistema ideal*

La dinámica del sistema se obtiene mediante una regla de balance energético.

Las temperaturas de entrada, $T_{ci}$ , $T_{hi}$, son constantes. Mientras que las temperaturas de salida $T_{co}$ , $T_{ho}$ se encuentra calculando los balances de energía de las siguientes ecuaciones:

$$\dot{T}_{co} = \frac{2}{V_c}\left[V_c(T_{ci} - T_{co}) + \frac{UA}{C_{pc}\rho_c}\Delta T\right] \quad (1)$$

$$\dot{T}_{ho} = \frac{2}{V_h}\left[V_h(T_{hi} - T_{ho}) + \frac{UA}{C_{ph}\rho_h}\Delta T\right] \quad (2)$$

ΔT Se puede definir como diferencia de temperaturas, la cual, si se desglosara, se obtendría la siguiente fórmula.

$$\Delta T = \Delta T_\ell \triangleq \frac{(T_{co}-T_{ci})-(T_{hi}-T_{co})}{ln(\frac{T_{ho}-T_{ci}}{T_{hi}-T_{co}})} \quad (3)$$

Los estados y entradas en el sistema son:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{co} \\ T_{ho} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{ci} \\ T_{hi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

 ISSN en trámite

Desarrollando así un sistema ideal, sin embargo, en la realidad el dispositivo estará expuesto a condiciones distintas a estas como los fluidos que se manejan, las temperaturas mínimas y máximas requeridas, etc.

Basándose en parámetros experimentales, se obtiene la siguiente gráfica en la que se muestran fijamente las temperaturas de entrada y de salida de algún fluido en °C.

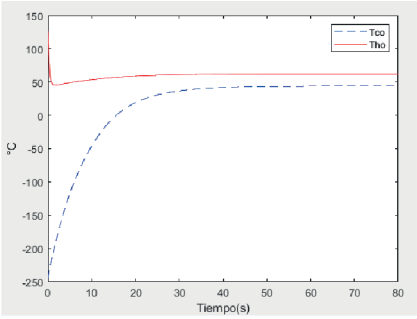



Fig. 3. Gráfica de obtenido de MATLAB de un modelado ideal.

*2.2 Escenario de fallas*

Dentro del sistema puede que falle una pieza y que manifieste alteraciones en los valores nominales, el caudal del sistema y las temperaturas de salidas en el intercambiador de calor.

De acuerdo con (Verde et al., 2012) las fallas se clasifican de la siguiente manera:

- Falla abrupta: Donde el modelado de la falla es tipo escalón.
- Falla incipiente: El modelado de la falla aumenta paulatinamente con respecto al tiempo.
- Falla intermitente**:** No tiene una evolución determinada en el tiempo.
- Por último, en el peor de los casos se puede presentar una avería el cual puede ser considerado irreversible.

En la fig. 4 se observan los efectos de una falla incipiente en el sistema, teniendo como resultado una respuesta exagerada de cambio de temperatura.

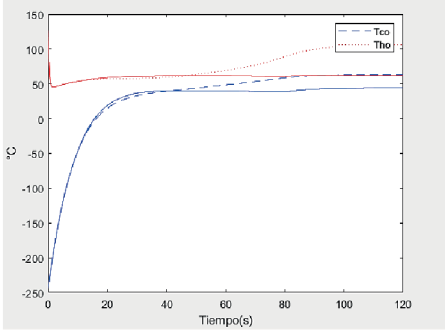



Fig. 4. Comparación del sistema con falla

Entendiendo que el artefacto no es perfecto y que tienden a fallar por su exposición al ambiente, se ve la necesidad de buscar alternativas que en conjunto con el adecuado monitoreo y supervisión prolongan la vida útil del dispositivo; Es así como los observadores adaptables son opciones viables para su aplicación en la detección de fallas.

## 3. DISEÑO DEL OBSERVADOR ADAPTABLE

*3-1 Convergencia del sistema*

El sistema ahora se describe con las siguientes matrices:

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\dot{x}_1(t)\\ \dot{x}_2(t)\end{bmatrix}}_{\dot{x}(t)}=\underbrace{\begin{bmatrix}-\frac{2v_c}{V_c} & 0\\ 0 & -\frac{2v_h}{V_h}\end{bmatrix}}_{A}\underbrace{\begin{bmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\end{bmatrix}}_{x(t)}+\underbrace{\begin{bmatrix}\frac{2v_c}{V_c}u_1(t)\\ \frac{2v_h}{V_h}u_2(t)\end{bmatrix}}_{\psi(y(t),u(t))}+$$
$$\underbrace{\begin{bmatrix}\frac{2A}{V_cC_{Pc}\rho_c}\\ -\frac{2A}{V_hC_{Ph}\rho_h}\end{bmatrix}}_{B}\underbrace{[\Delta T(t)]}_{\phi(x(t),u(t)}\underbrace{U}_{\theta}+\underbrace{\begin{bmatrix}1\\1\end{bmatrix}}_{N}\eta(t) \tag{5}$$

Obteniendo las siguientes salidas:

$$y(t)=\underbrace{[1\quad 0]}_{C}\underbrace{\begin{bmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\end{bmatrix}}_{x(t)}+\underbrace{\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}}_{G}\eta(t) \tag{6}$$

Adaptamos las matrices al código del programa y se obtienen las siguientes gráficas en donde el sistema en forma adaptable si es viable y permite diseñar como siguiente paso el observador.

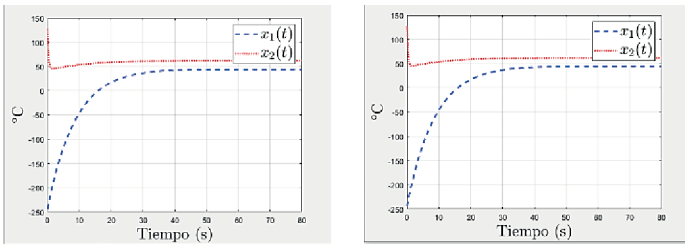



Fig. 5. Sistema en forma adaptable

*3.2 Observador adaptable*

Los observadores adaptables son sensores virtuales que ayudan a estimar parámetros o condiciones iniciales para poder detectar cuando algo no está bien o fuera de su rango, a su vez hace arreglos en la cual procura regresar a las condiciones nominales, ya que detecta, sigue y corrige el sistema a un comportamiento adecuado ante una falla. En resumen, su principal actividad será manipular y monitorear el intercambiador de calor para verificar si está dentro de sus valores nominales o ya se alejó de tales valores.

El observador debe cumplir con las siguientes condiciones:

- *Ax(t),* La parte donde están los parámetros y estados.

 ISSN en trámite

- $\Psi(y(t), u(t))$, Parte donde están las salidas y las entradas $\phi_1(x(t), u(t))$ parte que involucra estados y entradas.
- $B\phi_2(x(t), u(t))\theta(t)$, Parte donde se involucran todos los elementos que van junto con el parámetro desconocido.

Se incluyen condiciones en las cuales los estados deben de pertenecer a una región de los reales, así como theta, teniendo cada una su determinación de números de matriz.

Antes de encontrar las ganancias, es importante reconocer que para el diseño del observador se debe cumplir que los sistemas sean Laphitz, la cual es un sistema que evalúa el sistema no lineal. La condición Laphitz da una respectiva solución.

Se interpreta la ecuación de espacio de estado en el código de MATLAB, (Ekramian et al., 2013).

$$\dot{x}(t)=Ax(t)+\Psi(y(t), u(t)) +\varphi(x(t), \theta(t), u(t)) \quad (7)$$

$$y(t)=Cx(t) \quad (8)$$

$$\varphi(x(t), \theta(t), u(t)) = \phi_1(x(t), u(t)) + B\phi_2(x(t), u(t))\theta(t) \quad (9)$$

$\mathcal{L}$, es una ganancia la cual se multiplica por la diferencia de la salida real del sistema menos la salida que nos dará el observador a diseñar.

$$\dot{x}(t)=Ax(t)+\Psi(y(t), u(t)) +\varphi(x(t), \theta(t), u(t))-\mathcal{L}(y(t)-\mathcal{C}\hat{x}(t)) \quad (10)$$

Estimación del vector de parámetros $\hat{\theta}(t)$. Donde theta es el parámetro desconocido.

K, es otra ganancia que se multiplica por la diferencia de los valores que se ven entre paréntesis. Siendo gamma un valor constante en la que la primera condición es que sea mayor a 0.

En base a un observador de estado adaptable para el sistema (7) y (8), queda de la siguiente manera:

$$\hat{\theta}(t)=\Gamma\, \phi_2^T(\hat{x}(t).u(t))K\,(y(t)-C\hat{x}(t)) \quad \Gamma>0 \quad (11)$$

Las matrices L y K son ganancias del observador. (Alvarado-Méndez et al., 2019)

Considerando que $U(t)$ es el parámetro desconocido a estimar, utilizando las ecuaciones (10) y (11) del observador y aplicado al sistema (5) y (6) se obtiene el siguiente observador adaptable:

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\dot{\hat{x}}_1(t)\\ \dot{\hat{x}}_2(t)\end{bmatrix}}_{\dot{\hat{x}}_1(t)}=\underbrace{\begin{bmatrix}-\frac{2v_c}{V_c} & 0\\ 0 & -\frac{2v_h}{V_h}\end{bmatrix}}_{A}\underbrace{\begin{bmatrix}\hat{x}_1(t)\\ \hat{x}_2(t)\end{bmatrix}}_{\hat{x}(t)}+\underbrace{\begin{bmatrix}\frac{2v_c}{V_c}u_1(t)\\ \frac{2v_h}{V_h}u_2(t)\end{bmatrix}}_{\psi(y(t),u(t))}$$

$$+\underbrace{\begin{bmatrix}\frac{2A}{V_cC_{Pc}\rho_c}\\ -\frac{2A}{V_hC_{Ph}\rho_h}\end{bmatrix}}_{B}\underbrace{[\Delta T(t)]}_{\phi(\hat{x}(t),\hat{\theta}(t),u(t))}\hat{\theta}(t)-L(y(t)-C\hat{x}(t)) \quad (12)$$

$$\dot{\hat{\theta}}(t)=\Gamma\,[\Delta T(t)]^T H(y(t)-C\hat{x}(t)) \quad (13)$$

Para elegir $\Gamma$ se requiere que esta sea un escalar positivo. Ya que con diferentes valores nos va a permitir el tiempo de convergencia adecuado para el sistema, siendo así los únicos valores que se van a elegir.

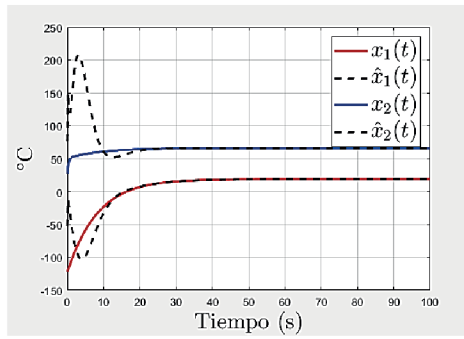



Fig. 6. Comparación de estado 1 y estado 2 de Tco ,Tho

Las líneas roja y azul muestran el comportamiento de los estados originales, mientras que las líneas negras punteadas muestran la del observador y su comportamiento, la cual se puede comprobar que el observador está funcionando de forma óptima al tener un comportamiento con los valores nominales.

El comportamiento del observador dependerá del escenario de falla que se presente en el sistema y junto con ello la posible respuesta del sistema.

Ejemplo de respuesta del observador ante una falla abrupta con gamma de 90

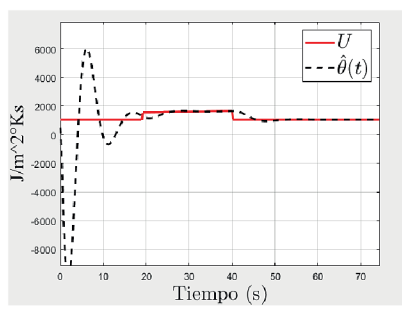



Fig. 7. Falla y observador

## 4. PRUEBAS

El proceso que se propone es la de un intercambiador de calor aplicado para el sistema de evaporación de bioetanol, la cual se usa para introducir a la segunda etapa de la planta que es el

 ISSN en trámite

proceso de polimerización de etileno para obtener polietileno de baja densidad. Donde el fluido frío será bioetanol, y el fluido caliente será un aceite orgánico sintético dado la baja presión con la que se trabaja y a las propiedades de los aceites térmicos (Lora et al., 2019).

Los valores usados para la simulación son los especificados en la tabla 2:

**Tabla 2. Parámetros**

| Evaporador de casco y tubo | |
|---|---|
| $U$ | $454.261\ J/(m^2\ K\ s)$ |
| Fluido frio | Etanol |
| $T_{ci}$ | $298\ °K$ |
| $T_{co}$ | $623\ °K$ |
| Fluido caliente | Aceite orgánico |
| $T_{hi}$ | $700\ °K$ |
| $T_{ho}$ | $353°K$ |

Procedemos a la respectiva simulación, con una falla tipo abrupta, en la cual se observa el siguiente comportamiento. Donde la falla se hace presente, pero el observador estabiliza el sistema, logrando que este regrese a su valor original.

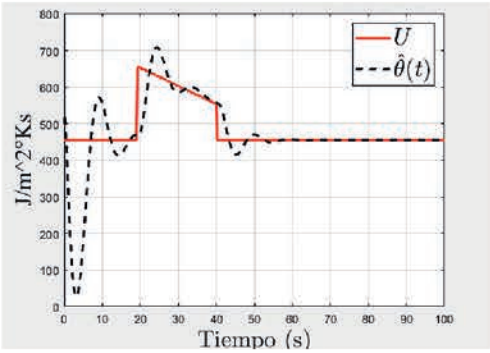



Fig. 8. Parámetro estimado y falla

Para una mejor presentación se presenta la siguiente gráfica, donde a pesar de tener los siguientes cambios sigue su comportamiento original con un poco de dificultad al inicio.

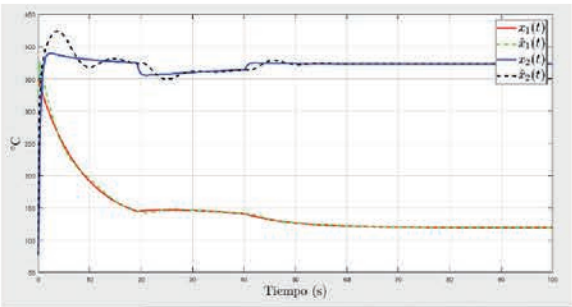



Fig. 9. Comportamiento del observador con el Sistema

*4.1 Observaciones*

El sistema presenta perturbaciones. Sin embargo, con el observador adaptable en un breve lapso de tiempo se estabiliza.

## 5. PROPUESTA DE INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación se define como el conjunto de ciencias y tecnologías mediante las cuales se pueden medir cantidades físicas o químicas con el objetivo de obtener información para su archivo, evaluación o actuación sobre sistemas de control automático (Gutiérrez-Hinestroza & Iturralde-Kure, 2018). En la industria dedicada a la producción de bioetanol y bioplásticos se requiere de un complejo sistema de control e instrumentación, la cual puede ser tan compleja como la industria petroquímica en la cual se busca la medición de indicadores, registro, evaluación de temperatura, etc.

En este artículo solo se emplea la instrumentación requerida en un sistema de evaporación. El control propuesto consiste en usar un sensor la cual es un dispositivo que capta el valor de la variable de proceso y envía una señal de salida predeterminada (Creus-Solé, 2011) en este caso se controlara el coeficiente de transferencia de calor *(U)* a la salida del intercambiador con el fin de supervisar el rendimiento del sistema, monitoreando los momentos donde se aplican las fallas, evitando de esta forma un accidente.

El Sensor de flujo de calor robusto IHF01 mide el flujo de calor y la temperatura superficial de equipos industriales como hornos, calderas, columnas de destilación, etc. Es un dispositivo protegido con acero inoxidable, sellado, impermeable, resistente a altas presiones y eficaz pasa su uso a largo plazo en un solo lugar. El sensor mide el flujo de calor a través del objeto montado en $W/m^2$ y la temperatura en °C. Su rango de medición es de (-1000 a +1000) x $10^3$ $W/m^2$ y la sensibilidad nominal es de 9 x $10^{-9}$ $V/(W/m^2)$. Dado las características del dispositivo, se determina que es ideal para implementar en nuestro intercambiador de calor.

Por lo tanto, se complementa la redundancia analítica (Observador adaptable) con la redundancia física (Sensor de Coeficiente de transferencia de calor) aumentando así la fiabilidad del sistema al tener un respaldo de supervisión en el intercambiador.

Fig. 10. Sensor de flujo de calor robusto IHF01 y Propuesta de montaje exterior.

 ISSN en trámite

## *6. CONCLUSIÓN*

El observador adaptable cumple con su función de detección de fallas en el intercambiador de calor. El observador adaptable en conjunto con una correcta instrumentación garantiza que el equipo a monitorear y supervisar en sus parámetros nominales sea eficiente en su rendimiento. Complementar el monitoreo del intercambiador de calor con el sensor de flujo de calor robusto y el observador adaptable, permite tener un plan de mantenimiento que permitirá optimizar el proceso.

## REFERENCIAS

Adam-Medina, M., Escobar, R. F., Juárez-Romero, D. F., Guerrero-Ramírez, G. V., & López-Zapata, B. V. (2013). Detección De Fallas En Un Intercambiador De Calor, Utilizando Observadores Por Modos Deslizantes De Segundo Orden. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(2),327-336. ISSN: 1665-2738.

Agarwal, P., Adhirathsik, & Shanthi, V. (2014). Application of heat exchangers in bioprocess industry: A review. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*. 6. 24-28.

Alvarado-Méndez, P., Astorga-Zaragoza, C., Osorio-Gordillo, G., Guerrero-Ramírez, G., Morales-Menéndez, R., & Quintero-Mármol Márquez, E. (2019). Monitoreo de una suspensión semiactiva a través de un observador adaptable. *AMCA*.

Astorga-Zaragoza, C.M., Zavala-Río, A., Alvarado, V.,Méndez, R.M., and Reyes-Reyes, J. (2007). Performance monitoring of heat exchangers via adaptive observers. Measurement, 40(4), 392–405.

Brezáni,M., Barta, D. (2016). *The Draft Of The Exhaust Gas Heat Exchanger And Using*. University of Zilina, Faculty of Mechanical Engineering.

Çengel, Y. A. (2007). *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. Un enfoque práctico* (3 ed.). México, D.F.: MCGRAW-HILL / Interamericana De México.

Chávez, E., Carrillo, J., Cabrera, A. y Castillo, R. (2017). Estimación del Coeficiente de Transferencia de Calor en Intercambiadores de Calor Usando Observadores de Perturbación. (Ed.), *Modelación Matemática, Biología, Ciencias Sociales E Ingeniería*.pp. 129-145. Huajuapan de León, México: Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Creus-Solé, A. (2011). *Instrumentación industrial* (8a ed.). Barcelona: Marcombo.

Ekramian, M., Sheikholeslam, F., Hosseinnia, S., and Yazdanpanah, M.J. (2013). Adaptive state observer for Lipschitz nonlinear systems. *Systems & Control Letters,* 62(4), 319–323.

Escobar, R., Astorga-Zaragoza, C., Juárez-Romero, D., Hernández, J., & Adam-Medina, M. (2009). Estimación en Línea del Coeficiente de Transferencia de Calor en un Intercambiador de Calor. *Congreso Anual 2009 de la Asociación de México de Control Automático*.

Fazlur-Rahman and Devanathan. *(*1994).Modelling and dynamic feedback linearisation of a heat exchanger model. *Proceedings of IEEE International Conference on Control and Applications*. vol.3 pp. 1801-1806

Fonseca-Pillares, J. S. (2016). Etileno *biobasado a partir de caña de azúcar como alternativa para la producción de Etileno en México*. [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio Dspace .

Guerrero, M., Hernández, O., Astorga-Zaragoza, C.-M., & García-Beltran, C.-D. (2006). Diseño e implementación práctica de un sensor virtual basado en observador para un. *Congreso Nacional de Control Automático 2006*.

Gutiérrez-Hinestroza, M.V., Iturralde-Kure, S. (2017). *Fundamentos básicos de instrumentación y control*. UPSE. Matriz: Facultad de Ciencias de la la Ingeniería. 127p.

Hernández-González, O. (2008). *Modelado, control y observadores de estado en intercambiadores de calor.* [Tesis de maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico].

Lora, M. A., Tocci, C. A., & Avellaneda, A. S. (2019). Planta de polietileno de baja densidad. Universidad Tecnológica Nacional.

Mariño-Díaz, Óscar (2018). *Diseño de un intercambiador de calor de tubos y carcasa (1-2) para una planta química asociada a una fundición pirometalúrgica.* [Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado, E.T.S.I. de Minas y Energía (UPM)]. Archivo Digital UPM.

Mosaja, J., & Arias, L. (2020). Implementación de observadores dedicados para la detección de fallos de un Intercambiador. (TECSUP, Ed.) *Revista I+i Investigación Aplicada e Innovación*, 14, 32-44.

Sánchez E., A. A., & Góngora L., E. (2018). Determinación de los coeficientes globales de transferencia de calor comparando los métodos DTML y ε-NUT. *Ingeniería Energética, XXXIX* (3),203-212.

*Verde Rodarte, M. C., Gentil, S., & Morales- Menéndez, R. (2013). Monitoreo Y Diagnostico Automático De Fallas En Sistemas Dinámicos* (1 ed.). Ed. Trillas.

Zamora-Hernández, T., Prado-Fuentes, A., Capataz-Tafur, J., Barrera-Figueroa, B. E., & Peña-Castro, J. M. (2014). Demostraciones prácticas de los retos y oportunidades de la producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de cultivos tropicales. *Educación Química*, 25 n. 2, 122-127.

 ISSN en trámite

# Comparación de algoritmos para la sincronización de sistemas caóticos inciertos

**M. Galván-Castillejos** * **A.-D. Martínez-Esquivel** *
**F. Ramírez-Rasgado** ** **C.-M. Astorga-Zaragoza** **
**H.-A. López-Hernández** * **R. Figueroa-Sanchez** *

* *Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos, Coatzacoalcos, Ver., México.*
** *Tecnológico Nacional de México: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Mor., México.(e-mail:d19ce042@tecnm.cenidet.mx)*

**Resumen:** En este trabajo, se presenta una comparativa en el diseño de algoritmos para la sincronización de sistemas caóticos, los cuales presentan incertidumbres. Dicha incertidumbre se trata como un mensaje que es enviado y se necesita conocer. Se consideran las perturbaciones que puedan encontrarse en la dinámica del maestro y en las ecuaciones de salida del esclavo, esto debe sincronizarse correctamente. Se muestra la sincronización de los estados y la reconstrucción del mensaje por medio del sistema esclavo.Así mismo, se muestran las ventajas y desventajas de cada estructura de los algoritmos. Los resultados son obtenidos por medio de simulación utilizando el software MATLAB/Simulink donde se logra la sincronización de los dos sistemas.

*Keywords:* Sistemas no lineales, Sistemas caóticos, Sincronización, Observador, Sistemas inciertos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas caóticos son sistemas dinámicos, se comportan en ciertas condiciones de forma tan compleja que parecen probabilísticos, aunque, en realidad son deterministas. Estos sistemas presentan las características de ser, no lineales, poseen extrema sensibilidad ante cambios muy pequeños de sus condiciones iniciales y no se puede prever el comportamiento del sistema hasta que el proceso sucede o se calcula H.Strogatz (2015). Estos sistemas al ser cambiantes por cualquier variante en sus condiciones iniciales pueden desarrollar grandes desastres. Por esta razón surgen los sistemas de control para prevenir daños a la población.

Los sistemas dinámicos caóticos son una idea muy sencilla a la sensibilidad de las condiciones iniciales: pequeños cambios en las condiciones iniciales provocan grandes cambios en los resultados pasado un tiempo de diferencia. Es decir que si en un sistema caótico dos puntos empiezan muy próximos se distancian después de un periodo de tiempo recorrido, cada uno forma una orbita distinta con su recorrido, por ello es esencial conocer con precisión el valor de la variable para conocer la el valor que tendrá en un futuro.La evolución irregular e impredecible de muchos sistemas no lineales se ha denominado caos. El caos aparece en múltiples sistemas, como los láseres, algunas reacciones químicas o la dinámica de fluidos Benedicto Carrillo et al. (2016).

Los sistemas caóticos se empezaron a conocer a base del meteorólogo Edward Lorenz cuando trabajaba en un programa que le ayudaría a predecir el clima y el comportamiento de la atmósfera, por ello se dio cuenta que cuando los valores variaban un poco ya sea por la más mínima diferencia predecía comportamientos completamente distintos en el clima.

A lo largo del tiempo se dio a conocer la sincronización entre dos sistemas caóticos iguales, esto llevo a que la sincronización caótica sea un campo de estudio con un gran futuro en distintas áreas de investigación. La sincronización de los sistemas caóticos con incertidumbres es uno de los temas más retadores en los sistemas de control, algunos de los sistemas pueden tener la propiedad de auto sincronización, sin embargo, no todos tienen la propiedad de hacerlo Tonatiuh et al. (2017).

La sincronización caótica está clasificada como: sincronización completa, es aquella cuando dos osciladores están acoplados, donde uno conduce al otro; sincronización generalizada, diferente a la anterior en esta son osciladores diferentes, donde los estados de uno están definidos por

 ISSN en trámite

los estados del otro; sincronización de fase, sucede cuando los osciladores conectados no son iguales, contienen amplitudes diferentes y no permanecen sincronizados, cuando su fase evoluciona de manera sincronizada. Zelinka et al. (2010)

Este artículo presenta una comparativa entre dos algoritmos de diferentes estructuras para la sincronización de un sistema caótico maestro y un esclavo (Sección 2). Idealmente se considera que el sistema esclavo es una copia exacta del maestro y se conocen todos los parámetros y señales que influyen en el, sin embargo, en los sistemas existen incertidumbres, en este caso son los mensajes que se transmiten a través de el, por lo cual es necesario tratarlos como un sistema incierto (Sección 3). que presenta incertidumbres. La principal contribución de este trabajo se muestra en la sección 4, es la metodología de diseño y comparativa entre la utilización de un observador adaptable de alta ganancia y un observador de estado extendido, en donde con dichas estructuras es posible reconstruir el mensaje incierto del sistema maestro. La aplicación de estos observadores se muestra en la sección 5, donde posteriormente se obtienen y validan los resultados en simulación en la sección 6. Las conclusiones del trabajo se presentan en la sección 7.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una duda que surge a través del tiempo de los sistemas caóticos es, ¿cómo se logra que alcance la sincronización adecuada y la mantenga durante un periodo de tiempo?, también, ¿es posible que dos sistemas se sincronicen?, este artículo da respuesta a ello para sistemas maestro-esclavo con incertidumbres. Considerando un sistema no lineal descrito por las ecuaciones:

$$\Sigma \begin{cases} \dot{x} &= f(x) + g(x)u, \\ y &= h(x) \end{cases} \tag{1}$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ el estado, $u(t) \in \mathbb{R}$ la entrada y la salida $y(t) \in \mathbb{R}$, siendo $f(x)$ y $g(x)$ funciones analíticas. Con esto se puede escribir un sistema maestro como se muestra a continuación:

$$\Sigma_M : \begin{cases} \dot{x}(M) &= f_M(x_M) + g_M(x_M)u_M \\ y_M &= h_M(x_M) \end{cases} \tag{2}$$

Donde el vector de estado está dado por $x_M = [x_{1,M}, x_{2,M}, \ldots, x_{n_M,M}]^T \in P^{n_M}$, $U_M \in P$ es una entrada, $y_M \in P$ es una variable de salida del sistema maestro, siendo $f_M$ y $g_M$ funciones vectoriales suaves. $\dot{x}$ es el punto de equilibrio de 1, como también $\dot{x}_M$ lo es para la ecuación 2. Definiendo ahora, el sistema esclavo como:

$$\Sigma_E \begin{cases} \dot{x}(E) &= f_E(x_E) + g_E(x_E)u_E \\ y_E &= h_E(x_E) \end{cases} \tag{3}$$

donde el vector de estado está definido por $x_E = [x_{1,E}, x_{2,E}, \ldots, x_{nE}, E]^T \in \mathbb{P}^{n_s}$, $u_s \in P$ es la entrada del control, la variable de salida es $y_E$ y $f_E$, $g_E$ son campos vectoriales. Es importante resaltar que aunque ambos sistemas comparten la misma estructura, presentan comportamientos completamente diferentes ya que una particularidad de los sistemas caóticos es que ante cambios de condiciones iniciales presentan dinámicas diferentes. Es por esto que se necesitan algoritmos para lograr sincronizar sus trayectorias.

### *2.1 Sistema de Rossler*

El sistema de Rossler es utilizado en muchos algoritmos de comunicación, dicho sistema es descrito por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -y(t) - z(t) \\ \dot{y}(t) &= x(t) + ay(t) \\ \dot{z}(t) &= b + z(t)(x(t) - c) + m(t)z(t) \end{aligned} \tag{4}$$

Donde los estados del sistema son representados por $x, y, z$, las constantes del sistema $a, b, c$ que son las que logran los comportamientos caóticos. Este sistema es mínimo para el caos continuo. Este atractor está interconectado por bifurcaciones, particularmente una de Hopf de los atractores estacionarios a los periódicos y una cascada de duplicación de periodos. El resultante de ello tiene un solo lóbulo y se denomina caos de tipo espiral, manifestando amplitudes irregulares para las oscilaciones (Pierre, 2005).

## 3. REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA INCIERTO

Representando el sistema (4) como el sistema maestro se tiene:

$$\Sigma_M \begin{cases} \dot{x}_M &= Ax_M + Bf_0(x_M) + Bg_0(x_M)m(t) \\ y_M &= Cx_M \end{cases} \tag{5}$$

Donde $x_M = [x,\ y,\ z] = [x_1,\ x_2,\ x_3]$ son los estados del sistema maestro, $f_0(x_M) = b + x_1x_3$, $g_0(x_M) = x_3$. Es importante resaltar que el $m(t)$ puede ser variante con respecto al tiempo. Las matrices $A$ y $B$ quedan de la siguiente forma:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 1 & a & 0 \\ 0 & 0 & -c \end{bmatrix},\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},\ C = [0\ 1\ 0] \tag{6}$$

Sin embargo, en los sistemas de comunicación solo el sistema maestro conoce el mensaje, por lo que esclavo ve al maestro de la siguiente forma:

$$\Sigma_M \begin{cases} \dot{x}_M &= Ax_M + Bf_0(x_M) + Bg_0(x_M)\varepsilon(t) \\ y_M &= Cx_M \end{cases} \tag{7}$$

Donde $\varepsilon(t)$ es la función incierta que el esclavo necesita estimar para lograr dos cosas: i) Su sincronización y ii) reconstruir el mensaje.

## 4. DISEÑO DE LOS OBSERVADORES

Considerando lo anterior, dentro de la teoría de control existen algoritmos llamados observadores que permiten la estimación de dichas incertidumbres. A continuación se muestran los dos observadores a comparar utilizados para la sincronización.

 ISSN en trámite

### *4.1 Observador adaptable de alta ganancia*

El primer observador considera la siguiente estructura del sistema no lineal:

$$\Sigma \begin{cases} \dot{x} = Ax + g(u,x) + \Psi(u,x)\rho \\ \dot{y} = Cx = x^1 \end{cases} \tag{8}$$

con una matriz

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1_{(q-1),p} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad C = [1_p, 0_p, ..., 0_p] \tag{9}$$

la salida $y \in \mathbb{R}^p$ con $x^k \in \mathbb{R}^p$ y $k = 1, \ldots, q$ e $i = 1, \ldots, p$; la entrada $u \in \mathbb{R}^s$; $\rho \in \mathbb{R}^m$ es un vector con parámetros desconocidos; $\rho_i \in \mathbb{R}, i = 1, ..., m; g(u,x) \in \mathbb{R}^n$ con $g^k \in \mathbb{R}^p, k = 1, ..., q; \Psi(u,x)$ es una matriz $n \times m$ y cada $\Psi_j(u,x) \in \mathbb{R}^n$ $j = 1, ..., m$, compuesta por funciones no lineales. Para este sistema se considera el siguiente observador propuesto en Farza et al. (2009)

$$O_{ADP} \begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x} + \tilde{g}(u, \hat{x} + \hat{\Psi}(u,\hat{x})\rho(t) - \theta\Delta_\theta^{-1}(S^{-1} + \\ & \quad \gamma(t)P(t)\gamma^T(t))C^T K(C\tilde{x}) \\ \dot{\hat{\rho}}(t) &= -\theta P(t)\gamma^T(t)C^T K(C\tilde{x}) \\ \dot{\hat{\gamma}}(t) &= \theta(A - S^{-1}C^T C)\gamma(t) + \Delta_\theta \Psi(u(t), \hat{x}(t)) \\ \dot{P} &= -\theta P(t)\gamma^T(t)C^T C\gamma(t)P(t) + \theta P(t) \end{cases} \tag{10}$$

con $\gamma(0) = 0$ y $P(0) = P^T(0) > 0$. Donde $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ representan a los estados estimados, $\Delta_\theta = diag(1, \ \ldots, 1/\theta^{n-1})$, $\theta > 0$ es el parámetro de ajuste el observador y $K$ es una matriz tal que $A - KC$ sea Hurwitz y $\gamma$ es la condición de excitación persistente. Con esto se logra la convergencia del observador (10) a los estados y parámetros del sistema (7), en donde la incertidumbre se considera como el parámetro a estimar.

### *4.2 Observador adaptable de estado extendido*

En esta sección se propone el observador de alta ganancia de estado extendido, partiendo del siguiente sistema no lineal:

$$\Sigma \begin{cases} \dot{x} = A(u,x)x + \varphi(u,x) \\ y = Cx = x^1 \end{cases} \tag{11}$$

donde el estado $x = (x^1, x^2, \cdots, x^q)^T \in \mathbb{R}^n, i = 1, \cdots, q$ con $n_1 = p$ y $\sum_{i=1}^q n_i = n$, y cada $A_i(u,x)$ es una $n \times n_{i+1}$ 1 matriz triangular con respecto a $x$, es decir $A(u,x) = A(u, x^1, \cdots, x^i), i = 1, \cdots, q-1; \varphi(u,x)$ es una función que tiene una estructura triangular con respecto a $x; u \in \mathbb{R}^s$ es la entrada del sistema; $y \in \mathbb{R}^p$ es la salida adquirida en instantes de tiempo. Es importante recalcar que este sistema es no uniformemente observable, por lo que es necesario que se cumpla con la condición de excitación persistente (Hernández González et al., 2019; Ramırez-Rasgado et al., 2020). Para el sistema anterior se propone el siguiente observador propuesto en (Hernández González et al., 2019; Ramırez-Rasgado et al., 2020):

$$O_{EXT} \begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) &= A(u,\hat{x})\hat{x} + \varphi(u,\hat{x}) - \theta\Delta_\theta^{-1}S^{-1}(t)C^T\tilde{x} \\ \dot{S}(t) &= \theta(-S - A(u,\hat{x})^T S(t) - S(t)A(u,\hat{x}) + \\ & \quad C^T C) \\ \dot{y}(t) &= C\hat{x} \end{cases} \tag{12}$$

donde $\hat{x} = [\hat{x}^1, \hat{x}^2, \cdots, \hat{x}^q]^T$ es el vector de estado estimado, $S(0) = S^T(0)$ es una matriz simétrica definida positiva y el parámetro de ajustes es $\theta > 0$.

## 5. APLICACIÓN DE OBSERVADORES AL SISTEMA INCIERTO

A continuación se muestra la aplicación de los observadores antes mencionados para la estimación de la incertidumbre del sistema (7), logrando la sincronización y la reconstrucción del mensaje.

### *5.1 Aplicación del observador adaptable*

Para este caso se reescribe el sistema (7) de la siguiente forma:

$$\Sigma \begin{cases} \dot{x}_M = Ax_M + g(u, x_M) + \Psi(u, x_M)\rho \\ \dot{y}_M = Cx = x^1 \end{cases} \tag{13}$$

Donde:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad g(u,x) = \begin{bmatrix} ax_1 \\ -x_1 \\ b + x_3(x_2 - c) \end{bmatrix} \\ \Psi(u,x) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad C = [1 \ 0 \ 0] \end{aligned} \tag{14}$$

y la señal incierta $\varepsilon = \rho$ para a ser el parámetro a estimar. Con esto es posible proponer el sistema esclavo de la siguiente forma:

$$O_{E_{ADP}} \begin{cases} \dot{\hat{x}}_E &= A\hat{x}_E + g(u, \hat{x}_E + \Psi(u, \hat{x}_E)\rho - \theta\Delta_\theta^{-1}(S^{-1} + \\ & \quad \gamma(t)P\gamma^T)C^T K(C\tilde{x}) \\ \dot{\hat{\rho}} &= -\theta P\gamma^T C^T K(C\tilde{x}) \\ \dot{\hat{\gamma}} &= \theta(A - S^{-1}C^T C)\gamma + \Delta_\theta \Psi(u, \hat{x}_E) \\ \dot{P} &= -\theta P\gamma^T(t)C^T C\gamma P + \theta P \\ y_E &= C\hat{x}_E \end{cases} \tag{15}$$

Donde $A, g, \Psi$ se muestran en (14) y:

$$\Delta_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\theta^2} \end{bmatrix} \tag{16}$$

La matriz de ganancia $S$ se obtuvo al resolver la LMI $S + A^T S + SA - C^T C = 0$, obteniendo:

$$S = \begin{bmatrix} 0.7395 & -0.7136 & -0.7354 \\ -0.7136 & 1.1605 & 1.6271 \\ -0.7354 & 1.6271 & 2.7513 \end{bmatrix}. \tag{17}$$

 ISSN en trámite

### *5.2 Aplicación del observador de estado extendido*

De igual forma que en la sección anterior, el sistema (7) se reescribe de la siguiente forma:

$$\Sigma_M \begin{cases} \dot{x}_M = A(u, x_M)x_M + \varphi(u, x_M) \\ y_M = Cx_M = x^1 \end{cases} \tag{18}$$

Donde la incertidumbre del sistema pasa a ser $x_4 = \rho$ y se considera que $\dot{x}_4 = 0$, quedando así:

$$A(u, x_M) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{3,M} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$
$$\varphi(u, x) = \begin{bmatrix} ax_{1,M} \\ -x_{1,M} \\ b + x_{3,M}(x_{2,M} - c) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{19}$$
$$C = [1\ 0\ 0\ 0]$$

Con esto se propone el siguiente sistema esclavo para estimar el mensaje en el sistema:

$$O_{E_{EXT}} \begin{cases} \dot{\hat{x}}_E = A(u, \hat{x}_E)\hat{x}_E + \varphi(u, \hat{x}_E) - \theta\Delta_\theta^{-1}S^{-1}C^T\tilde{x}_E \\ \dot{S} = \theta(-S - A(u, \hat{x}_E)^T S(t) - S(t)A(u, \hat{x}_E) + \\ \quad C^T C) \\ \hat{y}_E = C\hat{x}_E \end{cases} \tag{20}$$

Donde $A, \varphi$ se muestran en (19) y:

$$\Delta_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\theta^3 \end{bmatrix}. \tag{21}$$

**Nota:** Es importarte recalcar que existen ventajas y desventajas en ambos observadores. Primeramente la ventaja del caso adaptable es que la dimensión del modelo se mantiene igual, por lo tanto, si existe la presencia de perturbaciones en la salida seria menos amplificada a lo largo del sistema. Sin embargo, representa un mayor costo computacional ya que se tienen que resolver más ecuaciones a diferencia del observador de estado extendido. Pero, en el caso que no se pueda cumplir la condición de excitación persistente es necesario no es recomendable usar el de estado extendido. Se tiene un compromiso entre complejidad y numero de ecuaciones del observador contra amplificación de la perturbación y cumplimiento de la condición de excitación persistente.

## 6. SIMULACIONES

A continuación se validará la sincronización con los observadores caóticos propuestos en simulaciones. En ambos casos las constantes son $a = 0.398, b = 2$ ,$c = 4$ y con el valor de ajuste $\theta = 10$. Las condiciones iniciales del sistema maestro son $x_M(0) = [0.2, -0.4, -0.2]^T$, para el esclavo adaptable son $\hat{x}_{E_{ADAP}} = 5 \times [-0.12,\ 0.24,\ 0]^T$ y $\hat{\rho}_0 = 0.1, \hat{\gamma}_0 = [0.1, 0.1, 0.1]^T, P_0 = 0.00001$, para el esclavo utilizando el observador extendido son $\hat{x}_{E_{EXT}} = 5 \times [-0.12,\ 0.24,\ 0,\ 0.5]^T$ , $S(0) = I(4)$. El mensaje que se desea conocer y se trata como incertidumbre al mensaje $m(t) = 5sign(sin(0.2t))$.

En las Figuras (1)-(3) se muestran la estimación del vector de estado del sistema maestro por medio del sistema esclavo. En la Fig. (1) se muestra la estimación de la salida del sistema maestro $x_{2,M}$ por medio de los esclavos de diferentes estructuras basados en los observadores (15) y (20).

La siguiente figura (2) representa la estimación de $x_1$ con ambos observadores, podemos ver que los observadores solo tardan $0.4seg$ para estimar el estado $x_1$, representando $\hat{x_1}adap$ el observador de alta ganancia y $\hat{x_1}ext$ el observador de estado extendido.

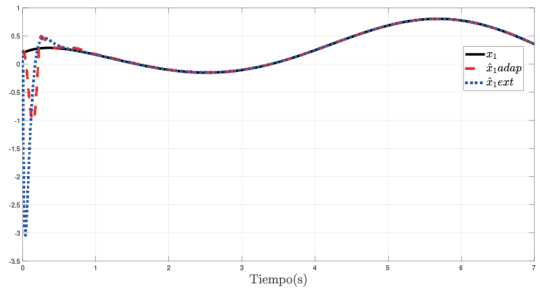



Figura 1. Estimación de la salida del sistema $y_M = x_{2,M}$ por medio de los observadores

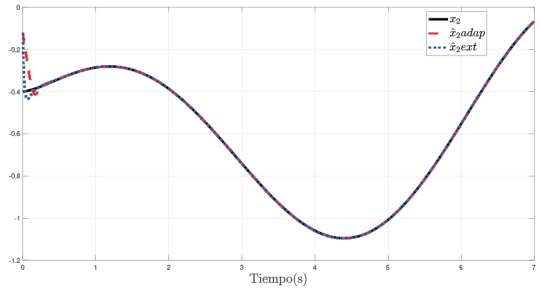



Figura 2. Estimación del primer estado ($x_{1,M}$) por medio de los observadores

En la figura (3) observamos el estado $x_3$ y como $\hat{x}_3adap$ y $\hat{x}_3ext$ tardan $0.5seg$ en sincronizar con el sistema original, aun desconociendo el mensaje.

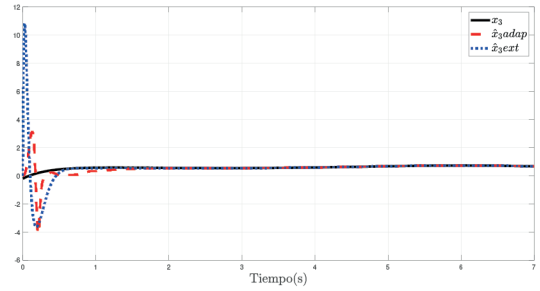



Figura 3. Estimación del tercer estado ($x_{3,M}$) por medio de los observadores

 ISSN en trámite

En la figura (4) se presenta la sincronización del mensaje $m_1(t)$ con $\hat{m}_1,(t)adap$ $\hat{m}_1(t),ext$ el cual es el propósito principal del observador, se puede analizar que la estimación del mensaje original $m_1(t)$ se reconstruye, siendo el mensaje del sistema principal desconocido por los observadores. Existiendo pequeñas variaciones en partes del mensaje, aun así se logra la sincronización del sistema con los observadores y así la estimación de los mensajes. El tiempo que se tardo en sincronizar fue $0.2seg$

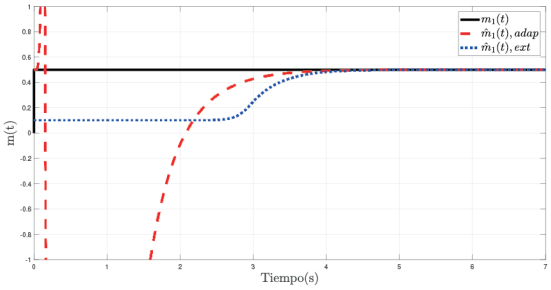



Figura 4. Estimación del Mensaje $m(t)$ a traves de los observadores $\hat{m}_1(t), adap$ $\hat{m}_1(t), ext$

En la siguiente figura se muestra el oscilador caótico Rössler con las tres señales, $x(t)$, $\hat{x}(t), adap$, $\hat{x}(t), exte$, donde se observa que al inicio los observadores tienen variaciones y que al paso del tiempo se logra sincronizar. Es importante resaltar algunos puntos acerca de ambos sistemas esclavos. Primeramente, el adaptable presenta más parámetros de ajuste, por lo que se logra una convergencia más rápida a diferencia de la otra estructura. Sin embargo, el gasto computacional es mayor ya que se tienen que resolver más ecuaciones en un intervalo de tiempo. Como segundo punto, el observador de estado extendido aunque demanda un gasto computacional menor, para sistemas de dimensiones mayores, las perturbaciones en la salida se amplificarían debido al valor de $\theta$. Así mismo, para este caso es necesario que se cumpla con la condición de excitación permanente.

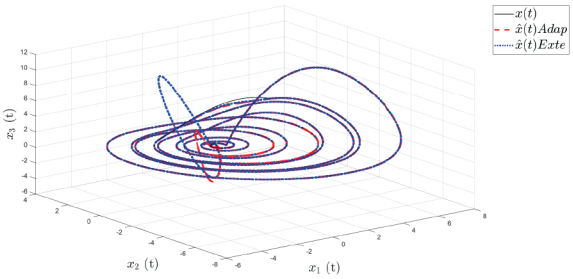



Figura 5. Estimación del oscilador Rossler $x(t)$ con los observadores $\hat{x}(t), adap$ $\hat{x}(t), exte$

## 7. CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó la sincronización con incertidumbres de sistemas caóticos con observadores caóticos, sabiendo que estos sistemas son muy sensibles a las condiciones iniciales y generan un comportamiento aleatorio, siendo la principal problemática a resolver la estimación. Para la solución de dicho problema se consideró el diseño de dos distintos tipos de observadores adaptables no lineales aplicados al sistema caótico de Rössler; siendo el primero un observador adaptable de estado extendido y un observador adaptable con enfoque de alta ganancia. Se cumple con el objetivo principal ya que los observadores no lineales sin conocer el mensaje digital transmitido por el sistema caótico logran reconstruirlo; aun existiendo pequeñas variaciones en la estimación, el mensaje estimado logra sincronizarse con el mensaje original. Para futuros trabajos se pretende cuantificar el gasto computacional y probar el funcionamiento considerando el mensaje como una imagen binaria.

## REFERENCIAS

Benedicto Carrillo, E.C. et al. (2016). Toma de decisiones en sistemas dinámicos no lineales: Una perspectiva psicosociológica.

Farza, M., M'Saad, M., Maatoug, T., and Kamoun, M. (2009). Adaptive observers for nolinearly parametrized class of nonlinear systems. *Automatic*, 45(10), 2292–2299.

Hernández González, O., Ramírez-Rasgado, F., Guerrero, M.E., Pérez-Gómez, A., Astorga-Zaragoza, C., and Moreno-Vazquez, J.d.J. (2019). Continuous-discrete observer for nonlinear systems with sampled measurements: Application to a 1-dof helicopter. In *Congreso Nacional de Control Automático 2019*, 2594–2492. IFAC.

H.Strogatz, S. (2015). Nonlinear dynamics and chaos. *reading,Massachusetts*, 2.

Pierre, G. (2005). Rössler system. *Encyclopedia of Nonlinear Science*.

Ramırez-Rasgado, F., Hernández-González, O., Astorga-Zaragoza, C., Reyes-Reyes, J., Osorio-Gordillo, G., Valencia-Palomo, G., and Galaz-Bustamante, R. (2020). Cascade observer design for uncertain nonlinear systems under time-delay. In *Congreso Nacional de Control Automático*.

Tonatiuh, H., Daniel, R., and Meda-Campaña, J.A. (2017). Sincronización de sistemas caóticos descritos por modelos ts usando propiedades de regulación y observabilidad difusa. *Revista del Diseño Innovativo*, 1(1), 53–65.

Zelinka, I., Celikovsk, S., Richter, H., and Chen, G. (2010). Algoritmos evolutivos y sistemas caóticos. *Studies in Computational Intelligence*.

 ISSN en trámite

# Evaluación experimental de las variables con mayor impacto en el proceso de producción de bioetanol de segunda generación

**Arturo Figueroa Arcos *. Víctor M. Alvarado***
**Guadalupe López López ***

** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, CP 62460.*

*m21ce032@cenidet.tecnm.edu.mx, victor.am@cenidet.tecnm.mx, guadalupe.ll@cenidet.tecnm.mx*

Abstract: La producción de biocombustibles ha cobrado gran importancia en los últimos años debido a la búsqueda de fuentes alternativas de combustibles. En este artículo se presenta la producción de bioetanol a partir del residuo agrícola de la caña (Biomasa lignocelulósica) y sus etapas que intervienen durante una configuración separada (SHF) y una configuración simultánea (SSF). En el análisis de variables del proceso se determinó gran importancia en la temperatura y pH durante el proceso de hidrólisis enzimática, durante una etapa de hidrólisis separa se pudo obtener una producción de etanol del 16 % en un volumen de 100 ml, manteniendo las condiciones de 50 °C y pH 5 siendo las condiciones óptimas reportadas y al ser manipuladas fuera del rango determinado se observa una reducción importante en el producto final, así como en una etapa simultánea cobra importancia la temperatura de operación donde se pudo obtener una producción del 15 % en volumen, usando 43° C y una reducción del tiempo de operación. A través de esta investigación se busca proponer alternativas en producción de biocombustibles y establecer las variables de interés que intervienen en el proceso, para temas de aplicación de control en estas etapas cruciales.

*Palabras clave:* Biomasa lignocelulósica, hidrólisis enzimática, fermentación, pretratamiento.

## 1. INTRODUCCION

La producción de combustibles de las últimas décadas ha sido proveniente de fuentes no renovables o fósiles para cubrir la demanda energética. Como consecuencia se tiene una sobre explotación y su uso contribuye al calentamiento global, por lo que actualmente se buscan energías alternativas y/o renovables (Willem *et al*., 2009). Debido a la problemática mencionada anteriormente, se han desarrollado investigaciones de energías alternativas que tienen un menor impacto en el medioambiente, como es la producción de biocombustibles a partir del aprovechamiento de los residuos (Manrique et al., 2015).

El principal biocombustible es el bioetanol, este es un tipo de alcohol que se obtiene por medio de la fermentación de los azúcares que contiene la materia prima (biomasa), es considerado biocombustible debido a que proviene de residuos agrícolas generalmente y por una baja emisión de $CO_2$ (Castro Martínez *et al*., 2012).

En este documento se presenta el proceso de producción de bioetanol de segunda generación, usando el bagazo de caña de azúcar en las pruebas experimentales. Dichas pruebas se realizaron para obtener las características y condiciones de operación de cada etapa (pretratamiento, hidrólisis y fermentación), así como también el análisis de las principales variables que afectan el rendimiento en el porcentaje de etanol obtenido.

## 2. PRODUCCION DE BIOETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN.

El bioetanol de segunda generación es uno de los biocombustibles con mayor alcance debido a que implica el uso de desechos agrícolas, residuos vegetales secos provenientes de podas, cascara de alimentos, entre otros. A este tipo de materia se le conoce como biomasa lignocelulósica, por su composición de hemicelulosa y lignina (estructura rígida), y celulosa (carbohidrato) el cual es fermentado para obtener bioetanol (Hernández, 2012).

### *2.1 Biomasa lignocelulósica*

El bagazo generado de la caña de azúcar es uno de los principales residuos lignocelulósicos, por cada tonelada de azúcar producida se obtiene de 0.7 a 0.3 toneladas de bagazo (Albernas *et al.*, 2016). La composición del bagazo de caña de azúcar es

 ISSN en trámite

aproximadamente 20 % de lignina, 25 % de hemicelulosa, 50 % celulosa y 5 % otros componentes. Debido a su composición no es posible acceder directamente a la celulosa debido a la fuerte protección de la lignina y hemicelulosa, por lo que se aplican pretratamientos para degradar la biomasa a azúcares fermentables (Oliva *et al*., 2004).

*2.2 Pretratamiento*

El pretratamiento ayuda a romper los enlaces de la lignocelulosa, lo que facilita la separación de celulosa, hemicelulosa y lignina entre sí. Actualmente, existen diferentes métodos de pretratamiento disponibles, como lo son el pretratamiento biológico, mecánico, químico y fisicoquímico, el objetivo del proceso de pretratamiento es facilitar la fragmentación de los polímeros lignocelulósicos, modificar la estructura y ampliar el área superficial de la biomasa para un mayor rendimiento de azúcares fermentables durante la hidrólisis enzimática.

*2.3 Hidrólisis enzimática*

La aplicación de la hidrólisis enzimática se realiza con la utilización de enzimas celulasas y hemicelulosas con el fin de descomponer carbohidratos e hidrolizar la biomasa lignocelulósica, de esta manera obtener azúcares fermentables (García, 2020).

*2.4 fermentación alcohólica*

La etapa de fermentación es la transformación de los azúcares liberados en la etapa de hidrólisis enzimática en etanol y dióxido de carbono por medio de microorganismos conocidos como levaduras.

3. PARTE EXPERIMENTAL

*3.1 Materia prima*

El bagazo de caña de azúcar usado en este trabajo fue proporcionado por el Ingenio San Francisco en Ameca, Jalisco, México. Fue secado en un horno con aire caliente a 40 °C durante 12 horas, posteriormente fue molido en un molino manual y tamizado en partículas inferiores a 5 mm (figura 1).

Fig. 1. Secado y reducción de tamaño de bagazo de caña.

*3.2 Pretratamiento con hidróxido de sodio diluido*

El pretratamiento con NaOH se realizó tomando como base las condiciones de operación y metodología de (González *et al.,* 2019), se preparó la solución añadiendo hidróxido de sodio (NaOH al 2 % p/v) en un vaso de precipitado de 1 L utilizando un volumen de agua destilada de 600 ml como se muestra en la figura 2.

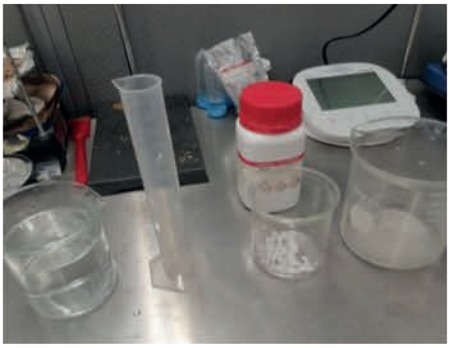


Fig. 2. Preparación de solución de 600 ml con NaOH al 2% (p/v).

La solución se colocó en un agitador magnético hasta disolver el hidróxido de sodio, posteriormente se incorporó el bagazo previamente pesado correspondiente al 4 % (p/v), la temperatura interna se elevó hasta alcanzar 97 °C la cual se censó con una sonda de acero inoxidable (figura 3). La reacción se mantuvo durante el tiempo determinado que se muestra en la tabla 1, así como las condiciones generales de la etapa de pretratamiento.

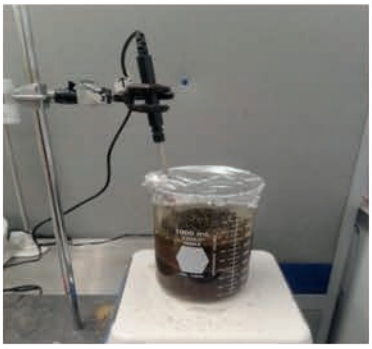


Fig. 3. Incorporación de biomasa y censado de temperatura.

**Tabla 1. Condiciones de operación utilizadas en pretratamiento**

| Volumen | Carga de bagazo de caña | Tamaño de partícula | Carga de NaOH | Temperatura | Tiempo |
|---|---|---|---|---|---|
| 600 ml | 24 g | 5 mm | 12 g | 97 °C | 90 min |

 ISSN en trámite

La biomasa pretratada fue separada con filtración al vacío utilizando un embudo büchner, Kitasato y bomba de succión (figura 4). La parte sólida fue enjuagada secuencialmente con agua destilada para eliminar rastros del reactivo usado y filtrada nuevamente, posteriormente la biomasa es colocada en un horno de secado a 40 °C durante 12 horas y reservada para la siguiente etapa de hidrólisis enzimática (figura 5).

Fig. 4. Filtrado y enjuagado de biomasa posterior al pretratamiento.

Fig. 5. Secado en horno con aire a 45 °C antes de hidrolisis enzimática.

*3.3 Hidrólisis enzimática*

La hidrólisis enzimática se realizó con una mezcla de enzimas celulasas y hemicelulosas Cellic Ctec 2 de Sigma Aldrich con una carga enzimática de 25 mg por gramo de bagazo seco pretratado, se determinó en mililitros usando la ecuación (1) donde ρ representa la densidad con valor de $1.15 mg/cm^3$ (Baral *et al*., 2019).

$$ml = \frac{mg}{(\rho * 1000)} \qquad (1)$$

El bagazo pretratado fue pesado al 5 % (p/v) y se añadió en un matraz de 250 ml, usando un volumen de 200 ml, inicialmente con agua destilada y después utilizando una solución buffer para mantener las condiciones de pH (Figura 6) sin variación hasta el término del tiempo establecido. Las condiciones de operación fueron determinadas (tabla 2) empleando la hoja de datos de las enzimas comerciales, ya que establece un rango óptimo de pH, temperatura y tiempo para la liberación de azúcares fermentables.

Fig. 6. Acondicionamiento de pH y temperatura antes de la incorporación de enzimas.

Al obtener las condiciones de pH y temperatura en la solución, se procedió a incorporar la mezcla enzimática usando una micropipeta, se muestra en la figura 7 a) y posteriormente en la figura 7 b), se observa el proceso en una cámara de incubación para mantener constante la temperatura durante el proceso.

Fig. 7. a) Incorporación de enzimas, b) hidrolisis en cámara de incubación.

**Tabla 2. Condiciones de operación en hidrolisis enzimática**

| Volumen de trabajo | Carga de bagazo pretratado | Carga enzimática | pH | Temperatura | Tiempo |
|---|---|---|---|---|---|
| 200 ml | 10 g | 217 µL | 5 | 50 °C | 72 h. |

*3.4 Fermentación alcohólica*

*3.4.1 Inoculo de levadura*

Él inoculó, se realizó en un matraz de 1000 ml con medio YPD (composición de 10 g/L de extracto de levadura, 20 g/L de peptona y 20 g/L de glucosa). Una vez preparado se esterilizó en autoclave durante 20 min a temperatura de 121 °C (figura 8).

 ISSN en trámite

La levadura utilizada es un ejemplar de *Saccharomyces 3C* la cual fue proporcionada por el Centro universitario de Ciencias Biológico-Agropecuarias (CUCBA), se inoculó tomando una muestra de levadura con micropipeta y se añadió en el matraz con medio YPD, para el crecimiento de la levadura se utilizó una incubadora a 30 °C durante 12 horas.

Fig. 8. Esterilización de medio en autoclave.

*3.4.2 Fermentación de hidrolizado*

La fermentación del hidrolizado se realizó en frascos de 150 ml, se añadió el hidrolizado resultante y una muestra del inoculo (figura 9). Posteriormente, los frascos se sellaron acondicionando para un medio anaerobio con trampa de aire para expulsar los gases producidos durante la fermentación, los frascos se mantuvieron en cámara de incubación (figura 10) con las condiciones que se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3. Condiciones de operación de fermentación alcohólica**

| Volumen de trabajo | Hidrolizado | Inoculo | Temperatura | Tiempo |
|---|---|---|---|---|
| 100 ml | 90 ml | 10 ml | 30°C | 7 días. |

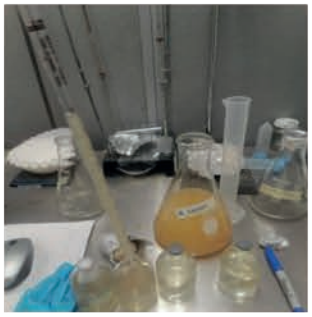


Fig. 9. Toma de muestras de hidrolizado e inoculo para fermentación alcohólica de azucares liberados.

Fig. 10. Fermentación alcohólica en cámara de incubación.

*3.5 Configuración de Sacarificación y Fermentación Simultaneas (SSF)*

Se consideró una configuración de sacarificación y fermentación simultáneas (SSF) para pruebas adicionales usando el pretratamiento con NaOH, esta configuración permite llevar a cabo la etapa de hidrólisis y fermentación en un mismo proceso, posterior al pretratamiento de la biomasa, con el fin de reducir el tiempo e instrumentación para obtener etanol.

Los experimentos se realizaron tomando la metodología de (Sinche *et al.,* 2022), se utilizó un matraz de 250 ml donde se añadió la carga de bagazo pretratado 5% (p/v) y se acondicionó en un volumen de 100 ml con solución buffer para mantener las condiciones de pH, posteriormente se añadió una carga enzimática de 18.5 µL por gramo de bagazo seco pretratado y una muestra de inoculo de levadura (figura 11).

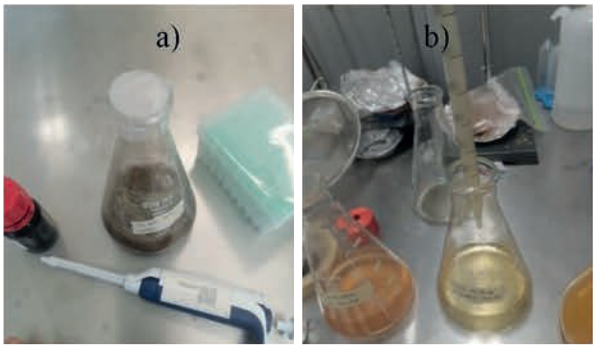



Fig. 11. a) Incorporación de carga enzimática, b) inoculo para proceso SSF.

La temperatura usada es un equilibrio entre la temperatura óptima de operación de las enzimas que es de 50 °C y la temperatura de las levaduras de 30 °C, ya que la mayoría de las levaduras no presentan características termo tolerantes. En la tabla 4 se muestra las condiciones que se mantuvieron durante el proceso de la configuración SSF, el cual se llevó a cabo en cámara de incubación y condiciones anaerobias (figura 12).

 ISSN en trámite

Fig. 12. Proceso de sacarificación y fermentación simultaneas en cámara de incubación.

**Tabla 4. Condiciones de operación de configuración SSF**

| Volumen de trabajo | Bagazo pretratado | Carga enzimática | pH | Inoculo | Temperatura | tiempo |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 100 ml | 5 g | 93 µL | 5 | 10 ml | 37 °C | 48 h |

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

*4.1 Toma de muestras de etanol producido.*

La medición del etanol obtenido posterior a la fermentación e hidrólisis y fermentación simultánea se llevó a cabo con un refractómetro de alcohol (figura 13), el cual es usado para medir el contenido en porcentaje en soluciones alcohólicas o alcoholes de todo tipo.

Fig. 13. refractómetro usado en la medición de las pruebas experimentales.

Los resultados obtenidos usando las condiciones iniciales propuestas se muestran en la tabla 5, donde se emplearon las condiciones anteriormente mencionadas en el pretratamiento, hidrólisis y fermentación. Se puede observar el cambio en el rendimiento de etanol al no utilizar una solución buffer durante la hidrólisis que ayude a controlar el pH final obteniendo un valor 4 y al usar la solución buffer que mantiene el pH deseado en 5.

**Tabla 5. Influencia de la variable pH en hidrolisis enzimática**

| Etapa | Solución | pH inicial | pH final | Porcentaje en volumen de etanol |
|---|---|---|---|---|
| Hidrolisis enzimática | Agua destilada | 5 | 4 | 9% |
| | Buffer | 5 | 5 | 15% |

*4.2. Efecto en la manipulación de variable pH en hidrolisis enzimática*

A partir de los primeros resultados obtenidos se pudo analizar que la etapa de hidrólisis necesita de una solución que controle la variable pH debido a que en esta etapa se tienen cambios que modifican el rendimiento final de etanol. Para poder determinar que esta variable afecta directamente en el producto final se propuso mantener el pH dos valores arriba y dos valores abajo, del óptimo reportado. En la tabla 6 se muestra la influencia del cambio en esta variable.

**Tabla 6. Pruebas de variable pH en hidrolisis**

| Etapa | Solución | pH inicial | pH final | Porcentaje en volumen de etanol |
|---|---|---|---|---|
| **Hidrolisis enzimática** | Buffer | 3 | 3 | 5% |
| | | 4 | 4 | 9% |
| | | 5 | 5 | 15% |
| | | 6 | 6 | 10% |
| | | 7 | 7 | 8% |

*4.3 Resultados de sacarificación y fermentación simultaneas (SSF)*

Los resultados de las pruebas aplicando la configuración SSF sobre la biomasa pretratada con NaOH se muestran en la tabla 7, comparado con los resultados del proceso de hidrólisis y fermentación separadas (SHF), uno de los principales cambios, el tiempo de operación es que se reduce de 10 a 2 días con un rendimiento 4 % menor.

 ISSN en trámite

**Tabla 7. Comparativa de proceso SHF y SSF.**

| Configuración | Tiempo | pH | Porcentaje en volumen de etanol |
|---|---|---|---|
| **SSF** | 24 horas | 5 | 11% |
| **SHF** | 10 días | 5 | 15% |

*4.4 Efecto de la variable temperatura en SSF*

El efecto de la temperatura en el proceso simultáneo es una variable que afecta fuertemente en el rendimiento de etanol obtenido, esto se muestra en la tabla 7. Debido a las condiciones óptimas de las enzimas Cellic Ctec 2 y de las levaduras utilizadas, el porcentaje de etanol muestra un incremento importante al usar una temperatura de 43 °C que esta 7° por debajo de la temperatura óptima de operación de la mezcla enzimática, por lo tanto, se tiene mayor liberación de azúcares fermentables a diferencia de la reducción de temperatura a 31 °C.

**Tabla 7. Efecto de la variable temperatura proceso SSF**

| Etapa | Temperatura | Carga enzimática | pH | Porcentaje en volumen de etanol |
|---|---|---|---|---|
| **SSF** | 31 °C | 93 µL | 5 | 9% |
| | 37 °C | 93 µL | 5 | 11% |
| | 43 °C | 93 µL | 5 | 15% |

5. CONCLUSIONES

En una configuración de etapas separas, es más fácil establecer condiciones de operación sobre las variables como son el pH y la temperatura, debido a que cada microorganismo presenta condiciones óptimas de operación y salir de rango de estas puede causar la interrupción del proceso por muerte de estos microorganismos utilizados.

Las variables ubicadas más importantes son el pH durante la conversión de la celulosa en azúcares fermentables haciendo uso de enzimas comerciales, así como la temperatura, ya que el rendimiento se ve afectado. En la fermentación la variable temperatura es relevante para garantizar un ambiente propicio para las levaduras, la cepa de la levadura *Saccharomyces 3C* presentó tolerancia al incremento de temperatura por lo que la hace una buena candidata en un proceso simultáneo y obtener rendimientos superiores en una etapa con menor tiempo de residencia e instrumentación.

Para un análisis mas completo se recomienda hacer un tratamiento estadístico en las diferentes etapas, considerando la cinética de los azucares producidos en la hidrolisis y el rendimiento de etanol en la fermentación.

REFERENCIAS

Willem P., Cooper C. Implications of fossil fuel constraints on economic growth and global warming. Energy Policy. 2009, Vol. 37(1). 166-180.

Amarís J., Manrique D., Jaramillo, J. Biocombustibles líquidos en Colombia y su impacto en motores de combustión interna. Una revisión. El Reventón Energético. 2015, 13, 23–34.

Castro C., Beltrán L., Ortiz J. Producción de Biodiesel y Bioetanol: ¿Una alternativa sustentable a la crisis energética? 2012, Ra Ximhai, 8, 93– 100.

Hernández, C. Apuesta biotecnológica: Etanol de segunda generación. Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de La Universidad Veracruzana, 2013, 26.

Albernas Y., Pedraza J., Corsano G., Rodríguez L., González, E. Primera aproximación a la cinética de la obtención de etanol mediante sacarificación y fermentación simultánea del bagazo. Afinidad: Revista de química teórica y aplicada. 2016, 73, 191-196.

Oliva D., Antolín G., Escalada L. Aproximación experimental a la combustión del bagazo de caña en lecho fluidizado. CIEMAT. 2004, 1, 2-8.

García Paniagua, A. I. (2020). Degradation of lignocellulosic material. Evaluation of chemical pretreatment and enzymatic hydrolysis for the obtaining of alcohols by fermentation. Universidad de Leon.

González A., Hernández G., Pereda I. Sugarcane bagasse alkaline pretreatment to improve biomethane production. Centro Azúcar, 2019, 46, 79-88.

Baral P., Lavika J., Kumar A., Kumar V., Agrawal D. Augmented hydrolysis of acid pretreated sugarcane bagasse by PEG 6000 addition: a case study of Cellic CTec2 with recycling and reuse. Bioprocess and Biosystems Engineering. 2020, 43, 473-482.

Sinche D., Ramírez V., Velalcazar C., Sacarificación y fermentación simultánea de la cáscara de Jatropha curcas pretratada hidrotérmicamente para producción de bioetanol, 2022, Revista UCR, 2215-2652.

 ISSN en trámite

# Análisis y diseño de un filtro LCL para inversor conectado a la red

**Ricardo Ramírez-Ocampo** *
**Gerardo Vicente Guerrero-Ramírez** * **Manuel Adam-Medina** *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N Col. Palmira 62490 Cuernavaca, Mor. México.*
*e-mail:m21ce38@cenidet.tecnm.mx*

Resumen: El propósito de este trabajo es obtener un modelo matemático de un inversor monofásico de puente completo utilizando funciones de conmutación y conectado a una carga R-L serie que permita establecer el comportamiento del mismo. Así como, analizar y diseñar un filtro LCL que permita filtrar los armónicos de alta frecuencia producidos por la conmutación de los dispositivos semiconductores, obteniendo así un filtrado de buena calidad y, en consecuencia, una buena calidad de energía.

*Keywords:* LCL filter, linear systems, modeling and simulations of power systems

## 1. INTRODUCCIÓN

La potencia eléctrica instalada en todo el mundo es alrededor de 4000 GW, de la cual, el 90 % aproximadamente se produce a través de combustibles fósiles como el carbón o gas natural (Boldea and Tutelea, 2022). Sin embargo, esta forma de producir la energía eléctrica es contaminante para el medio ambiente ya que se producen gases de efecto invernadero. Además, los combustibles fósiles no se pueden volver a utilizar, es decir, no son renovables. Como alternativa para generar energía eléctrica que sea amigable con el medio ambiente y que, además, se pueda volver a utilizar, surgen las unidades de generación distribuida basadas en energías renovables (UGD-ER), tales como, la energía solar, energía eólica, etc. Estos sistemas utilizan un inversor como interfaz entre la generación de energía eléctrica y la red eléctrica local.

El objetivo de este documento es mostrar la operación del inversor, así como el análisis y diseño del filtro LCL, el cual se utiliza para conectar el inversor con la red eléctrica. El inversor , junto con el filtro, permiten interconectar la energía renovable con la red. En el inversor se produce un voltaje de corriente alterna pero con forma de onda pulsante. Dicho voltaje contiene armónicos de alta frecuencia y no es compatible para establecer la conexión con la red en forma directa. Es por ello que se debe utilizar un filtro que posibilite obtener una forma de onda más parecida a una sinusoidal, que permita implementar el enlace con la red. El filtro tiene dos funciones fundamentales: 1) reducir los armónicos de alta frecuencia producidos por la técnica de modulación PWM, para obtener una buena calidad de energía inyectada a la red y, 2) servir de acoplamiento entre el inversor y la red eléctrica local.

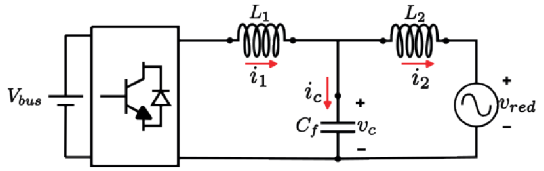



Figura 1. Inversor monofásico con filtro LCL conectado con la red eléctrica

Dos de los filtros pasivos más utilizados para interconectar con la red son el filtro L y el filtro LCL. La ventaja de utilizar los filtros LCL es que tienen un mejor desempeño de atenuación de armónicos con una inductancia equivalente menor que el filtro L (Yagnik and Solanki, 2017). Esto se traduce en un menor peso, volumen y costo que el filtro L. La figura 1 muestra el diagrama del inversor con el filtro LCL conectado a la red.

## 2. INVERSOR DE PUENTE COMPLETO

El inversor de puente completo consta de cuatro interruptores que representan dispositivos semiconductores de conmutación, tales como, el transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT por sus siglas en inglés) o, el transistor efecto de campo metal-óxido semiconductor (MOSFET por sus siglas en inglés). Dichos semiconductores de potencia conmutan para lograr obtener a la salida del inversor un voltaje de corriente alterna. Para poder analizar el inversor de la figura 2 se conectó una carga R-L serie, se utilizaron funciones de conmutación y la técnica SPWM (acrónimo de modulación por ancho de pulso sinusoidal) para la conmutación de los semiconductores de potencia.

 ISSN en trámite

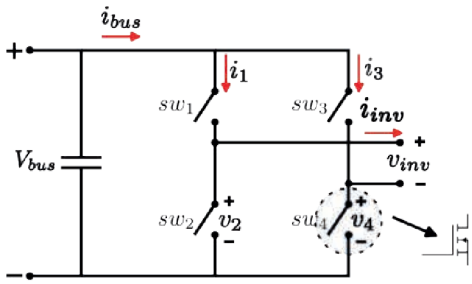



Figura 2. Inversor monofásico de puente completo

*2.1 SPWM bipolar*

Esta técnica consiste en comparar dos señales, una moduladora sinusoidal, que tiene la frecuencia fundamental de la red $f_{red}$, y una portadora triangular, que tiene la frecuencia de conmutación $f_{tri}$ con lo cual, se obtienen los pulsos que son enviados a los interruptores semiconductores de potencia. La figura 3 muestra la comparación dichas señales.

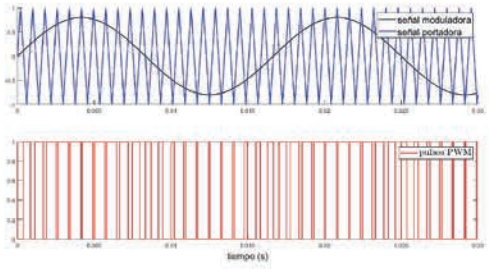



Figura 3. Comparación de la señal moduladora y portadora para SPWM bipolar

Dos parámetros importantes derivados del SPWM son el índice de modulación de frecuencia $m_f$ y el índice de modulación de amplitud $m_a$. Entre mayor sea $m_f$ mayores serán las frecuencias a las que se producen los armónicos de voltaje además, debe ser impar. $m_a$ controla la amplitud del voltaje de salida. El índice $m_a$ debe tener un valor entre 0-1 para que la salida de voltaje sea lineal Hart (2001). Las ecuaciones de $m_f$ y $m_a$ son:

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{seno}} \tag{1}$$

$$m_a = \frac{V_{tri}}{V_{seno}} \tag{2}$$

Donde: $f_{tri}$ es la frecuencia de la señal portadora. $f_{seno} = f_{red}$ es la frecuencia de la señal moduladora sinusoidal y se fija en el valor de la frecuencia del voltaje de red (60 o 50 Hz). $V_{tri}$ es la amplitud de la señal portadora y se fija en 1. $V_{seno}$ es la amplitud de la señal de referencia con dominio en [0,1].

*2.2 Modelo de inversor monofásico con funciones de conmutación*

A partir del diagrama de la figura 2, se aplican las leyes de voltaje y corriente de Kirchhoff, que permiten obtener las ecuaciones del voltaje de salida del inversor $v_{inv}$ y la corriente de la salida del inversor $i_{inv}$.

$$v_{inv} = v_2 - v_4 \tag{3}$$

$$i_{bus} = i_1 + i_3 \tag{4}$$

En las ecuaciones (3) y (4), se deben obtener los voltajes y corrientes en los dispositivos de conmutación. Para ello se utilizan las funciones de conmutación (Beristáin and Pérez, 2022). La tabla 1 describe el comportamiento de la rama que contiene a $sw_1$ y $sw_2$, con sus respectivas funciones de conmutación $s_1$ y $s_2$.

Tabla 1. Funciones de conmutación rama 1 (Beristáin and Pérez, 2022)

| $s_1$ | $s_2$ | $i_1$ | $v_2$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | $i_{inv}$ | $V_{bus}$ |
| 0 | 1 | 0 | 0 |

Analizando la tabla 1 se obtienen las ecuaciones (5) y (6) en base a las funciones de conmutación.

$$v_2 = s_1 V_{bus} \tag{5}$$

$$i_1 = s_1 i_{inv} \tag{6}$$

La tabla 2 describe el comportamiento de la rama que contiene a $sw_3$ y $sw_4$, con sus respectivas funciones de conmutación $s_3$ y $s_4$.

Tabla 2. Funciones de conmutación rama 2 (Beristáin and Pérez, 2022)

| $s_3$ | $s_4$ | $i_3$ | $v_4$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | $-i_{inv}$ | $V_{bus}$ |
| 0 | 1 | 0 | 0 |

Analizando la tabla 2 se obtienen las ecuaciones (7) y (8) en base a las funciones de conmutación.

$$v_4 = s_3 V_{bus} \tag{7}$$

$$i_3 = -s_3 i_{inv} \tag{8}$$

Sustituyendo (5) y (7) en (3) se obtiene el voltaje del inversor con funciones de conmutación:

$$v_{inv} = (s_1 - s_3) V_{bus} \tag{9}$$

Sustituyendo (6) y (8) en (4) se obtiene:

$$i_{bus} = (s_1 - s_3) i_{inv} \tag{10}$$

Se puede observar en (10) que se desconoce $i_{inv}$, la cual depende de la carga que se tenga. Para ello, se conecta una carga R-L en serie a la salida del inversor de la figura 2, esto permite obtener una ecuación diferencial que describe su comportamiento. La figura 3 muestra el circuito equivalente del inversor con una carga R-L serie.

Aplicando LVK a la figura 4 se obtiene:

$$v_L = v_{inv} - v_R \tag{11}$$

Donde $v_L = L\dfrac{di_L}{dt}$; $v_R = i_R R$; $i_{inv} = i_L = i_R$

 ISSN en trámite

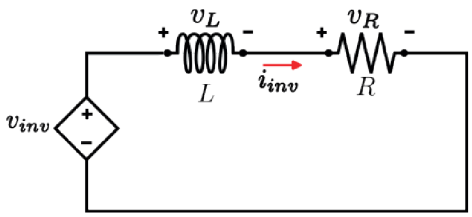



Figura 4. Circuito equivalente con carga R-L serie

Sustituyendo los valores de los voltajes en (11) se obtiene la ecuación diferencial que describe a $i_{inv}$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(s_1 - s_3)V_{bus} - \frac{R}{L}i_L \tag{12}$$

Finalmente, las funciones $s_1$ y $s_3$ se obtienen del SPWM anteriormente descrito.

## 3. ANÁLISIS DEL FILTRO LCL

### *3.1 Modelo matemático del filtro LCL*

Del diagrama de la figura 1 se puede obtener su circuito equivalente, el cual, se observa en la figura 5. Se hacen la siguientes consideraciones: 1) Las resistencias asociadas a los inductores se descartan debido a que, la reactancia inductiva es mucho mayor que las resistencias debidas al conductor. 2) La red eléctrica se considera como una fuente de voltaje ideal, es decir, la impedancia de red es igual a cero (Mejía Ruiz et al., 2015).

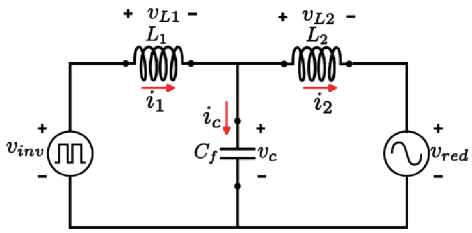



Figura 5. Circuito equivalente del filtro LCL

Aplicando LCK al nodo superior de la figura 5 se tiene:

$$i_1 = i_c + i_2 \tag{13}$$

Aplicando LVK a la primera malla de la figura 5 se tiene:

$$v_{inv} = v_{L1} + v_c \tag{14}$$

Aplicando LVK a la segunda malla de la figura 5 se tiene:

$$v_c = v_{L2} + v_{red} \tag{15}$$

El voltaje en los inductores $L_1$ y $L_2$ respectivamente es:

$$v_{L1} = L_1\frac{di_1}{dt} \qquad v_{L2} = L_2\frac{di_2}{dt} \tag{16}$$

La corriente en el capacitor $C_f$ es:

$$i_c = C_f\frac{dv_c}{dt} \tag{17}$$

Finalmente, considerando que $v_{red}$ es una variable que no es relevante para el control del filtro, se puede omitir y,

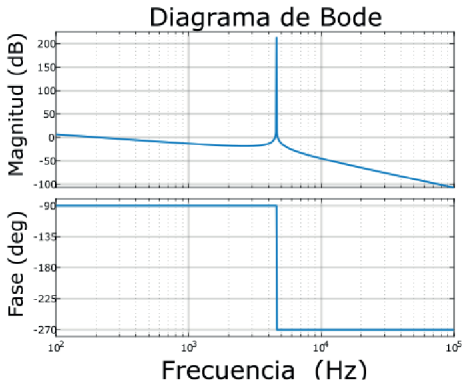



Figura 6. Diagrama de Bode del filtro LCL

haciendo las manipulaciones necesarias en las ecuaciones de la (13) a la (17), se obtiene una ecuación diferencial en función de $i_2$ y $v_{inv}$.

$$v_{inv} = L_1L_2C_f\frac{d^3i_2}{dt^3} + (L_1 + L_2)\frac{di_2}{dt} \tag{18}$$

Al aplicar transformada de Laplace en la ecuación (18), con condiciones iniciales igual a cero y, estableciendo una relación entre la variable de salida $I_2$ y la variable de entrada $V_{inv}$, se obtiene la función de transferencia de filtro LCL.

$$G(s) = \frac{I_2}{V_{inv}} = \frac{1}{L_1L_2C_fs^3 + (L_1 + L_2)s} \tag{19}$$

El polinomio característico en (19) nos permite encontrar los polos del sistema. Se tienen tres polos, uno en el origen y otros dos sobre el plano imaginario por lo cual se trata de un sistema críticamente estable. El la figura 6 se observa el diagrama de Bode del filtro. En la frecuencia de resonancia, el filtro presenta un pico de resonancia el cual debe ser atenuado para evitar inestabilidad del sistema (Portana, 2010).

Para calcular la frecuencia de resonancia se utiliza la formula 20. Donde $\omega_r$ está en rad/s y $f_r$ está en Hz.

$$\omega_r = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1L_2C_f}} \qquad f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} \tag{20}$$

### *3.2 Amortiguamiento pasivo*

Consiste en colocar elementos resistivos en el esquema del filtro con el fin de eliminar o atenuar el pico de resonancia. De acuerdo a (Ruan, Wang, Pan, Yang, Li, and Bao, 2018) el mejor lugar para colocar la resistencia de amortiguamiento $R_D$, es en serie con el capacitor del filtro $C_f$, tal como se muestra en la figura 7.

De acuerdo a (Mejía Ruiz, Muñoz, and Cano, 2015) para calcular el valor de $R_D$ se utiliza la siguiente ecuación:

$$R_D = \frac{1}{3}X_c = \frac{1}{3}\left(\frac{1}{\omega_rC_f}\right) \tag{21}$$

 ISSN en trámite

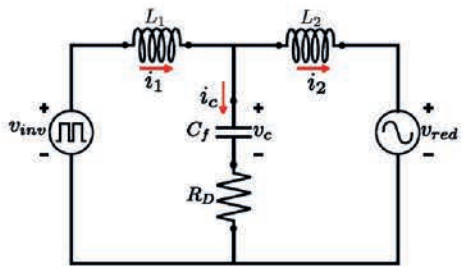



Figura 7. Amortiguamiento pasivo

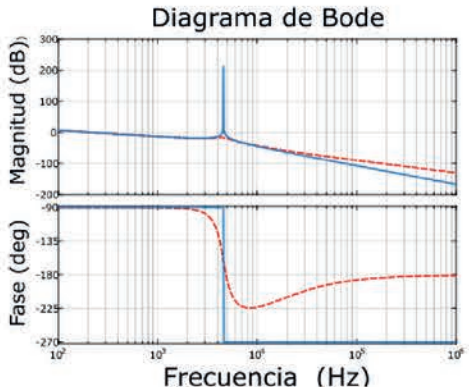



Figura 8. Comparación del filtro amortiguado (línea roja) y no amortiguado (línea azul)

Donde: $X_c$ es la reactancia capacitiva a la frecuencia de resonancia $\omega_r$

La función de transferencia del circuito de la figura 7 se muestra en la ecuación (22). En la figura 8 se hace una comparación del filtro sin amortiguamiento y con amortiguamiento. Como se puede observar el resistor de amortiguamiento atenúa el pico de resonancia, sin embargo, el filtro con amortiguamiento presenta una reducción en su capacidad de filtrado de armónicos de alta frecuencia.

$$G_1 = \frac{C_f R_D s + 1}{L_1 L_2 C_f s^3 + (L_1 + L_2) R_D C_f s^2 + (L_1 + L_2) s} \tag{22}$$

## 4. DISEÑO DEL FILTRO

Altos valores de las inductancias $L_1$ y $L_2$ proporcionan niveles muy bajos de armónicos de alta frecuencia a la salida del filtro. No obstante, los inductores con alto valor tienen un mayor peso, volumen y costo. Por esta razón, los inductores deben diseñarse en base a un compromiso entre una buena reducción de armónicos, pero con un tamaño y costo del filtro que no sea muy elevado.

### *4.1 Inductancia total*

La caída de voltaje fundamental a través del filtro, debe ser menor que el 10 % del voltaje de red. Además, si se tiene una inductancia total $L_T$ grande, se debe tener un mayor voltaje de bus de entrada de CD para poder asegurar la controlabilidad de la corriente, generando con ello muchas pérdidas de conmutación (Han et al., 2019). Por tales razones, en el diseño del filtro, se debe considerar la inductancia total en base a la ecuación (23).

$$L_T \leq 0{,}1 \frac{V_{red}^2}{2\pi f_{red} P_o} \tag{23}$$

Donde: $V_{red}$ es el voltaje nominal de red, $f_{red}$ es la frecuencia de red (60 o 50 Hz) y $P_o$ es la potencia activa.

### *4.2 Diseño del inductor del lado de la red*

El valor de la inductancia del lado de la red $L_1$ se obtiene a partir de la ecuación (24). Se debe elegir un valor mayor del obtenido con la fórmula (24).

$$L_1 = \frac{V_{bus}}{r \lambda_{cL_1} I_1 f_{tri}} \tag{24}$$

Donde: $V_{bus}$ es el voltaje del bus de entrada de CD, $r$ tiene un valor de 2 si se utiliza SPWM bipolar y 8 si se utiliza SPWM unipolar, $\lambda_{cL_1}$ es el coeficiente de rizado de corriente y se establece entre 20 %-30 %. $I_1$ es el valor RMS de la corriente del inversor y $f_{tri}$ es la frecuencia de conmutación.

### *4.3 Diseño del capacitor*

El capacitor introduce potencia reactiva al sistema. Entre mayor sea el valor del capacitor mayor será la potencia reactiva. Esta condición aumenta las pérdidas en los dispositivos semiconductores de conmutación (Ruan et al., 2018). Para calcular el valor del capacitor se establece una relación $\lambda_c$ entre la potencia reactiva introducida y la potencia activa del sistema. El valor del capacitor se calcula con la ecuación (25). $\lambda_c$ se establece en 5 %. Se debe elegir un valor menor que el obtenido en la fórmula (25).

$$C = \lambda_c \frac{P_o}{\omega_{red} V_{red}^2} \tag{25}$$

### *4.4 Diseño del inductor del lado de inversor*

Para lograr un buen desempeño cuidando el tamaño, peso y el costo del filtro de acuerdo a (Mejía Ruiz et al., 2015), el valor aproximado del inductor del lado de la red $L_2$ se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\frac{1}{10} L_1 \leq L_2 \leq \frac{1}{5} L_1 \tag{26}$$

Una vez calculadas las inductancias se debe comprobar que $L_1 + L_2 \leq L_T$

Por último, se debe verificar que $f_r$ cumpla con la siguiente ecuación.

$$10 f_{red} < f_r < \frac{1}{2} f_{tri} \tag{27}$$

 ISSN en trámite

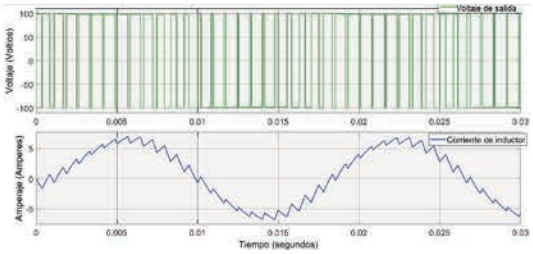



Figura 9. Formas de onda de voltaje y corrientes de salida

## 5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

### *5.1 Simulación del inversor con funciones de conmutación*

Para la simulación del inversor monofásico de puente completo con carga R-L serie se consideran los parámetros que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del inversor monofásico con carga R-L serie

| Parámetro | Símbolo | Valor |
|---|---|---|
| Voltaje de entrada | $V_{bus}$ | 100 V |
| Frecuencia de conmutación | $f_{tri}$ | 1260Hz |
| Frecuencia de red | $f_{seno} = f_{tri}$ | 60 Hz |
| Inductor | $L$ | 20 mH |
| Resistor | $R$ | 10 $\Omega$ |
| Índice de modulación de frecuencia | $m_f$ | 21 |
| Índice de modulación de amplitud | $m_a$ | 0.8 |

En la figura 9 se muestran las formas de onda de la corriente y voltaje de salida del inversor con carga R-L serie las cuales coinciden con la referencia (Hart, 2001).

### *5.2 Simulación del filtro LCL*

Para validar el método expuesto en este trabajo, se considera un inversor monofásico con filtro LCL conectado a la red controlado por un SPWM bipolar, con las siguientes especificaciones: El voltaje del bus de entrada de CD $V_{bus}$ es de 360V, la potencia activa nominal $P_o$ es de 6kW, la frecuencia de conmutación $f_{tri}$ es de 10.05KHz, la frecuencia de red $f_{red}$ es de 50Hz y el Voltaje rms de red $V_{red}$ es de 220V.

Con los datos anteriormente mostrados y, aplicando las fórmulas de la 23 a la 26 se obtienen los parámetros de la tabla 4. Por último, considerando un factor de potencia unitario, el valor fundamental rms $I_1$ se puede calcular como sigue:

$$I_1 = \sqrt{(2\pi f_{tri} C_f V_{red})^2 + (I_2)^2} = 27{,}27A \qquad (28)$$

Donde: $I_1$ es la corriente rms del inversor, $V_{red}$ es el valor rms del voltaje de red e $I_2$ es la corriente rms de salida del inversor.

En la figura 10 se muestra el comportamiento de la corriente de inversor $i_1$ y la corriente de salida $i_2$ del filtro sin amortiguamiento. Se puede observar una clara

Tabla 4. Parámetros del inversor monofásico con filtro LCL

| Parámetro | Símbolo | Valor |
|---|---|---|
| Voltaje de entrada | $V_{bus}$ | 360 V |
| Frecuencia de conmutación | $f_{tri}$ | 10050Hz |
| Voltaje rms de red | $V_{red}$ | 220 V |
| Inductor del lado del inversor | $L_1$ | 2300$\mu$H |
| Potencia activa del inversor | $P_o$ | 6kW |
| Capacitor del filtro | $C_f$ | 10$\mu$F |
| Frecuencia fundamental de red | $f_{red}$ | 50Hz |
| Inductor del lado de la red | $L_2$ | 230$\mu$H |

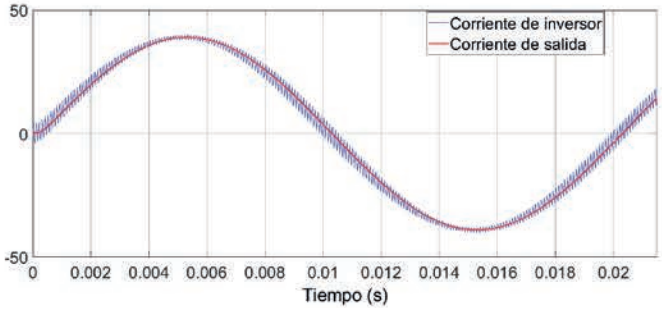
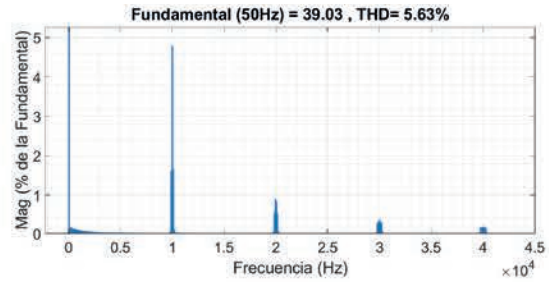
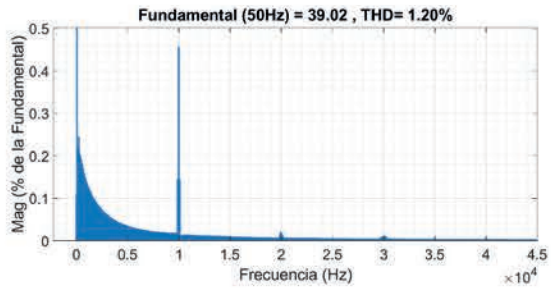



Figura 10. Formas de onda de corrientes $i_1$ e $i_2$

disminución de los armónicos en la corriente $i_2$. En la figura 11 se muestra el contenido armónico total (THD por sus sigles en inglés) de $i_1$ e $i_2$. Sus respectivos THD son 5.63 % y 1.2 % lo cual confirma la disminución de armónicos a la salida del filtro.




(a)

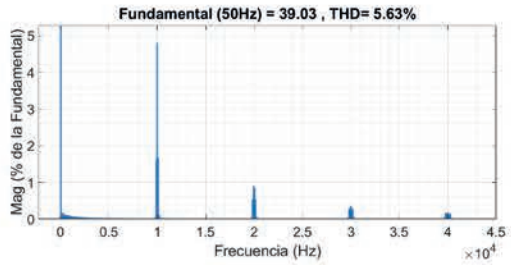



(b)

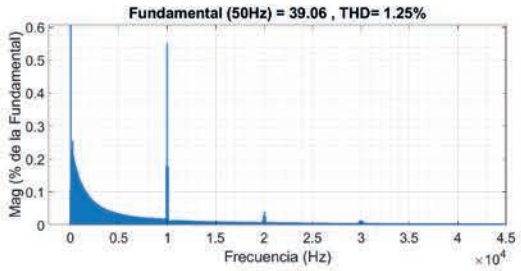
Figura 11. Contenido armonico total de $i_1$ (a) e $i_2$ (b)

La figura 12 muestra el THD de $i_2$ del filtro sin amortiguamiento y con amortiguamiento donde $R_D$ tiene un valor de 1.3 $\Omega$. El THD de la corriente de salida del filtro

 ISSN en trámite




(a)




(b)

Figura 12. Contenido armónico total de $i_2$ sin amortiguamiento(a) y con amortiguamiento(b)

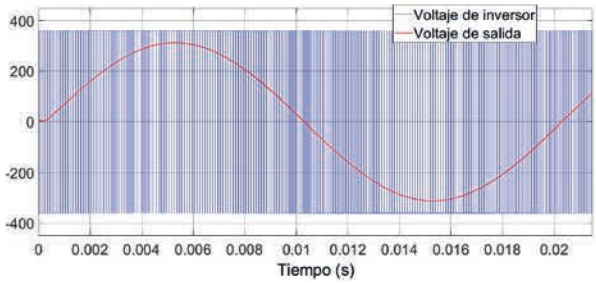


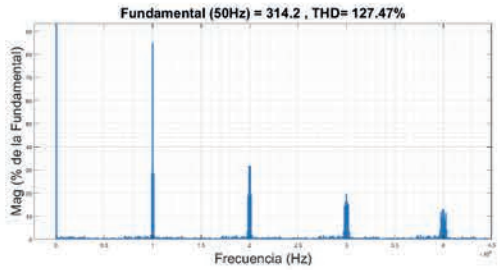

Figura 13. Formas de onda de voltajes

amortiguado (figura 12b) es de 1.25 % lo cual comprueba la disminución de la capacidad de filtrado.

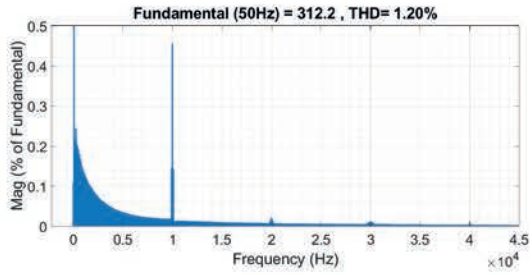
En la figura 13 se muestran el voltaje del inversor antes del filtrado (línea azul) y después del filtrado (línea roja).

## 6. CONCLUSIÓN

El modelo matemático del inversor utilizando funciones de conmutación sirven para obtener un comportamiento casi similar al circuito original. El filtro LCL diseñado con el método aplicado en este documento, cumple con los estándares que se requieren para conectar el inversor a la red. Al aplicar el amortiguamiento pasivo al filtro, se nota una reducción en la capacidad de atenuación del filtro. Sin embargo, al comparar las figuras 12a y 12b, se observa que el contenido armónico total de la corriente $i_2$ no aumenta considerablemente y sigue cumpliendo los estándares. Por último mencionar que, el tema aquí expuesto, si bien está ampliamente documentado, es importante analizarlo para lograr una exitosa interconexión con la red.




(a)




(b)

Figura 14. Contenido armónico total del voltaje antes del filtrado (a) y después del filtrado (b)

## REFERENCIAS

Beristáin, J.A. and Pérez, J. (2022). Convertidor bidireccional cd-ca trifásico con aislamiento en alta frecuencia: modelo utilizando funciones de conmutación. *Revista Iberiamericana de Automática e Informático Industrial*, 201–204.

Boldea, I. and Tutelea, L.N. (2022). *Electric Machines*.

Han, Y., Yang, M., Li, H., Yang, P., Xu, L., Coelho, E.A.A., and Guerrero, J.M. (2019). Modeling and stability analysis of *lcl* -type grid-connected inverters: A comprehensive overview. *IEEE Access*, 7, 114975–115001. doi:10.1109/ACCESS.2019.2935806.

Hart, D.W. (2001). *Electrónica de potencia*. Prentice Hall, Madrid.

Mejía Ruiz, G.E., Muñoz, N., and Cano, J.B. (2015). Modeling, analysis and design procedure of lcl filter for grid connected converters. In *2015 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, 1–6. doi:10.1109/PEPQA.2015.7168215.

Portana, M.N. (2010). *Diseño de filtros de acoplamiento para convertidores en fuente de tensión: aplicaciones en la calidad de onda*. Universidad de Sevilla, Sevilla.

Ruan, X., Wang, X., Pan, D., Yang, D., Li, W., and Bao, C. (2018). *Control techniques for LCL-Type Grid-Connected Inverters*. Sprinter, China.

Yagnik, U.P. and Solanki, M.D. (2017). Comparison of l lc & lcl filter for grid connected converter. 455–458. doi:10.1109/ICOEI.2017.8300968.

 ISSN en trámite

# Estrategia de Detección y Localización de Fallas en convertidores tipo Boost Basado en Espacio de Paridad

**Fernando Alvarado Bello** * **Gloria Lilia Osorio Gordillo** *
**Rodolfo Amalio Vargas Méndez** * **Luis Gerardo Vela Valdés** *
**Gerardo Vicente Guerrero Ramírez** *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México. m20ce071@cenidet.tecnm.mx*

Resumen En este artículo se presenta un esquema de detección y localización de fallas en actuadores y sensores basado en el modelo para un convertidor CD-CD tipo boost, cuya representación matemática considera las resistencias parásitas del inductor y capacitor. La generación de residuos se obtiene utilizando la técnica espacio de paridad, ya que permite generar una tabla de firmas estructurada para lograr detectar y localizar fallas.

*Keywords:* Convertidor CD-CD, espacio de paridad, detección y localización de fallas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los convertidores de potencia tienen una amplia gama de aplicaciones, desde algunas operaciones domésticas hasta industriales. Los convertidores son cada vez más complejos y cuentan con más elementos, lo cual aumenta la posibilidad de alguna falla en un componente.

Una falla consiste en una desviación de una propiedad característica de un sistema con respecto a las condiciones usuales y estándar de operación Verde (2013). Hay muchos factores que pueden provocar una falla en convertidores: defectos de fabricación, condiciones ambientales adversas, envejecimiento, estrés por alto voltaje, fallas de aislamiento, fallas de interconexión, desgaste mecánico, vibraciones y golpes (Poon et al., 2017; Wang et al., 2012).

Existen diversos métodos para la detección de fallas, ya sea por redundancia física o por medio de redundancia analítica. En la literatura se puede hallar numerosas publicaciones sobre el diagnóstico de fallas para sistemas dinámicos, donde el concepto general se puede aplicar en los convertidores. En algunos estudios se centran en un componente en específico como es el caso de Kurtz et al. (2019) que estudia la falla del capacitor. En Poon et al. (2017) se presenta un método para el pronóstico de fallas utilizando un enfoque adaptable de identificación de parámetros.

En este trabajo se realiza un esquema de detección y localización de fallas en actuadores y sensores basado en el modelo, como caso de estudio se tiene un convertidor tipo boost diseñado para aplicaciones de baja potencia.

## 2. CONVERTIDOR BOOST

Los convertidores CD-CD son circuitos que controlan la carga y descarga de energía en sus componentes, obteniendo como resultado un cambio en el nivel de tensión en sus salidas, dependiendo de su configuración. El convertidor boost proporciona un voltaje mayor al de su entrada, el convertidor tiene un interruptor que actúa como un conmutador controlado, cuando el interruptor se cierra durante un tiempo ($t_{on}$), la corriente en el inductor se eleva incrementando así la energía en el inductor y cuando el interruptor está abierto ($t_{off}$), la energía que se había almacenado en el inductor ahora es transferida a la carga por medio del diodo (Samosir et al., 2021).

En la Figura 1 se muestra el circuito del convertidor tipo boost considerando sus resistencias parásitas.

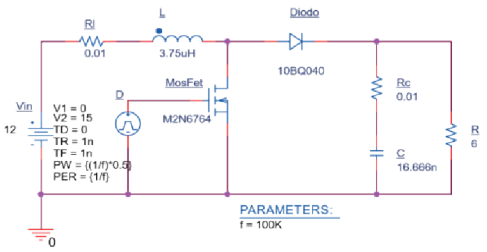



Figura 1. Circuito del convertidor Boost

 ISSN en trámite

En la Tabla 1 se detallan los valores de sus componentes.

Tabla 1. Parámetros del convertidor

| Simbología | Descripción | Valores |
|---|---|---|
| $V_{in}$ | Voltaje de entrada | 12 $V$ |
| $R_L$ | Resistencia parásita del inductor | 0.01 $\Omega$ |
| $L$ | Inductor | 3.75 $\mu H$ |
| MOSFET | Interruptor del convertidor | |
| $R_C$ | Resistencia parásita del capacitor | 0.01 $\Omega$ |
| $D$ | 1=$t_{on}$; 0=$t_{off}$ | 1-0 |
| $C$ | Capacitor | 16.666 $nF$ |
| $R$ | Resistencia de carga | 6 $\Omega$ |
| $f$ | Frecuencia de conmutación | 100 $kHz$ |

### *2.1 Modelo del convertidor*

El modelado matemático del convertidor Boost se realiza asumiendo que éste trabaja en modo conducción continua, definiendo dos condiciones de operación: cuando el interruptor conduce ($t_{on}$) y cuando este no conduce o está abierto ($t_{off}$) (Delgado-Campos, 2021; Hart, 2021; Colmenarez et al., 2012).

En la Figura 2 se muestra el circuito equivalente cuando el interruptor está cerrado.

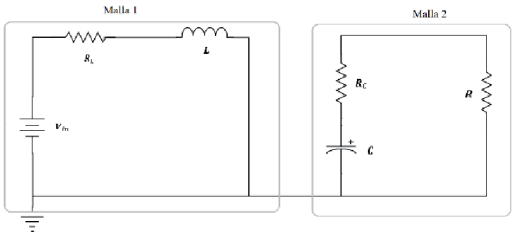



Figura 2. Circuito equivalente en $t_{on}$.

Utilizando las leyes de Kirchoff en el análisis se obtiene la ecuación (1)

$$-V_{in} + R_L\, i_L + L\,\frac{di_L}{dt} = 0 \tag{1}$$

donde $V_{in}$ es el voltaje de entrada, $R_L$ es la resistencia parásita en el inductor, $i_L$ es la corriente en el inductor y $L$ es el inductor.

Para la segunda malla se obtiene la siguiente ecuación

$$C\,\frac{dv_C}{dt} + \frac{R}{R\,(R+R_C)}\,v_C = 0 \tag{2}$$

donde $v_C$ es el voltaje en el capacitor, $R$ es la resistencia de carga, $R_c$ es la resistencia parásita del capacitor, $C$ es el capacitor.

Para el tiempo de apagado del interruptor ($t_{off}$) se tiene el circuito de la Figura 3.

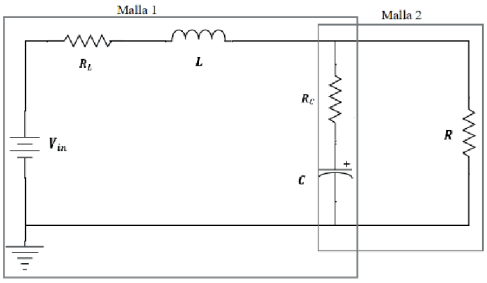



Figura 3. Circuito equivalente en $t_{off}$

Analizando la malla 1 se obtiene la siguiente ecuación:

$$-V_{in} + R_L\, i_L + L\,\frac{di_L}{dt} + \frac{R_C\, R}{(R+R_C)}\, i_L + \ldots$$
$$\frac{R}{(R+R_C)}\, v_C = 0 \tag{3}$$

Para segunda malla el análisis nos proporciona

$$C\,\frac{dv_C}{dt} = \frac{R}{(R+R_C)}\, i_L - \frac{1}{(R+R_C)}\, v_C \tag{4}$$

Una vez que se tienen las ecuaciones de las mallas cuando $D = 0$ durante el tiempo no conducción del interruptor y $D = 1$ durante el tiempo de conducción, se procede a formar la representación en espacio de estado.

$$\frac{dx}{dt} = A\,x + B\,u$$
$$y = C\,x$$

donde $x = \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix}$.

Considerando las ecuaciones (1-4) de las mallas en ambos tiempos, se unifican las dos configuraciones en una sola representación matricial, obteniendo entonces:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}\left[R_L + \frac{(1-D)\,R\,R_C}{R+R_C}\right] & -\frac{R(1-D)}{L(R+R_C)} \\ \frac{R\,(1-D)}{C\,(R+R_C)} & -\frac{1}{C\,(R+R_C)} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

La matriz $C$ considera que las salidas son $i_L$ y $v_C$, siendo entonces su forma matricial la siguiente:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

Entonces el modelo obtenido en espacio de estado del convertidor queda expresado de la siguiente manera:

 ISSN en trámite

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}\left[R_L + \frac{(1-D)\ R\ R_C}{R+R_C}\right] & -\frac{R(1-D)}{L(R+R_C)} \\ \frac{R\ (1-D)}{C\ (R+R_C)} & -\frac{1}{C\ (R+R_C)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{in} \tag{8}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \tag{9}$$

Este modelo considera las resistencias parásitas del inductor y del capacitor, cuenta con 2 variables de estado $(i_L, v_C)$ y 1 entrada $(V_{in})$.

## 3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

El diagnóstico de fallas se refiere a la detección y localización de fallas, al tener conocimiento de la presencia de una falla es de suma importancia conocer en dónde está la falla, para su corrección de inmediato. En general el diagnóstico de fallas se puede resumir en dos pasos Verde (2013).

**Generación de residuos**: Este paso consiste en obtener señales que contengan información de la falla, los residuos deben tener valor de cero cuando no exista una falla y diferente de cero en la presencia de la falla.

**Evaluación de residuos**: Consiste en extracción de información de los residuos, nos permitirá conocer el tiempo de aparición de la falla y cuál elemento presenta una falla.

## 4. GENERACIÓN DE RESIDUOS

Para la generación de residuos en este artículo se usa la redundancia analítica. Existen diversos métodos dentro de la redundancia analítica para la generación de residuos como: filtros detectores, estimación paramétrica y espacio de paridad Verde (2013); Alcorta-García (2001), por mencionar algunos.

### *4.1 Espacio de paridad*

Tomando como base la información mostrada en Isermann (2005). La palabra espacio de paridad significa equivalencia o igualdad, es un método aplicable para detección de fallas en actuadores y sensores, se puede trabajar con una función de transferencia o con modelos en espacio de estado, este método de generación de residuos es sensible a errores numéricos lo que hace que responda a fallas aditivas.

Sea el modelo lineal de espacio de estado de un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas descrito por

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Lf \\ y &= Cx + Mf \end{aligned} \tag{10}$$

donde $f$ es el vector de fallas que puede estar compuesto de fallas aditivas $f_a$ en la entrada y en la salida $f_s$.

$$f^T = \left[\, f_s^T \ \ f_a^T \,\right]$$

sustituyendo de la ecuación (10) $\dot{x}$ en $\dot{y}$ se obtiene

$$\begin{aligned} \dot{y} &= C\dot{x} + M\dot{f} \\ &= C\ Ax + C\ Bu + C\ Lf + M\ \dot{f} \end{aligned}$$

la segunda derivada sería

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= C\ddot{x} + M\ddot{f} \\ &= C\ A^2x + C\ A\ Bu + C\ B\dot{u} + \\ &\quad C\ A\ Lf + C\ L\ \dot{f} + M\ddot{f} \end{aligned}$$

De esta manera se genera una redundancia en las ecuaciones en un instante $t$. Al incrementar el número de derivadas de $y$ se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones

$$Y = T\ x + Q_u\ U + Q_f\ F \tag{11}$$

donde

$$Y = \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \vdots \\ y^{(q)} \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \\ \vdots \\ u^{(q)} \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} f \\ \dot{f} \\ \vdots \\ f^{(q)} \end{bmatrix}$$

y

$$T = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^q \end{bmatrix}, Q_u = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CB & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ CA^{q-1}B & CA^{q-2}B & \cdots & CB & 0 \end{bmatrix},$$

$$Q_f = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CL & M & 0 & \cdots & 0 \\ CAL & CL & M & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ CA^{q-1}L & CA^{q-2}L & \cdots & CL & M \end{bmatrix}$$

siendo $q$ el orden de la derivada.

Multiplicando la ecuación (11) por un vector $w^T$ obtenemos

$$w^TY = w^TTx + w^TQ_uU + W^TQ_fF \tag{12}$$

se selecciona $w^T$ tal que

$$w^TT = 0 \tag{13}$$

de forma que se obtiene el siguiente vector de residuos

$$r = w^TY - W^TQ_uU \tag{14}$$

Mediante (13) se puede determinar una parte de los elementos de $w^T$ acorde al orden de $T$ y $Q_u$. El resto de elementos puede ser usado para diseñar diferentes ecuaciones de paridad. Reemplazando (12) en (14) se obtiene la forma interna de la ecuación de paridad

$$r = w^TQ_fF$$

lo que muestra que el residuo es afectado por la falla $F$. Si (13) es verificada, el residuo es independiente de los estados $x$.

 ISSN en trámite

## 5. DISEÑO DE LAS ECUACIONES DE PARIDAD

Partiendo de la ecuación (8) del modelo del convertidor se obtienen las ecuaciones de cada variable de estado: $i_L, v_C$.

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}\left[R_L + \frac{(1-D)\,R\,R_C}{R+R_C}\right] i_L - \ldots \left[\frac{R\,(1-D)}{L\,(R+R_C)}\right] v_C + \frac{1}{L}\,V_{in} \tag{15}$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \left[\frac{R\,(1-D)}{C\,(R+R_C)}\right] i_L - \left[\frac{1}{C\,(R+R_C)}\right] v_C \tag{16}$$

Pasando las ecuaciones (15, 16) al dominio de la frecuencia considerando condiciones iniciales igual a cero se obtiene

$$s\,i_L(s) = -\frac{1}{L}\left[R_L + \frac{(1-D)\,R\,R_C}{R+R_C}\right] i_L(s) - \left[\frac{R\,(1-D)}{L\,(R+R_C)}\right] v_C(s) + \frac{1}{L}\,V_{in}(s) \tag{17}$$

$$s\,v_C(s) = \left[\frac{R\,(1-D)}{C\,(R+R_C)}\right] i_L(s) - \left[\frac{1}{C\,(R+R_C)}\right] v_C(s) \tag{18}$$

Los residuos pueden ser formulados como una expresión de error, al igualar a cero las ecuaciones (17) y (18) y agrupando los términos comunes

$$0 = s\,i_L(s) + \frac{1}{L}\left[R_L + \frac{(1-D)\,R\,R_C}{R+R_C}\right] i_L(s) + \left[\frac{R\,(1-D)}{L\,(R+R_C)}\right] v_C(s) - \frac{1}{L}\,V_{in}(s) \tag{19}$$

$$0 = s\,v_C(s) - \left[\frac{R\,(1-D)}{C\,(R+R_C)}\right] i_L(s) + \left[\frac{1}{C\,(R+R_C)}\right] v_C(s) \tag{20}$$

en notación vectorial se puede obtener

$$\begin{bmatrix}0\\0\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s + \frac{1}{L}\left[R_L + \frac{(1-D)\,R\,R_C}{R+R_C}\right] \\ -\frac{R\,(1-D)}{C\,(R+R_C)} \end{bmatrix} i_L(s) + \begin{bmatrix} \frac{R\,(1-D)}{L\,(R+R_C)} \\ s + \frac{1}{C\,(R+R_C)} \end{bmatrix} v_C(s) + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{in}(s) \tag{21}$$

Para generar residuos **estructurados** ($r(s)$) a partir de la ecuación (21), es necesario obtener una matriz generadora de residuos $W(s)$. Los residuos estructurados permiten obtener patrones de aislamiento en los residuos, de forma que la falla pueda ser localizada.

Se define una matriz generadora de residuos $W(s)$ como

$$W(s) = \begin{bmatrix} w^T_{V_{in}(s)} \\ w^T_{i_L}(s) \\ w^T_{v_C}(s) \end{bmatrix} \tag{22}$$

La independencia de las salidas $i_L$, $v_C$ y la entrada $V_{in}$ puede ser obtenida definiendo

$$w^T_{V_{in}}(s) = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \tag{23}$$

$$w^T_{i_L}(s) = \begin{bmatrix} \frac{R\,(1-D)}{C\,(R+R_C)} & s + \frac{1}{L}\left[R_L + \frac{(1-D)\,R\,R_C}{R+R_C}\right] \end{bmatrix} \tag{24}$$

$$w^T_{v_C}(s) = \begin{bmatrix} s + \frac{1}{C\,(R+R_C)} & -\frac{R(1-D)}{L(R+R_C)} \end{bmatrix} \tag{25}$$

tal que

$$w^T_{V_{in}}(s) \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \tag{26}$$

$$w^T_{i_L}(s) \begin{bmatrix} s + \frac{1}{L}\left[R_L + \frac{(1-D)\,R\,R_C}{R+R_C}\right] \\ -\frac{R\,(1-D)}{C\,(R+R_C)} \end{bmatrix} = 0 \tag{27}$$

$$w^T_{v_C}(s) \begin{bmatrix} \frac{R\,(1-D)}{L\,(R+R_C)} \\ s + \frac{1}{C\,(R+R_C)} \end{bmatrix} = 0 \tag{28}$$

A partir de la ecuación (22), podemos escribir la matriz $W(s)$ como

$$W(s) = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{R\,(1-D)}{C\,(R+R_C)} & s + \frac{1}{L}\left[R_L + \frac{(1-D)\,R\,R_C}{R+R_C}\right] \\ s + \frac{1}{C\,(R+R_C)} & -\frac{R(1-D)}{L(R+R_C)} \end{bmatrix} \tag{29}$$

La matriz $W(s)$ no es única, una forma de definirla es a partir del espacio nulo de $T$, es decir $TW = 0$, siendo $T$ para este caso:

$$T = [\Lambda_1\ \Lambda_2\ \Lambda_3] \tag{30}$$

donde

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{31}$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} s + \frac{1}{L}\left[R_L + \frac{(1-D)\,R\,R_C}{R+R_C}\right] \\ -\frac{R\,(1-D)}{C\,(R+R_C)} \end{bmatrix} \tag{32}$$

$$\Lambda_3 = \begin{bmatrix} \frac{R\,(1-D)}{L\,(R+R_C)} \\ s + \frac{1}{C\,(R+R_C)} \end{bmatrix} \tag{33}$$

Para obtener los residuos se multiplica la matriz $W(s)$ por la expresión vectorial (21), obteniendo:

$$r(s) = W(s)\left(\begin{bmatrix} s + \frac{1}{L}\left[R_L + \frac{(1-D)\,R\,R_C}{R+R_C}\right] \\ -\frac{R\,(1-D)}{C\,(R+R_C)} \end{bmatrix} i_L(s) + \begin{bmatrix} \frac{R\,(1-D)}{L\,(R+R_C)} \\ s + \frac{1}{C\,(R+R_C)} \end{bmatrix} v_C(s) + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{in}(s)\right) \tag{34}$$

 ISSN en trámite

Realizando las operaciones de la ecuación (34) se obtienen las ecuaciones de los tres residuos en dominio de la frecuencia, posteriormente se vuelven a expresar en dominio del tiempo

$$r_1 = \frac{R\,(1-D)}{LC\,(R+R_C)}i_L - \frac{1}{L}\dot{v}_C - \frac{1}{L\,C\,(R+R_C)}\,v_C \quad (35)$$

$$r_2 = \ddot{v}_C + \left(\frac{R_L}{L} + \frac{(1-D)\,R\,R_C}{L(R+R_C)} + \frac{1}{C\,(R+R_C)}\right)\dot{v}_C + \left(\frac{R_L}{LC\,(R+R_C)} + \frac{(R(1-D))^2 + (1-D)RR_C}{LC\,(R+R_C)^2}\right)v_C - \frac{R(1-D)}{LC(R+R_C)}V_{in} \quad (36)$$

$$r_3 = \ddot{i}_L + \left(\frac{R_L}{L} + \frac{(1-D)\,R\,R_C}{L(R+R_C)} + \frac{1}{C\,(R+R_C)}\right)\dot{i}_L + \left(\frac{R_L}{LC\,(R+R_C)} + \frac{(R(1-D))^2 + (1-D)RR_c}{LC\,(R+R_C)^2}\right)i_L - \frac{1}{L}\dot{V}_{in} - \frac{1}{LC\,(R+R_C)}V_{in} \quad (37)$$

Estos residuos requieren derivadas de primer orden para $v_C$, $i_L$ y $V_{in}$ y segundas derivadas para $v_C$ e $i_L$. Este es un problema práctico y puede ser solucionado con un filtro pasa bajas de las señales medidas, es decir, de las variables de estado.

Una vez obtenidas las ecuaciones de los residuos como en las ecuaciones (35) - (37) se puede formar la tabla de firmas que permitirá la detección y localización de fallas en actuador y sensores.

### *5.1 Tabla de firmas*

En la Tabla 2 se muestra una descripción del comportamiento de los residuos (35) - (37), considerando fallas aditivas con una amplitud positiva tanto para fallas en actuador y sensores.

Tabla 2. Tabla de firmas

| | $fV_{in}$ | $fi_L$ | $fv_C$ |
|---|---|---|---|
| $r_1$ | 0 | -M | +M |
| $r_2$ | +M | 0 | -M |
| $r_3$ | +M | -M | 0 |

Para una falla en actuador $fV_{in}$, la firma es la siguiente: residuo $r_1$ no tiene variación en su señal por lo que en la tabla se muestra el número 0, mientras que los residuos $r_2$ y $r_3$ tendrán una variación, además se puede determinar el sentido de la señal de residuo, en este caso ambos tienen el signo positivo $(+M)$.

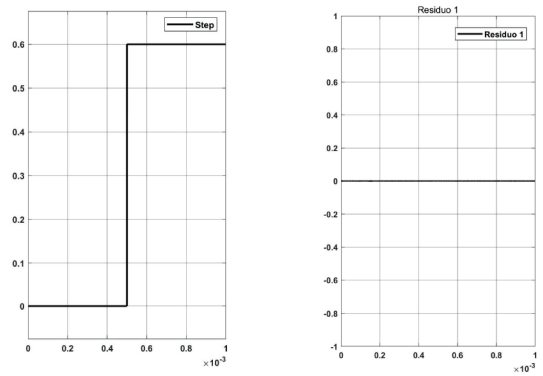
Para el caso de falla en el sensor $i_L$, el $r_2$ no tiene variación en su señal mientras que los residuos $r_1$, $r_3$ tendrán una variación negativa $(-M)$. Finalmente, para una falla en sensor $v_C$ el residuo $r_3$ permanece en 0, el residuo $r_1$ tiene una variación positiva $(+M)$ y el residuo $r_2$ una variación negativa $(-M)$.

Analizando la Tabla 2, podemos concluir que la detección de fallas es posible, ya que los residuos son sensibles a los cambios inesperados en el comportamiento de las variables de estado y de la entrada. Igualmente, la localización es posible, ya que al analizar los residuos como un conjunto, las firmas son diferentes, permitiendo determinar el sensor o actuador en el que se encuentra presente la falla.

## 6. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

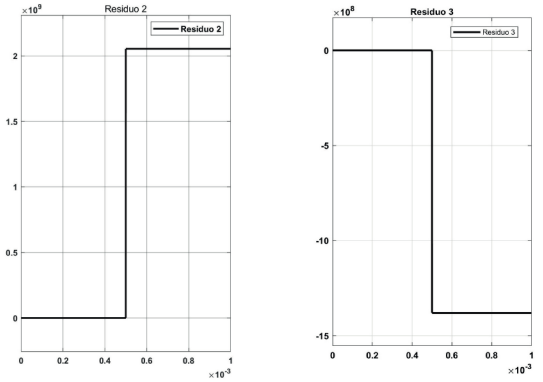
En esta sección se muestran dos simulaciones de fallas, uno en actuador y otro en sensor, considerando los parámetros de la Tabla 1 y un voltaje de entrada constante de 12V.

En la primera prueba se considera una falla en el actuador $(V_{in})$, una falla abrupta con amplitud de 1.2 V equivalente al 10 % del voltaje de entrada $(V_{in})$ que aparece en el instante de tiempo 0.5 ms (Fig. 4(a)), las Figs. 4(a)-5 se muestran las gráficas obtenidas de los residuos, el residuo $r_1$ se mantiene en cero mientras que los otros dos residuos responden ante la falla con una señal positiva como se indica en la Tabla 2.




(a) Falla en actuador $V_{in}$ (b) Gráfica del residuo $r_1$.

Figura 4. Falla en actuador y residuo 1.

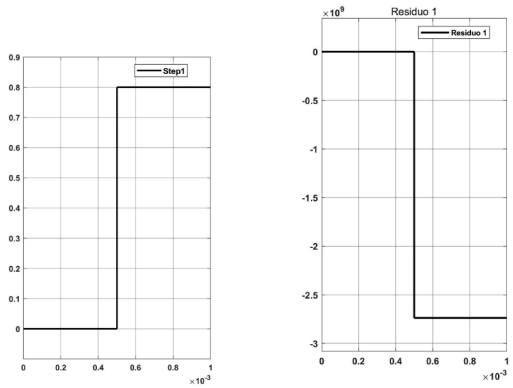



(a) Gráfica del residuo $r_2$. (b) Gráfica del residuo $r_3$.

Figura 5. Gráficas de residuos 2 y 3.

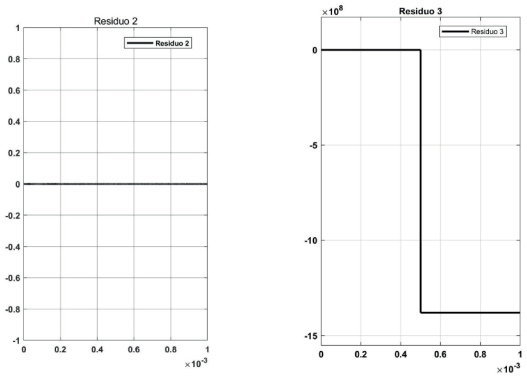
 ISSN en trámite

Para la segunda simulación se considera una falla abrupta con una amplitud de 0.8 en sensor ($i_L$) equivalente al 10 % del valor promedio de corriente en el inductor, en el instante de 0.5 ms (Fig. 6(a)). En las Figs. 6(b)-7 se muestran las gráficas obtenidas de los residuos. Se puede observar que la reacción de los residuos $r_1$ y $r_3$ tienden a una señal negativa, mientras que el residuo $r_2$ permanece en cero, como se indica en la Tabla 2 de firmas.




(a) Falla en sensor $i_L$. (b) Gráfica del residuo $r_1$.

Figura 6. Falla en sensor y residuo 1.




(a) Gráfica del residuo $r_2$. (b) Gráfica del residuo $r_3$.

Figura 7. Gráficas de residuos 2 y 3.

### *6.1 Análisis de resultados*

En las simulaciones realizadas se mostraron dos escenarios de falla, una falla aditiva en sensor y falla aditiva en actuador. Se puede observar que los residuos reaccionan de acuerdo a lo establecido en la Tabla 2, permitiendo un desacoplamiento de cada una de las fallas, siendo cada residuo sensible a solo una falla, esto nos permite corroborar que el esquema de detección y localización de fallas es factible desde el enfoque de ecuaciones de paridad.

## 7. CONCLUSIONES

El modelo del convertidor propuesto considera resistencias parásitas en el capacitor y el inductor, lo cual describe con mayor detalle su funcionamiento.

Las simulaciones muestran que la metodología desarrollada en este trabajo permite generar residuos estructurados que detectan y localizan fallas en actuador y sensores en un convertidor de potencia tipo Boost ante fallas aditivas.

Uno de los trabajos futuros, es validar este esquema de detección y localización de fallas ante diferentes escenarios, tales como: fallas con amplitud negativa, fallas en componentes del sistema. La información de variación positiva/negativa que generan los residuos podría ser últil para localizar fallas en los escenarios mencionados previamente.

## REFERENCIAS

Acevedo-Pérez, S.A. (2016). *Construcción de un convertidor de potencia DC/DC tipo Boost*. Master's thesis, Instituto Tecnológico Metropolitano. URL `http://hdl.handle.net/20.500.12622/4410`.

Alcorta-García, E. (2001). Detectando fallas mediante redundancia analítica. *Ingenierías*, 4(11), 43–48.

Colmenarez, G., Rios-Bolivar, M., and Marquez, R. (2012). Modelado y simulación de convertidores de potencia DC-DC boost usando el enfoque de complementariedad. In *XV Congreso Latinoamericano de Control Automático*, 1–6. CLCA.

Delgado-Campos, D.U. (2021). Experimentos en teoría de control: Convertidores cd-cd. *Electrónica*, 1–6.

Hart, D.W. (2021). *Introducción a la electrónica de potencia*. Prentice Hall, Madrid.

Isermann, R. (2005). *Fault-Diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer Science.

Kurtz, V.H., Anocibar, H.R., Santiago, L.V., Lopez, J.L., Trochez, O.D., and Olsson, J.A. (2019). Estudio de fallas en fuentes de alimentación conmutadas debido al estrés de los capacitores electrolíticos. *Revista de Ciencia Tecnología e Innovación*, 1(1), 46–60. doi: 10.36995/j.masingenio.2019.01.01.004.

Poon, J., Jain, P., Spanos, C., Panda, S.K., and Sanders, S.R. (2017). Fault prognosis for power electronics systems using adaptive parameter identification. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(3), 2862–2870. doi:10.1109/TIA.2017.2664052.

Samosir, A.S., Purwiyanti, S., Gusmedi, H., and Susanto, M. (2021). Design of dc to dc converter for solar photovoltaic power plant applications. In *International Conference on Converging Technology in Electrical and Information Engineering (ICCTEIE)*. IEEE. doi:10.1109/ICCTEIE54047.2021.9650639.

Verde, C. (2013). *Monitoreo y dianóstico automático de fallas en sistemas dinámicos*, volume 1. Trillas.

Wang, H., Ma, K., and Blaabjerg, F. (2012). Design for reliability of power electronic systems. In *38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE. doi:10.1109/IECON.2012.6388833.

 ISSN en trámite

# Control basado en un observador sincronizado para una estructura tipo edificio

**L.A. Galicia-Galicia** * **O. Hernández-González** **
**C.D. García-Beltrán** * **G. Valencia-Palomo** ***

* *Tecnológico Nacional de México, CENIDET, C.P. 62490, Cuernavaca, México (e-mail: d22ce087@cenidet.tecnm.mx)*
** *CONACYT-Tecnológico Nacional de México, IT Hermosillo, Av. Tecnológico 115, C.P. 83170, Hermosillo, Sonora, México (e-mail: omar.hernandezg@hermosillo.tecnm.mx)*
*** *Tecnológico Nacional de México, IT Hermosillo, Av. Tecnológico 115, C.P. 83170, Hermosillo, Sonora, México.*

**Resumen:** Este trabajo aborda el control PD basado en un observador sincronizado, utilizando la fusión homogénea de multisensores para un sistema lineal permitiendo fusionar una sola estimación aplicado en una estructura tipo edificio, donde multisensores son afectados por distintos ruidos de medición. El enfoque propuesto se valida en una estructura tipo edificio de dos pisos, la cual es afectada por una señal sísmica y utilizando un control $PD$, con el objetivo de reducir los efectos producidos por señales ruidosas y mantener el mínimo de desplazamiento.

*Keywords:* Señales sísmicas, Fusión, Observador sincronizado.

## 1. INTRODUCCIÓN

La fusión de señales multisensor es la combinación de señales de más de un sensor para hacer posible que la información resultante sea mejor que la de un solo sensor (Elmenreich, 2001). En la mayoría de los casos un solo sensor presenta limitaciones para cumplir satisfactoriamente su tarea de medición, por lo que se añade otro sensor que complemente la medición, en Ma et al. (2017) fusionan un sensor electromagnético y un sensor infrarrojo, ambos tienen diferentes características entre sí; sin embargo, fusionados se complementan para mejorar la precisión de reconocer su objetivo. En Li and Fu (2018) fusionan el sensor GPS, sistema de navegación Inercial (INS), y los sensores de luz visible, cada uno de estos sensores funcionan diferente y en la fusión comparten y complementan información para alcanzar el posicionamiento de un vehículo aéreo no tripulado (UAV). Existen diversas y múltiples aplicaciones para la fusión de datos multisensor algunas otras se pueden encontrar en Gao et al. (2018), You et al. (2020) y en Karaked et al. (2022). De acuerdo al método de integración generalizada en la fusión de datos se puede dividir en homogéneas multisensor, heterogéneas de un solo sensor y heterogéneas multisensor (Chen et al., 2021). En los casos antes mencionados se han presentado fusión de datos heterogéneas multisensor, siendo los más reportados en la literatura, utilizando para la fusión de datos el enfoque de filtros de Kalman y sus mejoras. Por otra parte, en Grave and Tang (2015) presentan una solución novedosa para la estimación de profundidad desconocida de un objeto en 3D utilizando la sincronización de observadores de orden completo con la característica de tener menos ruido en las señales al sincronizar los observadores de orden completo. Así también en Pérez et al. (2018), se realiza la sincronización de observadores para una clase de osciladores neuronales. En Chávez-Moreno et al. (2018) se estiman la velocidad angular de satélites pequeños utilizando el diseño de observadores sincronizados y en Tang et al. (2019) abordan el diseño de un observador multisensor para medir la misma señal. En el actual documento se realiza la fusión con la estructura multisensor homogénea que consiste en integrar múltiples sensores con los mismos atributos utilizando observadores sincronizados para estimar la posición de cada piso.

El incremento urbano en las ciudades se ha vuelto un problema de interés en los últimos años, ya que los lugares habitables son escasos. Dicho problema se soluciona con la construcción de estructuras verticales con múltiples pisos, los cuales son susceptibles a sufrir degradaciones en los elementos que los constituyen cuando sufren alteraciones en su estado, causados por fenómenos naturales, siendo principalmente los sismos los causantes de mayor daño en estas estructuras, por lo que se requiere estabilizar el sistema (Morales Valdez et al., 2019; Ramírez-Rasgado et al., 2020).

Existen trabajos que estudian este problema, en Morales-Valdez et al. (2018) se diseñó un observador adaptable ba-

 ISSN en trámite

sado en las medidas de aceleración permitiendo la estimación de desplazamientos y velocidades. Por consiguiente, en Morales-Valdez et al. (2020) se ubica el daño utilizando una combinación de diferentes métodos para su detección, implementando un sistema con robustez frente al ruido de medición y las perturbaciones constantes. El problema de ruido produce incertidumbre en la medición lo que afecta negativamente la certeza de este tipo de análisis, así que Erazo and Hernandez (2014) propone el diseño de dos observadores para estimar los estados en lugares arbitrarios de la estructura de interés: uno utilizando una estructura tipo Luenberger y el otro de tipo filtro de Kalman. Para el diseño se considera el modelo de elementos finitos y que las mediciones presentan ruido.

La aplicación de este artículo es dar solución al problema de múltiple sensores en las estimaciones de desplazamientos de una estructura tipo edificio, donde dichas mediciones de desplazamientos provienen de distintos sensores los cuales pueden estar afectados por distintos ruidos de medición. Se considera un escenario donde las mediciones múltiples proviene de distintos sensores que miden la posición de cada piso, donde el edificio se modela como un sistema lineal presentado en la Sección 2. La aportación del artículo es el diseño de un control $PD$ basado en un observador sincronizado, el cual utiliza como base un observador de orden completo presentado en la Sección 3 y su versión de sincronización en la Sección 4. El observador logra estimar el vector de estado de forma sincronizada reduciendo el error de estimación mediante el $N$ número de mediciones de salida afectadas por distintos ruidos de medición, con esto se mejora la rapidez de convergencia del control basado en el observador sincronizado. En la Sección 5, se evalúa el esquema de control basado en observador en simulación considerando una estructura tipo edificio de $n = 2$-pisos y $N = 3$-mediciones de las posiciones de salida de cada uno de los pisos ante la presencia del sismo escalado de México en 1985. Por último, se presenta en la Sección 6 las conclusiones.

## 2. MODELADO DE ESTRUCTURA TIPO EDIFICIO

Se considera una estructura tipo edificio con $n$-pisos, representada en la Figura 1, la cual está montada sobre una mesa vibratoria con capacidad para generar señales sísmicas en el eje horizontal, teniendo el siguiente modelo matemático:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{n\times n} & I_{n\times n} \\ -M^{-1}K_s & -M^{-1}C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0_{n\times 1} \\ l \end{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \\ y = [I_n \;\; 0_n] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = x_1 \end{cases} \tag{1}$$

siendo $x_1$ y $x_2$ las posiciones y velocidades de cada uno de los pisos, respectivamente; $n$ el número de pisos de la estructura; $y$ son la medición de las posiciones de cada uno de los pisos; $M$, $C_s$ y $K_s$ son las matrices de constantes conocidas de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente, definidas como:

$$M = diag\,[m_1 \;\; m_2 \;\; \cdots \;\; m_n] > 0 \tag{2}$$

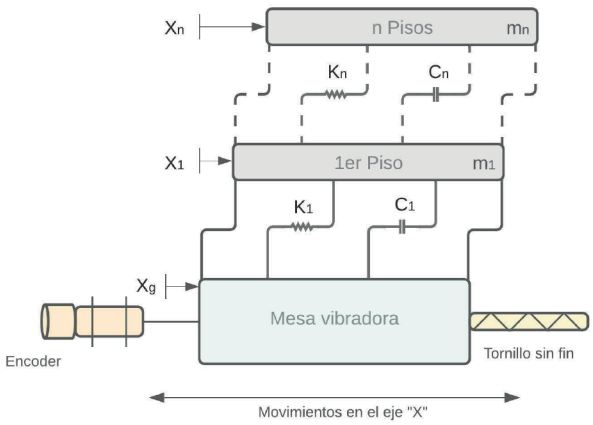



Figura 1. Diagrama de una estructura tipo edificio de $n$ pisos.

$$C_s = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \cdots & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & \cdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & 0 & \cdots & -c_n & c_n \end{bmatrix} \geq 0 \tag{3}$$

$$K_s = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \cdots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \cdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & \cdots & -k_n & k_n \end{bmatrix} \geq 0 \tag{4}$$

donde $m_i$, $c_i$ y $k_i$ para $i = 1, 2, ..., n$, son la masa, constante de amortiguador y contante del resorte entre los pisos respectivamente; el vector $l$ permite distribuir la señal escalar $\ddot{x}_g$ que representa la incertidumbre en cualquier nivel del vector y físicamente representa la señal sísmica:

$$l = [1, 1, 1, \cdots, 1]^T \in R^{n\times 1} \tag{5}$$

El vector de estado está definido por la posición y velocidad de cada uno de los niveles de la estructura representado por $x = [x_1, \quad x_2]^T$, quedando el modelo de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} 0_{n\times n} & I_{n\times n} \\ -M^{-1}K_s & -M^{-1}C_s \end{bmatrix} x - \begin{bmatrix} 0_{n\times 1} \\ l \end{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \\ y = [I_n \;\; 0_n]\, x = x_1 \end{cases} \tag{6}$$

El sistema de la estructura tipo edificio (6) se puede representar de la forma general siguiente:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + D\ddot{x}_g \\ y = Cx = x_1 \end{cases} \tag{7}$$

con las siguientes matrices:

 ISSN en trámite

$$A = \begin{bmatrix} 0_n & I_n \\ -M^{-1}K_s & -M^{-1}C_s \end{bmatrix}, \tag{8}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0_{n\times 1} \\ l \end{bmatrix}, \quad C = [I_n \ 0_n], \tag{9}$$

donde $x$ es el estado; $y$ la salida medible; $A$ y $C$ son las matrices de estado y de salida respectivamente, siendo el par $(A, C)$ observable; $D$ es la matriz de incertidumbre del sistema y $\ddot{x}_g \in \mathbb{R}$ es la entrada desconocida de la fuerza externa, que se asume que es una función acotada.

**Ley de Control**:
Con la finalidad de proponer un sistema de control para el sistema de la forma (7), se reescribe el sistema lineal controlado de la estructura tipo edificio de la forma siguiente:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + D\ddot{x}_g \\ y = Cx \end{cases} \tag{10}$$

donde $u$ es la señal de control ejercida por un actuador activo masa-amortiguador (AMD), usualmente utilizado para el control de desplazamientos en estructuras tipo edificio. Así que la matriz de entrada $B$ está de la forma:

$$B = \begin{bmatrix} 0_{n\times 2} \\ lM^{-1}\Gamma \end{bmatrix} \tag{11}$$

donde $\Gamma = diag\,[0, 0, \cdots, 1] \in R^{n\times n}$, lo que indica que el actuador activo AMD esta en el último piso de la estructura.

La ley de control utilizada es un control PD, la cual tiene como objetivo alcanzar una posición deseada $x_d = 0$, es decir, $x_d = x_1 = 0$ esto implica que $\dot{x}_d = x_2 = 0$, lo que se refleja en mantener sin movimiento la estructura tipo edificio. Por lo tanto, la señal de control $u$ puede ser calculada de la forma

$$u = -k_p x_1 - k_d x_2 \tag{12}$$

siendo $k_p$ y $k_d$ las ganancias proporcional y derivativa del control $PD$, respectivamente.

## 3. DISEÑO DEL OBSERVADOR

Considere el siguiente sistema lineal

$$\dot{x} = A_x x + A_f y + B_b u \tag{13}$$

$$\dot{y} = A_y x + A_g y, \tag{14}$$

donde $x \in \mathbb{R}^{n_x}$ es el estado no medible $y \in \mathbb{R}^{n_y}$ es el estado medible y $u \in \mathbb{R}^{n_u}$ es la entrada.

Se asume que hay $N$ mediciones de $y$ representadas por $y_i = y + w_i$, $i = 1, \ldots, N$, las cuales están afectadas por ruido de medición $w_i$, el problema es diseñar un observador tal que la diferencia entre la trayectoria de estado $x(t)$ y su estimación $\hat{x}(t)$ satisfaga que $\|\hat{x} - x\| \to 0$ asintóticamente manteniendo todas las soluciones del sistema acotadas. Para esto se tiene la siguiente suposición:

**A1**: $A_y$ es de rango completo: $\text{Rank}(A_y) = \text{mín}\,\{n_x, n_y\}$.

Se aborda el diseño de observadores para la clase de sistemas dinámicos (14) asumiendo salidas medidas limpia $y$. El observador de orden completo se aborda para el caso de $n_x = n_y$, es decir, se tiene el mismo número de variables de estado medibles que no medibles, además la matriz $A_y$ esta bajo la suposición A1. Los otros casos pueden ser tratados con un observador de orden reducido ($n_x \neq n_y$), pero en este trabajo serán omitidos estos últimos.

Consideremos el observador de orden completo en su forma de análisis

$$\dot{\hat{x}} = A_x\hat{x} + A_f y + B_b u + K_o A_y(x - \hat{x}) + A_y^T(y - \hat{y}) \tag{15}$$

$$\dot{\hat{y}} = A_y\hat{x} + A_g y + K_y(y - \hat{y}), \tag{16}$$

donde $K_y = K_y^T > 0$ es una matriz constante. Con esto se propone el siguiente teorema para el observador de orden completo (15):

***Teorema** 1.* Considerando el observador de orden completo (15), con valores de ganancia $K_o$ y $K_y$ que satisfagan una convergencia exponencial del sistema (15), se puede obtener $\left[\,\hat{x}^T \ \hat{y}^T\,\right]^T - \left[\,x^T \ y^T\,\right]^T \to 0$ exponencialmente.

**Prueba:** Tome en cuenta el siguiente sistema:

$$\dot{\xi}_1 = A_x\xi_1 + A_f\xi_2 + Bu + K_o A_y\,(x - \xi_1) + A_y^T\,(y - \xi_2)\,, \tag{17}$$

$$\dot{\xi}_2 = A_y\xi_1 + A_g y + K_y\,(y - \xi_2) \tag{18}$$

notando que el sistema tiene $\left[\hat{x}^T \quad \hat{y}^T\right]^T$ y $\left[\,x^T \ y^T\,\right]^T$ como dos soluciones particulares. Así este sistema se contrae, siendo

$$\frac{\partial\dot{\xi}}{\partial\xi} = \text{diag}\,\{A_x - K_o A_y, -K_y\} \leq -\lambda_c I_{n_x+n_y}$$

para $\lambda_c := \text{mín}\,\{\lambda_x, \lambda_{\text{mín}}\,(K_y)\}$, donde $A_x - K_o A_y \leq -\lambda_f I_{n_x}$ debe ser Hurwitz. Así, el sistema (17) se contrae y como consecuencia se tiene $\left[\,\hat{x}^T \ \hat{y}^T\,\right]^T - \left[\,x^T \ y^T\,\right]^T \to 0$ exponencial.

Así, el observador de orden completo puede implementarse mediante

$$\dot{\bar{x}} = A_x\bar{x} + A_f y + B_b u - K_o\hat{x} - K_o A_g y + A_y^T(y - \hat{y}) \tag{19}$$

$$\dot{\hat{y}} = A_y\hat{x} + A_g y + K_y(y - \hat{y}), \tag{20}$$

$$\hat{x} = \bar{x} + K_o y. \tag{21}$$

La salida del observador esta dada por: $\hat{y}_o = \hat{y}$ and $\hat{x}_o = \bar{x} + K_o\hat{y}$.

## 4. OBSERVADOR SINCRONIZADO

Considere el sistema (14), donde se asumen $N$ mediciones de $y$ denotadas por $y_i = y + w_i, i = 1, \ldots, N$, afectadas por el ruido blanco $w_i$ con $Ew_i = 0$, $Ew_i w_j = 0, \forall i \neq j$ y $Ew_i^2 = \sigma_w$, donde $E(\cdot)$ es la expectativa matemática. Consideremos el grupo de $N$ observadores de orden completo acoplados (15), denominado observador sincronizado:

 ISSN en trámite

$$\dot{\hat{x}}_i = A_x\hat{x}_i + A_f y_i + B_b u + k_o A_y (x_i - \hat{x}_i) + A_x^T (y_i - \hat{y}_i) + K_a \sum_j (\hat{x}_j - \hat{x}_i), \quad (22)$$

$$\dot{\hat{y}}_i = A_y\hat{x}_i + A_g y_i + K_y (y_i - \hat{y}_i) + K_a \sum_j (\hat{y}_j - \hat{y}_i) \quad (23)$$

donde $K_a > 0$ es la ganancia de acoplamiento.

Al igual que en el observador de orden completo, este observador sincronizado puede implementarse como:

$$\dot{\bar{x}}_i = A_x\bar{x} + A_f y_i + B_b u - k_o A_x\hat{x}_i - k_o A_g y + A_y^T (y - \hat{y}_i) + K_a \sum_j (\hat{x}_j - \hat{x}_i), \quad (24)$$

$$\dot{\hat{y}}_i = A_y\hat{x}_i + A_g y_i + K_y (y_i - \hat{y}_i) + K_a \sum_j (\hat{y}_j - \hat{y}_i) \quad (25)$$

$$\hat{x}_i = \bar{x}_i + k_o y_i \quad (26)$$

La salida del observador esta dada por

$$\begin{bmatrix}\hat{x}_o^T & y_o^T\end{bmatrix} = \frac{1}{N}\sum_j \begin{bmatrix}k_o\hat{y}_j^T & \hat{y}_j^T\end{bmatrix}^T.$$

El siguiente teorema establece que el comportamiento libre de ruido del observador, por lo tanto, la trayectoria del estado puede recuperarse asintóticamente a medida que el número de observadores de orden completo llega a infinito.

***Teorema** 2.* Sea $z = \begin{bmatrix}x^T & y^T\end{bmatrix}^T$ denota el vector de estado, $\hat{z}_{\text{Sin-Ruido}} := \begin{bmatrix}\hat{x}^T & \hat{y}^T\end{bmatrix}^T$, la estimación de $z$ por el observador de orden completo (15), y $\hat{z}_{\text{Ruido}} := \frac{1}{N}\sum_{i=1}^N \begin{bmatrix}\hat{x}_i^T & \hat{y}_i^T\end{bmatrix}^T$, la estimación de $z$ por el observador sincronizado (22) en presencia de medidas ruidosas $y_i$, respectivamente. Entonces, después de un transitorio exponencial

$$\|\hat{z}_{\text{Ruido}} - \hat{z}_{\text{Sin-Ruido}}\|^2 \leq c/N,$$

donde $c > 0$ es una constante para las características dadas del sistema y del ruido. Por lo tanto, por la desigualdad del triángulo $\|\hat{z}_{\text{Ruido}} - z\| \leq \|\hat{z}_{\text{Ruido}} - \hat{z}_{\text{Sin-Ruido}}\| + \|\hat{z}_{\text{Sin-Ruido}} - z\| \to 0$, cuando $t \to \infty$ y $N \to \infty$.

**Prueba:** La prueba es similar a la presentada en Grave and Tang (2015). ■

**Remarca:**
Para aplicar el observador sincronizado a la estructura tipo edificio representado por el modelo presentado en (10) se deben definir las variables medibles y no medibles, así como las matrices respectivas. Para la estructura tipo edificio se tiene que las variables medibles son las posiciones de los pisos, las cuales son denotadas por la literal $y$ y como variables no medibles son las velocidades de los pisos, las cuales son denotadas por la literal $x$, estas literales son utilizadas para el diseño del observador. Por lo que, utilizando las siguientes matrices para su implementación del observador se basa en las matrices

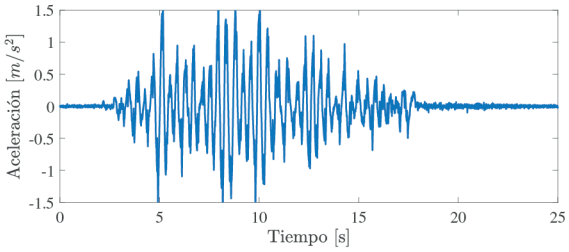



Figura 2. Señal sísmica de prueba.

del sistema lineal controlado (10), quedan las matrices del sistema (14) :

$$A_x = [-M^{-1}C_s], \qquad A_y = I_n,$$
$$A_f = [-M^{-1}K_s], \qquad B_b = [lM^{-1}\Gamma], \qquad A_g = 0_n,$$

## 5. RESULTADOS

Para validar la eficacia del control basado en un observador sincronizado diseñado para una estructura tipo edificio en presencia de una señal de entrada inducida por una aceleración sísmica, se analizó el caso de un edificio de dos pisos ($n = 2$).

Para este caso se utilizaron datos reales de aceleración como entrada, es decir, datos de un registro sísmico. Dichos datos son proporcionados por la Secretaria de Comunicación y Transporte y corresponden a los registros del sismo detectado en México en 1985, ver Figura 2. Los datos del sismo son adquiridos a 1 ms, dicho tiempo de muestreo es utilizado en nuestra simulación para obtener un desempeño real. Los valores de las masas, las constantes de resorte y amortiguador de cada piso son: $m_1 = 3.17kg, k_1 = 9199.834N/m, c_1 = 7.388\ Ns/m, m_2 = 4.609\ kg, k_2 = 7531.62\ N/m, c_2 = 6.834\ Ns/m$, quedando las siguientes matrices (2)-(4):

$$M = \begin{bmatrix}3.17 & 0\\ 0 & 4.609\end{bmatrix}, \qquad K_s = \begin{bmatrix}16731.462 & -7531.628\\ -7531.628 & 7531.628\end{bmatrix},$$
$$C_s = \begin{bmatrix}14.222 & -6.834\\ -6.834 & 6.834\end{bmatrix},$$

para la ley de control PD se utilizan los siguientes valores: $k_p = 1924.4$ y $k_d = 510.57$, ver Rodriguez-Torres et al. (2020), con estos valores se reduce considerablemente los desplazamientos de la estructura. Las condiciones iniciales del sistema original son $z(0) = 0_{4\times1}$ y del observador $\hat{z}(0) = 5\times10^{-2}[1\ 1\ 0\ 0]^T$. De acuerdo al Teorema 2, las ganancias del observador sincronizado son las siguientes: $K_0 = 4\times I_2$, $K_y = 3\times I_2$ y $K_a = 6\times I_2$.

En las Figuras 3-4 se muestran las estimaciones de cada observador del vector de estado del sistema por medio del observador sincronizando, donde se utilizan 3 mediciones de las posiciones de cada piso, así que $N = 3$, donde cada medición de las salidas $y_i$ son afectadas por ruidos diferentes estos son: $w_1 = 9\times10^{-5}\sin(80t)$, $w_2 = 1\times10^{-5}\cos(60t)$ y $w_3 = 5\times10^{-5}\cos(70t)$, donde para las tres mediciones se considera una matriz $E = I_n$. En la Figura 3 se muestran las estimaciones de los 3 observadores

 ISSN en trámite

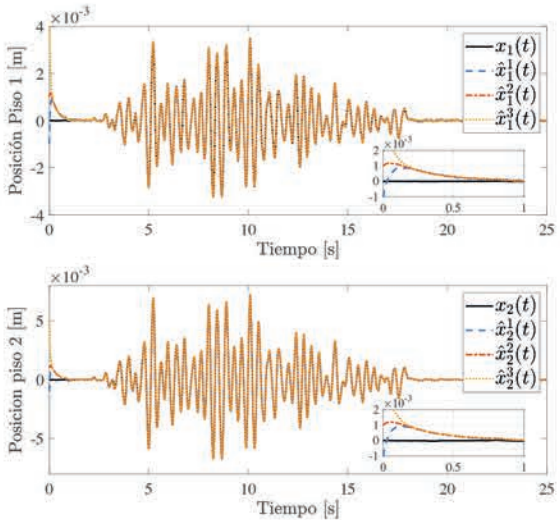



Figura 3. Estimación de la posición de cada piso.

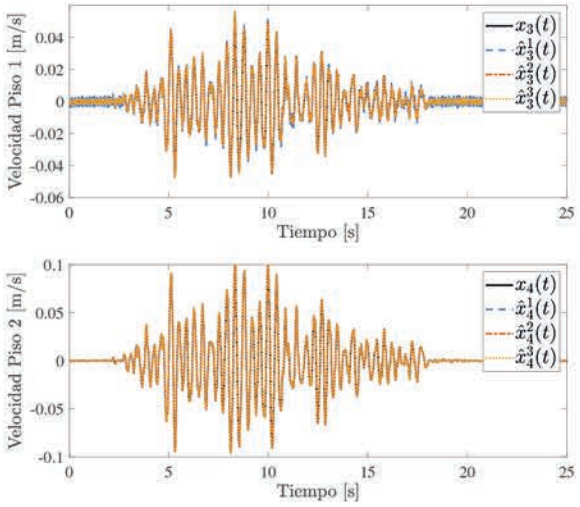



Figura 4. Estimación de las velocidad de cada piso.

de la posición del primer y segundo piso, respectivamente. Se ilustra que incluso en presencia de señales ruidos que perturban a las mediciones de salida, los desplazamientos presentados por ambos pisos son mínimos, demostrando que el control $PD$ logra su objetivo. En la Figura 4 se muestra las 3 estimaciones de los observadores para la velocidad del primer y del segundo piso respectivamente, debido al diseño propuesto se logra estimar estas velocidades sin ningún problema. Finalmente se muestra en la Figura 5 la estimación sincronizada de los 3 observadores para posición en presencia de múltiples mediciones de salidas ruidos, donde se ve que el observador sincronizado logra un buen desempeño.

## 6. CONCLUSIONES

Se presentó el desarrollo de un observador sincronizado con la fusión de N-mediciones de salida que pueden pro-

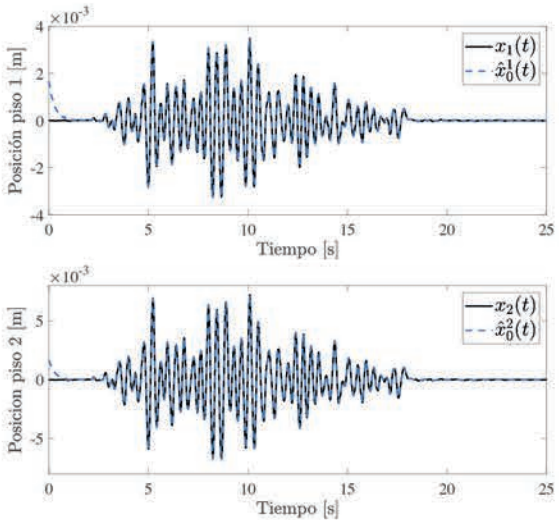



Figura 5. Estimación sincronizada de la posición de cada piso.

venir de distintos sensores, esto se validó en el sistema de una estructura tipo edificio donde las posiciones en cada piso son las mediciones de salida, donde dichas mediciones son afectas por ruido de medición, logrando una estimación sincronizada incluso ante distintos ruidos. Por lo cual nos permite afirmar un buen acoplamiento entre el observador sincronizado y el controlador ($PD$) reduciendo las oscilaciones en una estructura de dos pisos. Los diseños del observador sincronizado y el controlador ($PD$) son algoritmos simples capaces de ser implementados en un entorno real con el ajuste adecuado.

## REFERENCIAS

Chen, G., Liu, Z., Yu, G., and Liang, J. (2021). A new view of multisensor data fusion: research on generalized fusion. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1–21.

Chávez-Moreno, R., Tang, Y., Hernández, J.C., and Ji, H. (2018). Contracting angular velocity observer for small satellites. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54(6), 2762–2775.

Elmenreich, W. (2001). An introduction to sensor fusion.

Erazo, K. and Hernandez, E.M. (2014). A model-based observer for state and stress estimation in structural and mechanical systems: Experimental validation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 43(1), 141–152.

Gao, B., Hu, G., Gao, S., Zhong, Y., and Gu, C. (2018). Multi-sensor optimal data fusion based on the adaptive fading unscented kalman filter. *Sensors*, 18(2).

Grave, I. and Tang, Y. (2015). A new observer for perspective vision systems under noisy measurements. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 60(2), 503–508.

Karaked, P., Saengphet, W., and Tantrairatn, S. (2022). Multi-sensor fusion with extended kalman filter for indoor localization system of multirotor uav. In *2022 19th*

ISSN en trámite

*International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*, 1–5.

Li, W. and Fu, Z. (2018). Unmanned aerial vehicle positioning based on multi-sensor information fusion. *Geo-spatial Information Science*, 21(4), 302–310.

Ma, K., Zhang, H., Wang, R., and Zhang, Z. (2017). Target tracking system for multi-sensor data fusion. In *2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, 1768–1772.

Morales-Valdez, J., Alvarez-Icaza, L., and Concha, A. (2018). On-line adaptive observer for buildings based on wave propagation approach. *Journal of Vibration and Control*, 24(16), 3758–3778.

Morales Valdez, J., Alvarez-Icaza, L., and Escobar, J.A. (2019). Online identification system for damage location in building structures. *IEEE Latin America Transactions*, 17(08), 1283–1290.

Morales-Valdez, J., Lopez-Pacheco, M., and Yu, W. (2020). Automated damage location for building structures using the hysteretic model and frequency domain neural networks. *Structural Control and Health Monitoring*, 27(9), e2584.

Pérez, J., Tang, Y., and Grave, I. (2018). Nonlinear observers for a class of neuronal oscillators in the presence of strong measurement noise. In T. Huang, J. Lv, C. Sun, and A.V. Tuzikov (eds.), *Advances in Neural Networks – ISNN 2018*, 736–744. Springer International Publishing, Cham.

Ramírez-Rasgado, F., Galaz-Palma, R.R., Hernández-González, O., Astorga-Zaragoza, C.M., Guerrero-Sánchez, M.E., Valencia-Palomo, G., and Targui, B. (2020). Control basado en observador para el desplazamiento de estructuras con retardo en la señal de control. In *Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada*, 121–125.

Rodriguez-Torres, A., Morales-Valdez, J., and Yu, W. (2020). Modeling and proportional-derivative controller design for buildings based on vibration frequencies. *2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 1, 575–580.

Tang, Y., Ji, H., and Wang, X. (2019). Multi-sensor observer designs for a class of nonlinear systems. volume 2019-July, 1296–1301. IEEE.

You, W., Li, F., Liao, L., and Huang, M. (2020). Data Fusion of UWB and IMU Based on Unscented Kalman Filter for Indoor Localization of Quadrotor UAV. *IEEE Access*, 8, 64971–64981.

 ISSN en trámite

# Revisión de Alternativas para la Simplificación de Microinversores Aislados para Aplicaciones Fotovoltaicas

**J. G. Flores-Castro*,[1], D. Miraglia*, Jaime Arau*, Carlos Aguilar***

**Departamento de Ingeniería Electrónica - CENIDET*
*e-mail[1]: m21ce078@cenidet.tecnm.mx*

Resumen: Se presenta un estudio comparativo de las diferentes técnicas disponibles en la literatura científica para incrementar la frecuencia de operación del transformador de aislamiento de microinversores fotovoltaicos, en donde es crítico minimizar el volumen del convertidor electrónico de potencia ya que los microinversores se ofrecen en conjunto con cada panel fotovoltaico, que de hecho se instalan en la parte posterior de los mismos. Se analizan las diferentes topologías existentes en función del número de etapas y estrategia de conversión, así como de la complejidad del control requerido y número de componentes, las cuales ofrecen soluciones para mantener el aislamiento en media o alta frecuencia, manteniendo la modulación PWM en el microinversor. El estudio además de comparar las principales soluciones existentes aporta algunas ideas base sobre cómo se podrían tener otras soluciones con mejores ventajas competitivas, lo cual representa un beneficio importante en el desarrollo de microinversores fotovoltaicos.

*Keywords:* Microinversores fotovoltaicos, Modulación PWM en inversores, Transformadores en Alta Frecuencia.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de energía renovable han experimentado un rápido desarrollo en las últimas décadas y el nivel de crecimiento es debido a la demanda de reducir el consumo de combustibles fósiles a nivel mundial, Yuan et al. (2019), siendo la energía solar es una de las fuentes renovables más importantes, Kabalci y Boyar, (2018). Entre todas las tecnologías solares, el módulo fotovoltaico (FV) compuesto por células FV es el dispositivo más importante en términos de generación de electricidad y para realizar la función de cosecha de energía el inversor fotovoltaico es una parte medular.

En los sistemas de energías renovables se tienen dos conceptos claves que son por un lado la eficiencia en la cosecha de energía (que tiene que ver con la forma en que se interconectan los paneles fotovoltaicos, para permitir obtener el máximo de potencia disponible de los mismos) y la eficiencia en el procesamiento de energía (que tiene que ver con la eficiencia que se pueda lograr con la electrónica de potencia que procesa dicha energía). En ambos aspectos existen diferentes alternativas y son retos abiertos para optimizar el sistema disponible en la literatura científica.

En la Figura 1 se muestra el esquema tradicional de un sistema fotovoltaico con aislamiento con una sola etapa de conversión, el cual tiene la característica de tener una cantidad reducida de componentes y alta eficiencia en la transformación de la energía, sin embargo, el transformador opera a frecuencia de la línea (*60 Hz*), por lo que tiene la desventaja de ser pesado y voluminoso.

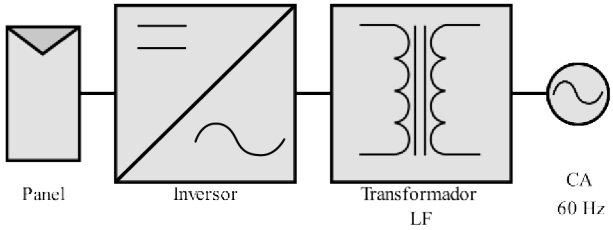



Fig. 1. Inversor fotovoltaico de una etapa de conversión.

Existen diferentes configuraciones de conexión de los paneles fotovoltaicos que depende de los niveles de potencia, voltaje de entrada, características de aislamiento, entre otras. De acuerdo con la arquitectura utilizada en la conexión de los paneles fotovoltaicos, se puede hablar de tener arquitecturas de conexión centralizada, en cadena o multicadena y modulares, también conocidos como microinversores cuando ya los asociamos con el inversor conectado a cada panel, Surapaneni et al. (2016). en los que la eficiencia de cosecha de energía es la mejor y se vuelve un reto mantener una buena eficiencia de conversión en el convertidor electrónico de potencia.

La arquitectura centralizada (Figura 2) recibe ese nombre debido a que solo un inversor se encarga de convertir toda la potencia recibida de los paneles fotovoltaicos y distribuirla. Los paneles se conectan a un solo enlace de corriente directa DC, utilizando configuraciones en serie (en cadena) y/o paralelo para obtener la tensión requerida por el inversor para después ser distribuida. Esta arquitectura tiene como principal ventaja que se puede tener una muy buena eficiencia de conversión dado que solamente se cuenta con un módulo de procesamiento de potencia y es más sencillo tratar de optimizarlo. Por otro lado, como principal

 ISSN en trámite

desventaja está la potencialmente baja eficiencia de cosecha de energía ya que la producción de energía del banco de paneles puede empeorarse ante el hecho de tener sombreados parciales o totales, suciedad en los paneles o un posible mal funcionamiento de alguno de los paneles del arreglo.

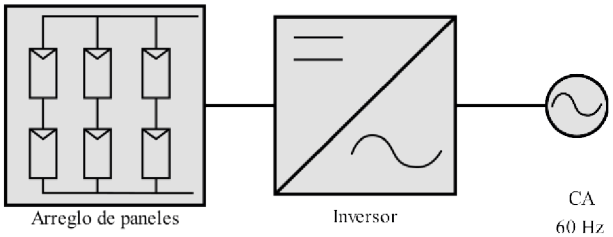



Fig. 2. Esquema de una arquitectura centralizada.

En la arquitectura en cadena (Figura 3), los paneles son agrupados en serie para sumar las tensiones de los paneles y obtener un solo enlace de corriente directa DC necesario para la conexión a red. En este esquema se puede tener potencialmente el problema de que la entrada de voltaje al inversor sea demasiado elevada ya que los paneles son colocados en serie en la configuración.

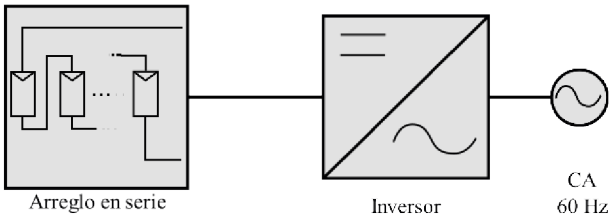



Fig. 3. Esquema de una arquitectura en cadena.

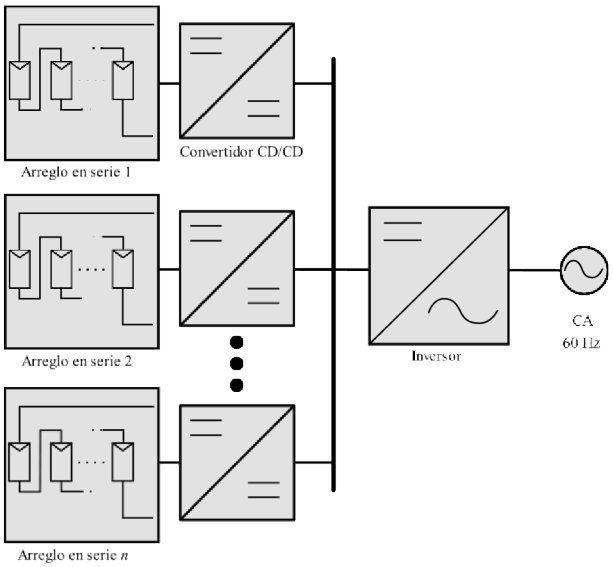



Fig. 4. Esquema de una arquitectura multicadena.

Cuando se habla de una arquitectura multicadena (Figura 4), se tienen grupos de paneles conectados en serie para sumar sus tensiones, y luego los grupos se colocan en paralelo a través de convertidores CD/CD que tienen la responsabilidad adicional de realizar el MPPT. y finalmente se tiene una única etapa de conversión CD/CA. Esta arquitectura mejora la eficiencia de cosecha de energía y empeora con respecto al costo, en comparación con la opción centralizada.

En la arquitectura modular (Figura 5) se tiene la mejor eficiencia de cosecha de energía ya que se coloca un convertidor electrónico de potencia por cada panel fotovoltaico y al conjunto panel + inversor se le conoce comúnmente como Microinversor. En esta configuración se puede maximizar el MPPT y eliminar los problemas de acoplamiento entre paneles, como lo describe Bravo Arche (2016). Dado que los microinversores se comercializan integrados a los paneles fotovoltaicos, toma una especial relevancia la reducción del volumen y peso de la electrónica de potencia asociada al proceso de conversión y de manera particular al volumen y peso del transformador de aislamiento, Yongqing et al. (2020), que en la mayoría de las ocasiones por normativa se tiene que integrar.

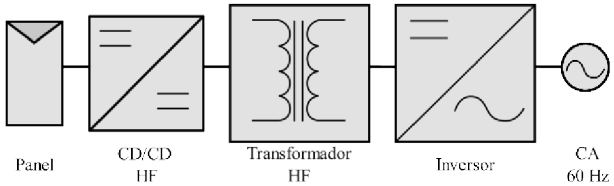



Fig. 5. Esquema de una arquitectura modular.

El volumen y peso de un transformador dependen de la densidad de flujo del material del núcleo magnético, así como de la potencia y frecuencia de operación del transformador. Al incrementarse la frecuencia de trabajo del transformador se puede tener una mejor utilización del núcleo magnético y por lo tanto reducir el tamaño y peso del transformador, Lloyd (2001).

Un aspecto importante por señalar es que las técnicas de modulación PWM son implementadas para disminuir el contenido armónico en la tensión de salida de un inversor, permitiendo reducir con esto el tamaño del filtro de armónicos para recuperar la señal fundamental de salida. Sin embargo, el problema se presenta cuando se busca incorporar aislamiento magnético con una modulación PWM tradicional, ya que no se asegura el funcionamiento en alta frecuencia del transformador (debido a que el balance del flujo de magnetización del transformador se cumple a 60Hz independientemente de la frecuencia de los pulsos de la modulación PWM (ver figura 6).

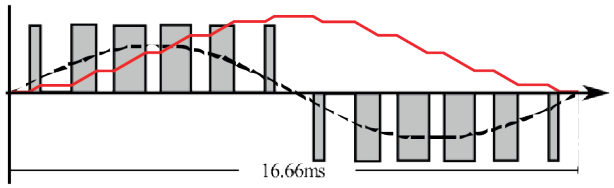



Fig. 6. Modulación PWM convencional y corriente de magnetización en el núcleo del transformador (línea roja).

Una solución tradicional con aislamiento en alta frecuencia consiste en una etapa de conversión CD/CD que incorpore el

 ISSN en trámite

aislamiento magnético y, por otro lado, tener una etapa separada con el inversor PWM convencional. Por otro lado, existe toda una diversidad de soluciones en la que se busca una variante de la modulación PWM que permita cumplir en una misma etapa con el aislamiento magnético en alta frecuencia y la modulación PWM requerida para la reducción de armónicos.

En este artículo se presenta un estudio comparativo de las soluciones disponibles en la literatura enfocadas en la incorporación del aislamiento galvánico en media o alta frecuencia, sin dejar de ofrecer las ventajas de una determinada técnica de modulación PWM que como es sabido, se ocupa para disminuir la cantidad de armónicos en la señal que se aplica al filtro de salida, reduciendo con esto el tamaño de dicho filtro.

## 2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

En este trabajo se busca estudian diferentes alternativas de microinversores para aplicaciones de sistemas fotovoltaicos, en donde se busca incorporar a los inversores PWM el aislamiento magnético en media o alta frecuencia. En esta revisión se analizan aspectos importantes que pueden impactar en el costo, volumen y complejidad de las soluciones, tales como cantidad de componentes, complejidad del control implementado, frecuencia de operación del transformador de aislamiento, etc.

Las topologías estudiadas se enfocan principalmente en resolver el problema haciendo operar al transformador de aislamiento a media o alta frecuencia, utilizando cualquiera de los dos esquemas que se presentan en la figura 7, lo cual se refieren a: a) tener 2 etapas (convertidor CD/CD + CD/CA) con el asilamiento magnético incorporado en el convertidor CD/CD o b) topologías que también cuentan con dos etapas, pero implementando un esquema de convertidores CD/CA + CA/CA (buscando incorporar el aislamiento magnético en el convertidor CD/CA).

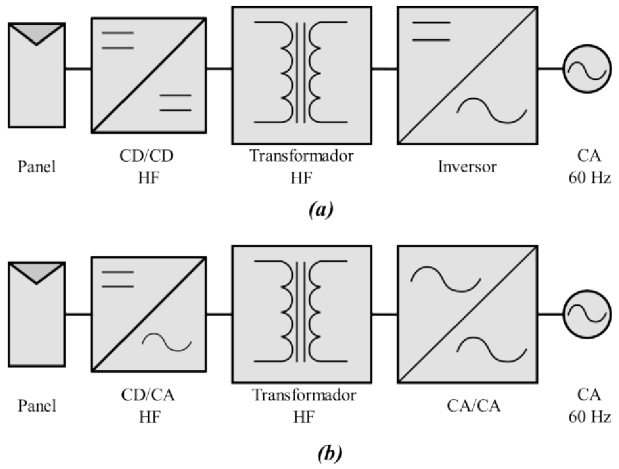



Fig. 7. Esquemas de soluciones de convertidores con aislamiento en media o alta frecuencia y modulación PWM.

### *2.1 Soluciones en dos etapas con convertidor CD/CD + CD/CA*

Este tipo de topologías cuenta con una etapa de conversión CD/CD que incorpora el aislamiento galvánico en alta frecuencia y también se enfoca en el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) del módulo fotovoltaico. La segunda etapa, CD/CA, suele utilizarse para reducir el contenido armónico mediante el uso de técnicas de modulación PWM, permitiendo así tener un filtro de armónicos más simple.

En Matsui et al. (1996) se presenta un convertidor en alta frecuencia en donde se propone un control utilizando el ángulo de fase para poder controlar de forma natural los dispositivos en el convertidor ubicado en el secundario del transformador. La primera etapa conformada por un puente completo y un transformador de aislamiento funcionando a $16.7\,Khz$. La segunda etapa está conformada por un cicloconvertidor trifásico utilizando 4 interruptores en cada rama.

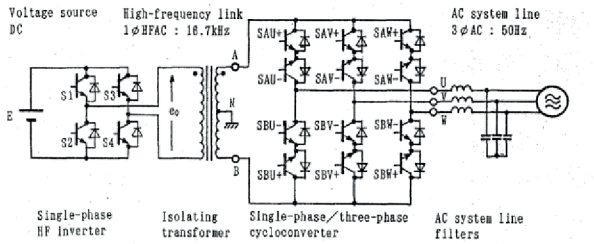



Fig. 8. Topología propuesta en Matsui et al. (1996).

En Krein et al. (2002) se utiliza una topología en la cual la primera etapa consiste en un inversor puente completo que proporciona aislamiento en alta frecuencia y la segunda etapa es también un cicloconvertidor. El objetivo de Krein et al. (2002) es demostrar que la implementación de técnicas PWM de portadora múltiple en el cicloconvertidor, permiten que el inversor opere a alta frecuencia en comparación con las técnicas PWM convencionales. Esto se logra haciendo conmutar el inversor puente completo a una frecuencia elevada, y con la ayuda del uso de dichas técnicas en el cicloconvertidor, poder tener una señal apropiada para el filtro de salida.

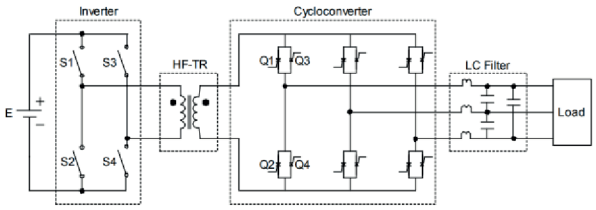



Fig. 9. Topología utilizada en Krein et al. (2002).

En Aganza-Torres et al. (2015) se propone un sencillo esquema de modulación de potencia instantánea que requiere un bajo esfuerzo computacional en comparación con otros esquemas de modulación. A pesar de que el trabajo está enfocado en mejorar la modulación, la topología propuesta tiene pocos elementos de conmutación y el transformador opera a $50\,kHz$. Esta implementación está pensada para aplicaciones de baja potencia.

 ISSN en trámite

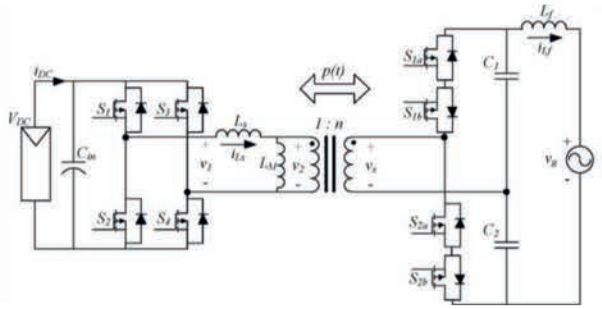


Fig. 10. Topología propuesta en Aganza-Torres et al. (2015).

En la topología propuesta de Abhijit y Vinod (2016), la primera etapa está compuesta por un puente completo con aislamiento galvánico en alta frecuencia y un puente rectificador, y la segunda por un convertidor CD/CA. La corriente en CD extraída del panel pasa por el puente completo cuyos interruptores están operando en alta frecuencia y el transformador de aislamiento es operado a 20 $kHz$. A la salida del transformador se tiene el puente rectificador para que la señal rectificada, mediante el control de los interruptores del inversor, se tenga la señal para alimentar al filtro de salida. Esta topología también implementa una red de amortiguamiento sin pérdidas para reducir la tensión de pico en los de los interruptores, sin embargo, se tienen varias etapas de conversión y demasiados interruptores.

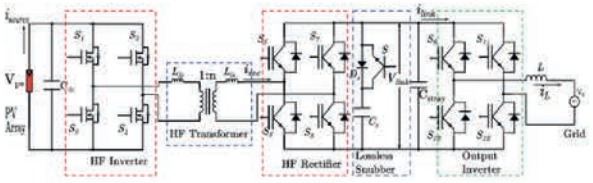



Fig. 11. Topología propuesta en Abhijit y Vinod (2016).

### *2.2 Soluciones en dos etapas con convertidor CD/CA + CA/CA*

Esta familia de soluciones también cuenta con un transformador en alta frecuencia. Se busca de decir el número de etapas al momento de incorporar el aislamiento galvánico en comparación de la primera familia de soluciones. Se cuenta con una etapa de CA/CA donde se emplean diferentes técnicas que buscan reconstruir la señal que sale directamente del transformador de aislamiento a una señal senoidal de 60 Hz.

En Fujimoto et al. (1995) se propone un inversor fotovoltaico de dos etapas: la primera conformada con un puente completo conmutando a alta frecuencia haciendo operar al transformador de aislamiento a una frecuencia de 15.6 $kHz$. La segunda etapa conformada por un cicloconvertidor encargado de reconstruir la señal de salida del transformador.

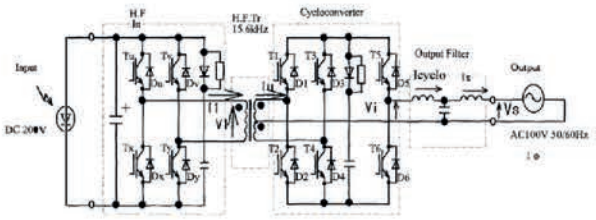



Fig. 12. Topología propuesta en Fujimoto et al. (1995).

En Beristain et al. (2004) se presenta un convertidor multinivel CA/CA para un inversor monofásico con aislamiento de alta frecuencia y capacidad de flujo de potencia bidireccional. En la primera etapa se utiliza un puente completo encargado de hacer operar al transformador de aislamiento a una frecuencia mayor a 60 $Hz$. En el secundario del transformador, mediante el control de los interruptores en las diferentes tomas que presenta el convertidor de salida, se busca realizar regular la tensión de salida y contribuir a la reducción de armónicos en combinación con la operación del filtro de salida.

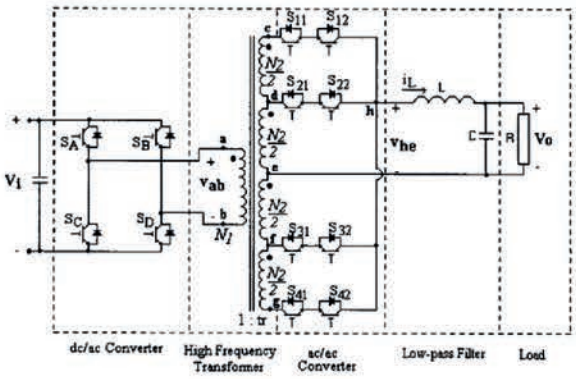



Fig. 13. Topología propuesta de Beristain et al. (2004).

En Brito Fernández (2021) se presenta una topología en la que el objetivo principal de la propuesta es introducir una variante de la modulación PWM tradicional, que permita que el transformador asegure su operación en media frecuencia (al menos 20 veces la frecuencia de red), logrando una adecuada desmagnetización del transformador, independientemente de la frecuencia de la modulación PWM. Dicha estrategia consiste en partir cada pulso de la señal PWM original a la mitad y conseguir a través del convertidor puente completo aplicar tensiones inversas idénticas al primario del transformador, permitiendo operar al transformador de aislamiento a una frecuencia mucho mayor a 60 $Hz$, sin afectar la operación de la técnica de modulación PWM en la primera etapa. Posteriormente y debido a que la señal obtenida en el secundario del transformador no es la adecuada para aplicarse al filtro de salida, la señal es rectificada y después pasa por un "inversor de polaridad" para recuperar la señal PWM que entraría al filtro de armónicos de salida.

 ISSN en trámite

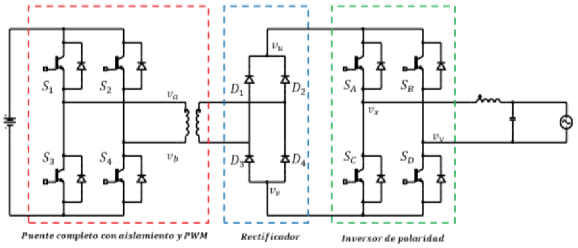



Fig. 14. Topología utilizada en Brito Fernández (2021).

### *2.3 Comparación de topologías*

En la Tabla 1 se muestran las diferentes ventajas y desventajas que muestran las topologías con etapas de conversión CD/CD + CD/CA y etapas de conversión CD/CA + CA/CA anteriormente revisadas.

**Tabla 1. Ventajas y desventajas de las topologías revisadas**

| Solución de convertidor | Referencia | Ventajas | Desventajas |
|---|---|---|---|
| CD/CD + CD/CA | Matsui et al. (1996) | -No hay sobretensión en los en los dispositivos de conmutación | -Requiere un transformador múltiple<br>-Ciclo convertidor trifásico<br>-Cantidad de dispositivos de conmutación |
| | Krein et al. (2002) | -La técnica empleada es simple en comparación que inversores en cascada | -Muchos dispositivos de conmutación PWM en la segunda etapa<br>-Sin implementación experimental |
| | Aganza-Torres et al. (2015) | -Reducido esfuerzo de tensión y número de elementos | -Es válida para aplicaciones de baja potencia<br>-Modulación PWM en la segunda etapa |
| | Abhijit y Vinod (2016) | -Reducidas pérdidas esfuerzos de tensión en dispositivos de conmutación | -Cantidad dispositivos de conmutación PWM en la segunda etapa |
| CD/CA + CD/CA | Fujimoto et al. (1995) | -Control de corriente bidireccional<br>-Buena eficiencia | -Transformador múltiple<br>-Muchos dispositivos de conmutación |
| | Beristain et al. (2004) | -Baja distorsión armónica<br>-Buena eficiencia<br>-Corriente bidireccional | -Transformador múltiple<br>-Cantidad dispositivos de conmutación |
| | Brito Fernández (2021) | -PWM y aislamiento galvánico en una sola etapa | -Muchos dispositivos de conmutación<br>-Sin implementación experimental |

Las topologías de las soluciones reportadas utilizan un puente completo en la primera etapa de conversión; implementan aislamiento galvánico en media o alta frecuencia para conseguir reducir el tamaño del transformador de aislamiento.

Si bien, para las soluciones de convertidores CD/CD + CD/CA utilizan la primera etapa para conseguir el aislamiento, siempre es necesario contar con una segunda etapa enfocada a la implementación de alguna técnica de modulación PWM para reducir la cantidad de armónicos de la señal de salida del transformador de aislamiento, lo cual suele resultar una manera no muy eficiente debido al número de etapas.

En el caso de las soluciones con convertidor CD/CA + CA/CA suelen utilizarse una mayor cantidad de elementos en la etapa de CA/CA, lo cual puede resultar en un convertidor con un mayor volumen al momento de implementarlo y en la mayoría de las ocasiones con mayor complejidad del control.

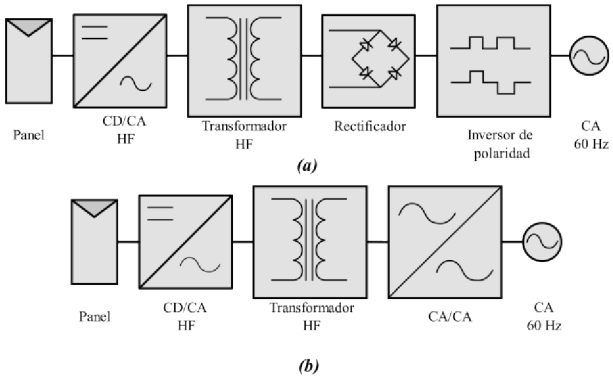



Fig. 15. Diagrama a bloques de Brito Fernández (2021).

La topología de Brito Fernández (2021) tiene la particularidad de resolver el problema integrando el aislamiento galvánico y la modulación PWM en una etapa de conversión, lo cual permite reducir tanto el tamaño del transformador como el filtro de salida. Sin embargo, el contar con un rectificador + "inversor de polaridad" en el secundario del transformador de aislamiento incrementa el número de elementos que en algunas otras topologías revisadas. Simplificar esta topología, específicamente en los bloques de rectificación + "inversor de polaridad" para conformar lo que podríamos llamarle un "Rectificador Selectivo", es un reto abierto para mejorar esta familia de aportaciones. La figura 15 muestra a) el diagrama a bloques de la topología utilizada en Brito Fernández (2021) y b) el diagrama a bloques de una nueva propuesta que podría simplificar significativamente el número de elementos en el convertidor.

## 3. CONCLUSIONES

Se ha presentado un estudio comparativo de diferentes alternativas para aplicaciones fotovoltaicas, enfocadas en hacer operar el aislamiento galvánico en un inversor PWM a una frecuencia mayor a 60 Hz, lo que conlleva una reducción en el tamaño y peso de inversores. Los criterios básicos de comparación de las topologías estudiadas fueron la complejidad

 ISSN en trámite

del control requerido, la cantidad de componentes, así como la posibilidad de operar el transformado en media o alta frecuencia.

Las referencias reportadas utilizan diferentes estrategias con la finalidad de disminuir el tamaño del convertidor y de manera particular el transformador de aislamiento, lo cual permite ya sea tener un menor o mayor número de elementos al buscar la operación del transformador en alta frecuencia, a costa de una mayor complejidad de control en la mayoría de los casos.

Las topologías estudiadas se basan en dos estrategias de solución, siendo la primera el tener una solución en dos etapas con un convertidor CD/CD con aislamiento en alta frecuencia en el que puede implementarse también el MPPT y la segunda etapa tiene un convertidor CD/CA convencional sin aislamiento en el que se puede utilizar sin problema una técnica convencional de modulación PWM ya que esta etapa no incorpora transformador. La segunda familia de soluciones se refiere a diferentes alternativas en las que como primera etapa se propone un convertidor CD/CA que busca incorporar el transformador de aislamiento funcionando a frecuencias cercanas a 15KHz con señales de salida en CA que dependiendo de la configuración propuesta en el convertidor CD/CA, como segunda etapa se implementan variantes de cicloconvertidores, reguladores de tomas y otras estrategias para obtener la señal PWM convencional o incluso discretizar la señal PWM que se obtiene en un inversor después del filtro de armónicos de salida.

Por otro lado, se concluye que existen nuevas oportunidades de mejora para simplificar el diseño de microinversores PWM fotovoltaicos, que busquen topologías menos complejas y permitan aumentar la frecuencia de operación del transformador de aislamiento sin deterioro de la modulación PWM para reducción de armónicos. Este trabajo forma parte de la revisión del estado del arte de la tesis titulada “Mejoras al Volumen de Convertidores CD/CA Aislados para Aplicaciones de Microinversores en Sistemas de Cosecha de Energía”, que se realiza en el grupo de Electrónica de Potencia del CENIDET en la cual se busca mejorar los resultados obtenidos en Brito Fernández (2021), realizados en el mismo grupo de investigación. Con estos resultados se espera tener nuevas y mejores alternativas para contribuir a la simplificación de microinversores para aplicaciones fotovoltaicas.

## REFERENCIAS

Abhijit, K., & Vinod, J. (2016). HF Transformer Based Grid-Connected Inverter Topology for Photovoltaic Systems. *IETE Technical Review*, p.p. 69-75.

Aganza-Torres, A., Cardenas, V., & Pacas, M. (2015). Simple instantaneous power modulation scheme for single-phase high-frequency link microinverter for low-power PV applications. *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 199-204.

Beristain, J., Bordonau, J., Gilabert, A., & Alepuz, S. (2004). A new AC/AC multilevel converter for a single-phase inverter with HF isolation. *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), Vol. 3*, pp. 1998-2004.

Bravo Arche, E. (2016). *Uso de Microinversores en Sistemas Fotovoltaicos con Radiación Solar Reflejada.* Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

Brito Fernández, K. D. (2021). *Análisis de alternativas para aumentar la frecuencia de diseño del transformador de aislamiento de un convertidor CD/CA con modulación SPWM.* Memoria de residencia profesional en CENIDET: Cuernavaca, Morelos: Instituto Tecnológico de Zacatepec.

Fujimoto, H., Kuroki, K., Kagotani, T., & Kidoguchi, H. (1995). Photovoltaic inverter with a novel cycloconverter for interconnection to a utility line. *IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, vol. 3*, pp. 2461-2467.

Kabalci, E., & Boyar, A. (2018). Design and Analysis of a Single Phase Flyback Micro Inverter. *2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)*, pp.1-6.

Krein, P. T., Geng, X., & Balog, R. (2002). High-frequency link inverter based on multiple-carrier PWM. *APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.02CH37335), vol. 2*, pp. 997-1003.

Lloyd H. Dixon, Jr. (2001). Magnetics Design Handbook. Dallas, Texas: Texas Instruments.

Matsui, M., Nagai, M., Mochizuki, M., & Nabae, A. (1996). High-frequency link DC/AC converter with suppressed voltage clamp circuits-naturally commutated phase angle control with self turn-off devices. *IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32*, pp. 293-300.

Surapaneni, R. K., Yelaverthi, D. B., & Rathore, A. K. (2016). Cycloconverter-Based Double-Ended Microinverter Topologies for Solar Photovoltaic AC Module. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol.* 4, pp. 1354-1361.

Yongqing, M., Ying, K., Ziyue, D., Xiuli, W., Xifan W., Ruanming, H., & Rong Y. (2020). A New Modular Multilevel AC/AC Converter Using HF Transformer. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116380-116391.

Yuan, j., Blaabjerg, F., Yang, Y., Sangwongwanich, A., & Shen, Y. (2019). An Overview of Photovoltaic Microinverters: Topology, Efficiency, and Reliability. *IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, pp. 1-6.

# CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

 ISSN en trámite

# Extracción e identificación de flavonoides y terpenoides de Estafiate (*Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana)*

**Melibea Arenas Castañeda[1]. Rocío Alejandra Mata Villanueva[2].**

[1]Instituto Tecnológico de Milpa Alta-TecNM, Milpa Alta, C.P. 12300, Ciudad de México, México
(Tel: (52)5537810820; e-mail: melibea.ac@ milpaalta.tecnm.mx).
[2]Instituto Tecnológico de Milpa Alta-TecNM, Milpa Alta, C.P. 12300, Ciudad de México, México
(Tel: (52)5544954115; e-mail: rocio.mv@milpaalta.tecnm.mx

**Resumen**: En la búsqueda de nuevas alternativas terapéuticas, se estudian diferentes compuestos fitoquímicos. El Estafiate (*Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana*) es una hierba popular mexicana utilizada para tratar infecciones gastrointestinales, problemas respiratorios antiespasmódicos, desparasitante en humanos, incluso para el tratamiento de Diabetes *mellitus* tipo 2, por lo que es considera una planta medicinal. Dentro de los compuestos de mayor importancia en la composición química del Estafiate se encuentran los flavonoides y terpenoides, mismos que presentan actividad farmacológica relevante. Dentro de este estudio se extrajo los compuestos activos del Estafiate a través de maceración con metanol. Se logró identificar la presencia de terpenoides y flavonoides mediante espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) y cromatografía en capa fina (TLC).

***Palabras clave**:* Estafiate, flavonoides, terpenoides, terpenos, TLC, FTIR.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de nuevas alternativas terapéuticas, se estudian diferentes compuestos fitoquímicos, que se encuentran presente en alimentos y plantas comidas (Limón *et al*., 2013). Delgadillo *et al*. (2017) reporta que los extractos de plantas son mezclas complejas de metabolitos secundarios, los cuales han sido empleados por el hombre en el tratamiento de algunas enfermedades. El Estafiate (*Artemisia ludoviciana Nutt. Subp. Mexicana*) es una hierba popular mexicana utilizada para tratar infecciones gastrointestinales, problemas respiratorios antiespasmódicos, desparasitante en humanos, incluso para el tratamiento de Diabetes *mellitus* tipo 2 (Anaya-Eugenio *et al*., 2014; Ezeta, 2016), por lo que es considera una planta medicinal (CONABIO, 2009).

En estudios realizados por Delgadillo *et al*. (2017) se encontró terpineno, linalol, timol y carvacrol en extractos de *A. ludoviciana*, reportando inhibición bacteriana, actividad que se le atribuyen principalmente al carvacrol y timol. Giovannoni (2021) reporta la presencia de terpenoides como limoneno y *p*-cimeno, éste último con actividad bactericida. También se pueden encontrar monoterpenos como alcanfor, borneol y limoneno; sesquiterpenos y flavonoides (De Paz, 2020; Damián, 2007). Estos metabolitos secundarios (MS) o fitoquímicos no son esenciales para la sobrevivencia de la planta, sino que son importantes para la interacción con su ambiente y para su protección contra estrés biótico y abiótico. Un número importante de estos MS son responsables de muchos efectos terapéuticos, lo que resultan de gran importancia en el área farmacéutica, pues cumplen funciones en el cuerpo que pueden promover la buena salud, lo que ha permitido que se encuentren en estudio para la prevención de cáncer, enfermedades del corazón y otras enfermedades (Heyerdahl, 2021; Ramírez, 2020).

Dentro de los MS de mayor importancia en la composición química del estafiate se encuentran los flavonoides y terpenos o terpenoides.

Los flavonoides son el grupo de metabolitos secundarios polifenólicos más abundantes en las plantas. Su estructura consiste en dos anillos aromáticos, A y B, unidos por un puente de 3 carbonos en forma de un anillo heterocíclico (C), generalmente con presencia de un átomo de oxígeno. Las variaciones en este último anillo resultan en las diferentes clasificaciones de los flavonoides (Arce, 2019; Cartaya y Reynaldo, 2001). Los ***flavonoides*** se clasifican de acuerdo con el número de anillos fenólicos. De acuerdo con Limón *et al*. (2013) existen seis grupos principales: 1. ***Los flavanos***, como la catequina, con un grupo -OH en posición 3 del anillo C. 2. ***Los flavonoles***, representados por la quercetina, que posee un grupo carbonilo en posición 4 y un grupo -OH en posición 3 del anillo C. 3. ***Las flavonas***, como la diosmetina, que poseen un grupo carbonilo en posición 4 del anillo C y carecen del grupo hidroxilo en posición C3. 4. ***Las antocianidinas***, que tienen unido el grupo -OH en posición 3, pero además poseen un doble enlace entre los carbonos 3 y 4 del anillo

 ISSN en trámite

C. 5. ***Las isoflavonas***, representados por la Genisteina que tiene dos grupos -OH unidos en la posición 1 y 3 del anillo C. 6. ***Los flavonoides***. Principalmente destaca la taxifolina, la cual se caracteriza por la unión de un grupo –OH al carbono 1, 2 y 3 del anillo C (figura 1). Tienen gran actividad farmacológica en modelos "*in vitro*" tales como: antiinflamatorias, antialérgicas, antibióticas, antidiarreicas y antioxidantes, además presentan excelentes propiedades de quelación del hierro y otros metales de transición (Ramírez, 2020; Terrones, 2018; Cartaya y Reynaldo, 2001). Ekalú & Habila (2020) reportan que las propiedades biológicas y oxidativas de los flavonoides son responsables de su actividad cardioprotectora, antidiabética, de eliminación de radicales libres y anticancerígena.

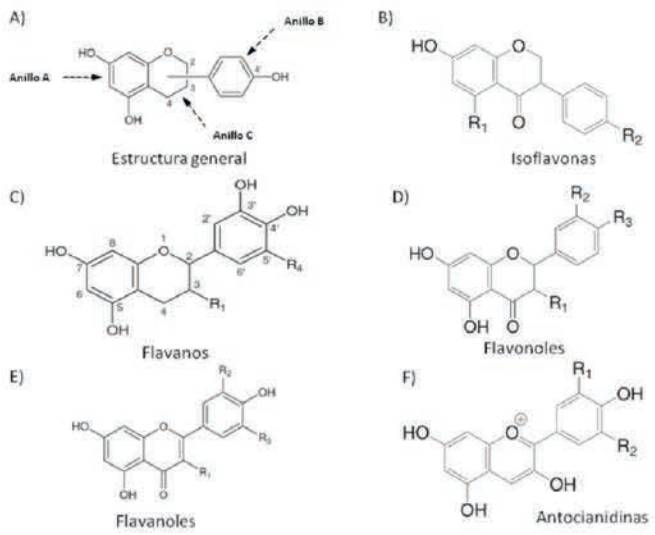



Figura 1. Estructura de los principales flavonoides (Limón *et al*., 2013).

Los terpenos o terpenoides son compuestos orgánicos volátiles producidos principalmente por plantas que presentan un olor fuerte y característico. Químicamente consisten en una estructura de unidades repetitivas de isopreno (2-metilbuta-1,3-dieno) (figura 2), la cual puede encontrarse modificada, por presencia de un oxígeno debido a la oxidación, o bien por reorganización del esqueleto hidrocarbonado, formando lo que se conoce como isoterpenoide o terpenoide. A pesar de esta diferencia, es habitual utilizar la denominación de terpenos para referirse tanto a terpenos como a terpenoides (Giovannoni, 2021).

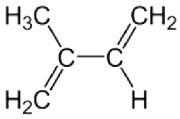



Figura 2. Estructura terpenoide (Giovannoni, 2021).

La tabla 1 muestra la clasificación de los terpenos de acuerdo con el número de unidades de isoprenos contenidas en su estructura.

Tanto los flavonoides como los terpenoides tienen propiedades antisépticas, antifúngicas, antioxidantes, antitumorales y antimicrobiana, siendo los flavonoides los que presentan una mayor actividad antimicrobiana (Bañuelos *et al*., 2018)

**Tabla 1. Clasificación de los terpenos (Adaptado de Almeyda, 2017 y Giovannoni, 2021)**

| Nombre | Unidades de isopreno | Ejemplo |
|---|---|---|
| Monoterpoenos | 2 | Linanol |
| Sesquiterpenos | 3 | Ácido abscísico |
| Diterpenos | 4 | Esteviol |
| Triterpenos | 6 | Ergosterol |
| Tetraterpenos | 8 | β-caroteno |
| Politerpenos | más de 8 | Ubiquinona |

## 2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general:

Extraer e identificar flavonoides y terpenoides de extractos metanólicos de hojas de Estafiate (*Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana*).

*2.2* Objetivos específicos:

Extraer flavonoides y terpenoides de hojas de Estafiate (*Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana*) por medio de maceración con metanol.

Identificar y comprobar la presencia de flavonoides y terpenoides de los extractos de Estafiate (*Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana*) mediante espectrofotometría UV-Vis, Cromatografía en capa fina (TLC) y espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR).

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio**. El trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de Bioquímica del Instituto Tecnológico de Milpa Alta, Independencia Sur No. 36, San Salvador Cuauhtenco, Milpa Alta, C.P. 12300, CDMX (figura 3).

Figura 3. Laboratorio de Bioquímica, ITMA.

**Muestras vegetales**. Se recolectó las hojas (muestras vegetales) de Estafiate (*Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana)* en los poblados de San Salvador Cuauhtenco y San Pablo Ozotepec,

 ISSN en trámite

alcaldía Milpa Alta, CDMX, durante los meses de septiembre y octubre.

**Extracción**. La extracción de flavonoides y terpenoides de Estafiate (*Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana)* se realizó por maceración con metanol en frío, para lo cual se colocó 50 g de muestra vegetal en 400 mL de metanol por un periodo 4 semanas, con agitación periodica. Posteriormente los extractos se concentraron por medio de destilación simple.

**Espectrofotometría UV-vis**. En la identificación de los compuestos activos se midió la absorbancia de los extractos de Estafiate *(Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana)* en un espectrofotómetro Agilent UV-Vis Cary 60 a 280 y 310 nm para flavonoides y 210 y 240 nm para terpenos-terpenoides (Carmona, 2014; Estrada, 2010; Martínez, 2014).

**Cromatografía en capa fina (TLC**). Para identificar terpenoides y flavonoides en los extractos metanólicos (Vallejo-Rosero et al., 2021; Cartaya y Reynaldo, 2001) de estafiate, se realizó una cromatografía en capa fina. Para ello se utilizó placas de gel de sílice ($SiO_2$) 60 F254 de 3.0 x 10 cm (fase estacionaria) y metanol como eluyente o fase móvil. Para la identificación de terpenoides se utilizó el revelador de Liebermann- Burchard y Citrobórico para flavonoides. Los reveladores tienen como finalidad reaccionar con los productos adsorbidos proporcionando compuestos coloreados, puesto que son indicadores fluorescentes que permiten la visualización de los compuestos activos a la luz ultravioleta.

Para determinar el factor de retención (Rf) se aplicó la siguiente expresión:

Rf=distancia recorrida por el compuesto(X)/distancia recorrida por el eluyente(Y)

**Espectroscopia FTIR**. Para la identificación de la estructura química de terpenoides y flavonoides, se realizaron prueba de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR). Se utilizó un espectofotómetro AFTIR-ATR .

## 4. RESULTADOS

La absorbancia para determinar la presencia de flavonoides y terpenoides en los extractos metanólicos se indican en la tabla 2. Estos resultados coinciden con lo reportado por Fernández (2019); Cartaya y Reynaldo (2001), donde a longitudes de onda de 3330 $cm^{-1}$ corresponde al enlace O-H. Los enlaces no polares como C–C, C–H, dan lugar a absorciones débil.
Los MS presentes en el Estafiate (*Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana)* extraídos en los macerados presentan estructuras químicas con dobles y triples enlaces, sistemas aromáticos, grupos carbonilos entre otros, cuya absorbancia se encuentra en la región UV. Los valores de absorbancia (Abs) reportados son directamente proporcional a la concentración de estos compuestos en las muestras de Estafiate.

**Tabla 2. Absorbancia de los macerados de Estafiate (*Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana)*.**

| No. | Muestra | Terpenoides | | Flavonoides | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 210 nm | 240 nm | 280 nm | 310 nm |
| 1 | **Metanol** (M1) Macerado y destilación simple | 0.3447 | 0.2182 | 0.1324 | 0.1328 |
| 2 | **Metanol** (M2) Macerado y destilación simple | 0.3558 | 0.2326 | 0.1399 | 0.1356 |
| 3 | **Metanol** (M3) Macerado y destilación simple | 0.2995 | 0.2036 | 0.1223 | 0.1148 |
| | $\overline{X}$ | 0.3333 | 0.2181 | 0.1315 | 0.1277 |
| | **DS** | 0.0298 | 0.0145 | 0.0088 | 0.0112 |
| | **CV** | 0.0894 | 0.0158 | 0.0671 | 0.0883 |

El análisis por espectroscopia FTIR (figura 4) mostró presencia de grupos O-H (3650-3200 $cm^{-1}$), grupo representativo de fenoles y alcoholes presentes en la estructura química de flavonoides. También resalta la presencia de enlaces C-H (1000-750 $cm^{-1}$), en grupos $–CH_3$ (2960 $cm^{-1}$) muy característico en la estructura de terpenos, ya que están constituidos por dos grupos metilos en su estructura , al igual que el grupo –C=C- de igual manera se encuentran dos grupos carbono-carbono con dobles enlace y por último el enlace C-H (1000- 750 $cm^{-1}$). Bañuelos *et al.,* 2017; Mondragón , 2017)

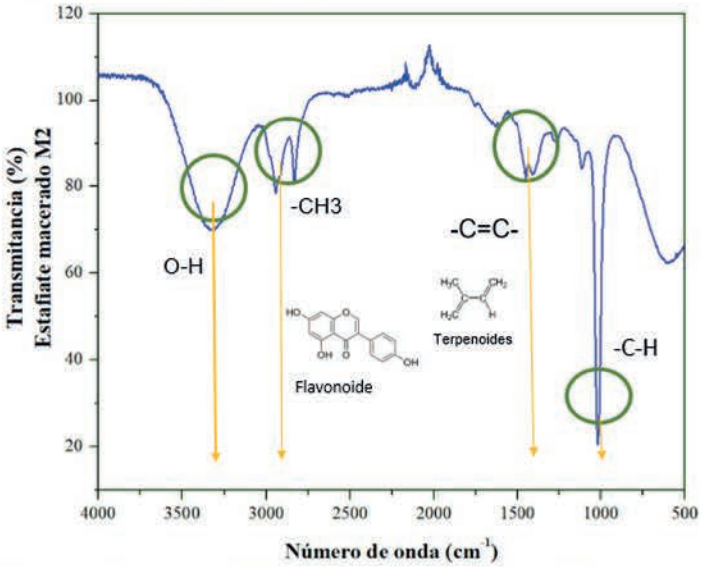



Figura 4. Microscopia FTIR de Estafiate (*Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana*).

 ISSN en trámite

De acuerdo con Bañuelos *et al*. (2018) la espectroscopia FTIR se considera un técnica de alta resolución que proporciona un espectro de reflexión de las bandas de los grupos funcionales de sustancias inorgánicas y orgánicas, permitiendo su identificación. Las frecuencias de FTIR son atribuidas al estiramiento y flexión de vibraciones que caracterizan a los grupos funcionales.

El análisis cromatográfico muestra la elución de los extractos y las distintas coloraciones obtenidas con la aplicación de luz ultravioleta (figura 5 y 6).

Para terpenoides, la TLC mostró tonalidades verdes, lo cual indica la presencias de estos compuestos; resultados que coinciden con lo reportado por Romero (2010). (figura 5).

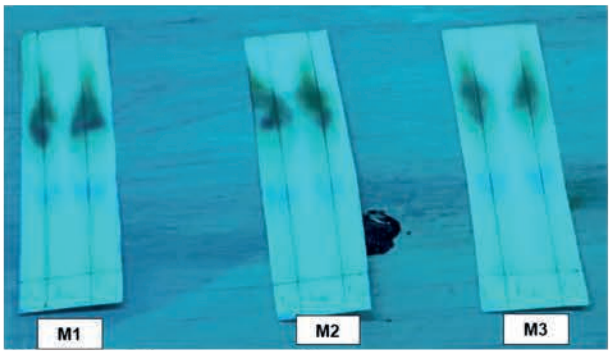


Figura 5. TLC para terpenoides.

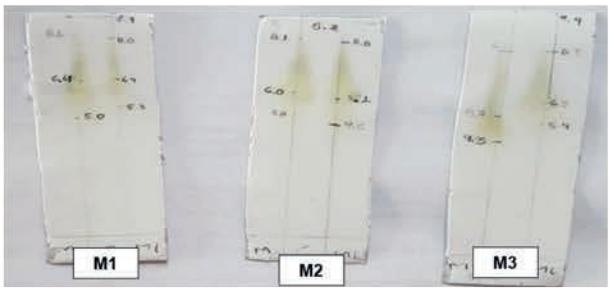


Figura 6. TLC para flavonoides.

De acuerdo con Bravo y Acuña (2015) la solubilidad de los flavonoides depende de la forma en que se encuentran y del número y clase de sustituyentes presentes, por lo que considerando la alta polaridad de la fase estacionaria utilizada (gel de sílice) se sugiere que el color con mayor recorrido corresponde a un compuesto de baja polaridad dentro de la composición total de flavonoides de la muestra. Los flavonoides son compuestos altamente polares, debido al gran número de grupos hidroxilo (-OH) por lo que los resultados de TLC confirman la presencia de estos compuestos en los extractos metanólicos de Estafiate, esto debido a que presentan una mayor retención a los centros activos de la fase estacionaria, mientras que los no polares se eluyen con mayor facilidad. La tabla 3 muestra los valores del factor de retención (Rf) para terpenoides y flavonoides, cuanto más fuerte se une un compuesto a la fase estacionaria adsorbente, hay una menor migración hacia arriba en la placa de la TLC. Como los adsorbentes de la TLC son polares, los compuestos no polares tienden a subir más deprisa por la placa, lo que produce mayores valores de Rf, mientras que los compuestos polares tienden a moverse más despacio e y tienen menores valores de Rf.

**Tabla 3. Determinación de Rf.**

| No | Muestra | Rf |
|---|---|---|
| 1 | Flavonoides* | 0.7037 |
| 2 | Terpenoides** | 0.6392 |

*uso de revelador citrobórico
** uso de revelador Liebermann- Buchard

## 5. CONCLUSIONES

Se confirmó la presencia de grupos fenólicos en los extractos metanólicos de Estafiate (*Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana*) por las técnicas de FTIR y cromatografía en capa fina (TLC).

Los extractos de Estafiate (*Artemisia ludoviciana Nutt. subsp. mexicana*) presenta resultados positivos para los ensayos de terpenoides y flavonoides.

La presencia de terpenoides y flavonoides en Estafiate (*Artemisia ludoviciana)* le confiere efecto terapéutico, derivado de la actividad biológica de estas moléculas.

## REFERENCIAS

Almeyda, A. I. (2017). Estudio de la acumulación de ácido betulínico y urechitol a durante el desarrollo de pentalinon andrieuxii y su relación con la metilación de ADN. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/429/1/PCB_BT_M_Tesis_2017_Almeyda_Augusto.pdf

Anaya-Eugenio, G., Rivero-Cruz, I. Rivera-Chávez, J. y Mata, R. (2014). Propiedades hipoglucemiantes de algunos preparados y compuestos de *Artemisia Ludoviciana Nutt*. *Revista Etnofarmacología*, 155(1): 416-425. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378874114004206

Arce, V. (2019). Extracción y caracterización de los flavonoides obtenidos de la cáscara del fruto de cacao (*Theobroma cacao L.*) para su valorización. Tesis de licenciatura. Universidad de Costa Rica. https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/86154

Bañuelos, V. et., al. (2018). Composición química y FTIR de extractos etanólicos de *Larrea tridenata*, *organum vulgare*, *Artemisa ludoviciana* y *Ruta graveolens*, 52 (3). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140531952018000300309

Bravo, A. V. y Acuña, W. D. (2015). Evaluación fitoquímica y determinación de flavonoides en hojas de *Ficus benjamina L.* Xilema, vol. 28.

 ISSN en trámite

https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/xiu/article/download/599/582

Cartaya, O. Reynaldo, I. (2001). Flavonoides: características químicas y aplicaciones. Redalyc, 22(2). 5-14.https://www.redalyc.org/pdf/1932/193215009001.pdf

CONABIO (2009). http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/asteraceae/artemisia-ludoviciana/fichas/ficha.htm

Damián, L. M. (2007). Efecto antifúngico y antioomiceto de los extractos de plantas medicinales de la región centro occidente de México. Tesis Doctoral. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/3743/1/IIQB-D-2007-0001.pdf

Delgadillo, L., Bañuelos, R., Delgadillo, O., Silva, M. y Gallegos, P. (2017). Composición química y efecto antibacteriano *in vitro* de extractos de *larrea tridentata*, *origanum vulgare*, *artemisa ludoviciana* y *ruta graveolens*. Noca scientia, 9(19). https://www.scielo.org.mx/pdf/ns/v9n19/2007-0705-ns-9-19-00273.pdf

De Paz, N. (2020). Evaluación de un extracto hidroalcohólico de Estafiate (*Artemisia ludoviciana nutt.)* sobre inhibición de eclosión de huevos del nematodo parásito *Haemonchus contortus*. Tesis de Licenciatura, UNAM. http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/110136/TESIS_NATANAEL_REPOSITORIO_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ekalu, A., & Habila, J. D. (2020). Flavonoids: isolation, characterization, and health benefits. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 9(1), 1-14. https://bjbas.springeropen.com/articles/10.1186/s43088-020-00065-9

Ezeta, A. (2016). Determinación de metabolitos secundarios de Estafiate (*Artemisia Ludoviciana Nutt. spp. mexicana*) con actividad fasciolicida y su evolución biológica *in vitro*. Tesis de Maestría, UNAM. http://132.248.9.195/ptd2016/junio/0746154/0746154.pdf

Fernández, L. (2019). Principios activos del aceite esencial de luma chequen (molina) a. gray "arrayan" y evaluación de su actividad antibacteriana. Tesis para optar grado académico. Universidad Nacional De San Agustín de Arequipa. http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/9290/UPfefela.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Giovannoni, S. (2021). Desarrollo de métodos de análisis de terpenos y compuestos terpenoides por cromatografía. Comparación crítica de resultados obtenidos mediante CG y HPLC. Universidad Nacional de la Plata. La Plata, Argentina. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/118511/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Heyerdahl, I. (2021). Revisión sobre las características, propiedades terapéuticas y obtención de flavonoides. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/26319

Limón, D., Mendieta, L., Diaz, A. y Luna, F. (2013). Los flavonoides: mecanismos de acción , neuroprotección y efectos farmacológicos. https://www.researchgate.net/publication/259344548_LOS_FLAVONOIDES_MECANISMO_DE_ACCION_NEUROPROTECCION_Y_EFECTOS_FARMACOLOGICOS

Mondragón, P. (2017). Espectroscopia de infrarrojo para todos y 51 espectros de alimentos consumidos en México. CIATEJ. https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5a43b7c09fdc1.pdf

Ramírez, C. J. (2020). Evaluación de la extracción de flavonoides a partir de la cáscara de naranja. Proyecto integral de Grado. Fundación Universidad de América. Bogotá. http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8180

Romero, M. A. (2010). Extracción, aislamiento e identificación de carbohidratos presentes en el hongo comestible *hericium erinaceum*. Tesis de grado. Universidad de Austral de Chile. http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/fcr763e/doc/fcr763e.pdf

Terrones, E. A. (2018). Extracción de flavonoides de la cebolla roja (*Allium cepa L.*) en un equipo Soxhlet con mezcla de solventes etanol-agua. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional del Callo, Perú. http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/3881

Vallejo-Rosero, Y., Barrios-Corre, L. y Anaya-Gil, J. (2021). La cromatografía en capa fina: una alternativa vigente en la industria farmacéutica. *Revista de Química*, 35(2): 19-25 https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/23788

 ISSN en trámite

# Automatización de un proceso de decorado por tampografía

**Alejandro Cruz Hernández, Alberto Arturo Flores Hernández,**
**José Rodrigo Rosario López, Wendy Aracely Sánchez Gómez.**

*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Matamoros*
*H. Matamoros, Tamaulipas, México*
*{M20261175, alberto.fh, rodrigo.rl, wendy.sg}@matamoros.tecnm.mx*

**Resumen:** El presente escrito describe el procedimiento que se utilizó para automatizar un sistema de decorado de tapas plásticas por medio del proceso de tampografía. La tampografía es un proceso de grabado, el cual transfiere una plasta de pintura en forma de logo, ubicado en una placa metálica llamada cliché a través de una almohadilla plástica llamada pad. Para ello, se debe de tratar la superficie a decorar por medio del flameo por plasma, este proceso se puede realizar de forma manual, pero se necesita 1 a 2 personas por cada máquina asumiendo los riesgos que implica su operación.

En cambio, el sistema para el decorado por tampografía automatizado consta de diferentes dispositivos, los cuales deben de trabajar en sincronía para que permitan desarrollar el proceso de manera eficiente. Los dispositivos con los que cuenta el sistema automatizado son: un Robot de seis ejes, una máquina generadora de plasma de 1000 Watts, 3 máquinas de tampografía, cilindros neumáticos y un PLC (Programable Logic Controller) encargado de controlar a cada uno de estos dispositivos de manera funcional y eficiente.

El resultado de este conjunto de acciones fue el automatizar y diseñar un sistema capaz de integrar todos los aspectos mencionados para la elaboración de un producto, a su vez cuidando los intereses de la empresa, como: implementación de las nuevas tecnologías de la industria 4.0, elaborar un proceso eficiente y rentable, requerir del menor capital humano necesario y cuidar la seguridad de los trabajadores.

*Palabras clave:* Tampografía, Automatización, Decorado, Proceso.

## 1. INTRODUCCION

El desarrollo de nuevas tecnologías y su implementación ha llamado la atención de las grandes empresas en los últimos años debido a que estas innovaciones están asociadas con mayores rendimientos en los procesos a desarrollar. Las innovaciones se han vuelto más asequibles para los inversionistas, por ello, han optado por integrarlas a sus procesos (Armada, 2022). Incluso algunos clientes han determinado que sus proveedores sean usuarios de estas tecnologías y que se integren a la industria 4.0. Por lo tanto, optar por estas innovaciones es esencial para ser competitivos en el mercado.

Los procesos de decorado por tampografía convencionales requieren forzosamente de 1 a 2 operadores por decoradora según (Schrage, 2010). Si la producción es de alto volumen, se necesita de una persona que haga el proceso en una decoradora y otra que inspeccione el producto terminado, causando así que el desempeño en la producción esté totalmente condicionado por el usuario asegura (Gómez, 2014).

Las máquinas de flameo por plasma que se utilizan en el proceso de decorado por tampografía son equipos que transforman un chorro de gas por medio de un arco eléctrico de alto voltaje (Borràs, 2012), el cual representa un equipo de alto riesgo para los trabajadores. Un aspecto importante es el cuidado del bienestar de los operadores, evitando exponerlos ante cualquier tipo de riesgo potencial, como sustancias peligrosas (pinturas y solventes), mecanismos en movimiento (maquinaria) o altos voltajes.

La función de estos equipos es aumentar la energía superficial en la superficie de los materiales. De manera que, cualquier objeto que se desee decorar necesita de un mínimo de 30 Dinas (Unidad de medida de la energía superficial) para adherirse (Rodríguez, 2015).

Debido a que, para producir un alto número de material procesado por tampografía es necesario un gran número de

 ISSN en trámite

operadores, aun sin tomar en cuenta el realizar un proceso previo de tratado de superficies, se optó por desarrollar un sistema automatizado implementando las nuevas tecnologías de la industria 4.0 para elaborar un proceso eficiente, rentable, que necesite del menor capital humano y que proteja la seguridad de los trabajadores.

## 2. DISEÑO DEL PRODUCTO

### *2.1 Planteamiento del problema*

La empresa Cepillos de Matamoros S.A. de C.V. requiere de un sistema automatizado para el decorado por tampografía que deberá de cumplir con una demanda de 1,600,000 piezas anuales, divididas en un pedido cada dos meses. Los clientes hacen requisiciones de las piezas por lo menos 2 años seguidos, con la posibilidad de ampliar las requisiciones hasta por un periodo de 5 años.

Se espera que, para cumplir con lo anterior, el equipo automatizado sea capaz de elaborar un total de 32 piezas por minuto, para cumplir con la demanda bimestral promedio de 270,000 piezas.

### *2.2 Descripción del proceso convencional*

El proceso de decorado por tampografía se realiza mediante la máquina decoradora Aero 90. La cantidad de decoradoras depende de la demanda de material. Cada maquina necesita de una persona para realizar el proceso. La máquina decoradora se muestra en la Fig. 1.

Fig. 1. Máquina Aero 90 en el proceso de tampografía manual

El proceso manual de decorado inicia cuando un operador inspecciona la materia prima, para después aplicarle un proceso de aumento de energía superficial (solo en caso de ser necesario). Después, otro operador introduce el material dentro de su decoradora (Aero 90), para así, accionar el equipo. Una vez que la máquina termina el proceso, el operador remueve la pieza y prosigue con la etapa de inspección, donde otra persona revisa el material decorado y procede a empacarlo o desecharlo. La Fig. 2 muestra el diagrama de flujo del proceso de decorado por tampografía, que para el proceso manual se requiere de 2 operadores, porque se necesitan de dos máquinas Aero 90.

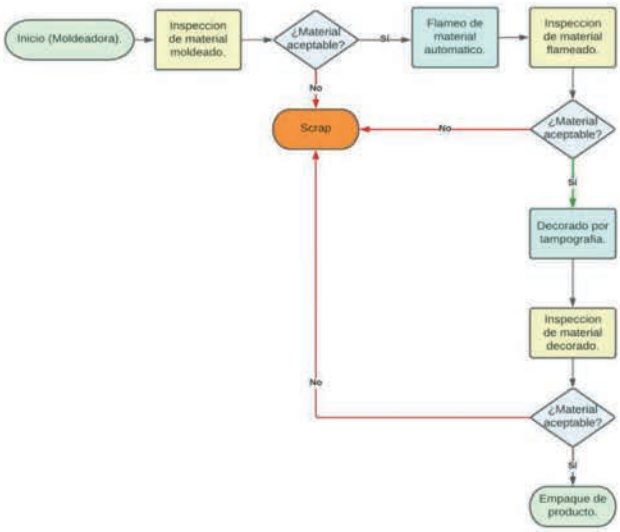



Fig. 2. Diagrama de flujo del proceso de decorado por tampografía

### *2.3 Desarrollo del producto*

Para lograr adherir la pintura en la pieza, es necesario realizar un proceso previo al decorado. El objetivo de este paso es aumentar la energía superficial en el material y lograr la adherencia del decorado a la pieza. Como primera opción, se usó una máquina generadora de plasma manual de 30 watts, la cual es capaz de aumentar la energía superficial de los materiales. EL modelo de la máquina generadora de plasma es la "Plasma etch wand hand-held atmospheric" con ella se logró aumentar la energía superficial de la pieza a decorar de 26 a 44 Dinas y se logró la adherencia de la pintura en un tiempo aproximado de 45 segundos por pieza.

### *2.4 Desarrollo de prototipo*

El primer prototipo se muestra en la Fig. 3, donde se integran las siguientes máquinas y equipos: una decoradora Transtech Aero 90, un robot Yaskawa de 6 ejes, un horno con banda transportadora y una máquina generadora de plasma de 1000W.

Fig. 3. Primer prototipo de máquina automática

 ISSN en trámite

Todos estos equipos están vinculados a un PLC Productivity 2000, con el cual se realiza la secuencia del proceso. El robot sujeta la pieza que se utilizará en el proceso de decorado, mediante una pinza neumática. Después mueve la pieza sobre la flama varias veces para abarcar toda el área de la pieza. Siguiente a eso, el robot coloca la pieza a la estación de decorado. La Fig. 4 muestra la boquilla de la flama eléctrica, es decir, la flama por plasma.

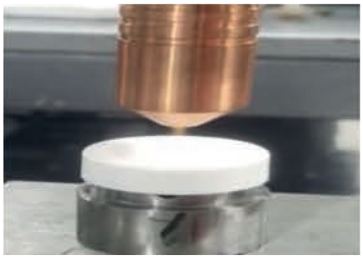


Fig. 4. Boquilla de la flama eléctrica (flama por plasma)

Al soltar la pieza y continuar el robot con su trayectoria, la máquina decoradora inicia su secuencia. Al terminar, el robot toma la pieza decorada y la coloca sobre la banda transportadora con horno, para secar la pintura y terminar el proceso. La Fig. 5 muestra el producto terminado.

Fig. 5. Producto terminado

## 3. SISTEMA AUTOMATIZADO

Las variables que se consideraron en la automatización fueron:

- Asegurar el número de Dinas adecuado mediante el flameo por plasma, sin alterar el aspecto del material.
- Establecer los tiempos de la secuencia de movimiento de los mecanismos y carro transportador.
- Transferencia y adhesión de pintura en el material (Proceso de tampografía) .
- Temperatura del horno y velocidad de la banda para la aceleración del secado de pintura del material.

Se desarrolló un sistema automatizado en el cual se utilizan los siguientes elementos: tres decoradoras Transtech Aero 90, un robot Yaskawa de 6 ejes, un horno con banda transportadora, una máquina generadora de plasma “Plasma etch inline atmospheric” de 1000W, una pantalla HMI Automation direct EA9, además de pistones y mecanismo neumáticos. Todos estos equipos están vinculados a un PLC Productivity 2000 para poder realizar la secuencia del proceso. La Fig. 2 muestra el diagrama de flujo del proceso de tampografía que para el proceso automatizado las maquinas Aero 90 ya no requiere operarios directos.

El proceso inicia en la banda transportadora de alimentación, donde un operador introduce el material, el cual, antes de introducirlo se revisa para detectar posibles desperfectos. Por medio de un pick & place neumático, se toman 3 piezas de la banda de alimentación mediante vacío, para insertarlas al carro transportador de material. Una vez colocadas sobre el carro transportador iniciará la secuencia de flameo por plasma.

Este equipo cuenta con un HMI (human machine interface) mediante el cual permite varias funciones, como iniciar la operación del equipo, detenerlo y hasta revisar el comportamiento del sistema automático.

La secuencia de flameo se desarrolla de la siguiente manera:

– El sistema inicia la secuencia de flameo encendiendo un vacío de aire. Este tiene el propósito de sujetar las piezas mientras son procesadas por el arco eléctrico (plasma).

– Después de sujetar las piezas, el sistema inicia la secuencia del robot.

– Siguiente a eso, el sistema enciende el arco eléctrico de la pistola generadora de plasma.

– El robot tiene integrada consigo la pistola generadora de plasma. De esta forma el robot realiza una rutina de movimiento sobre las 3 piezas insertadas en el carro transportador.

– Al terminar la rutina de movimientos, el sistema apaga la flama y ordena al carro transportador desplazar las 3 piezas procesadas.

La Fig. 6 muestra la secuencia de flameo por plasma mediante un robot.

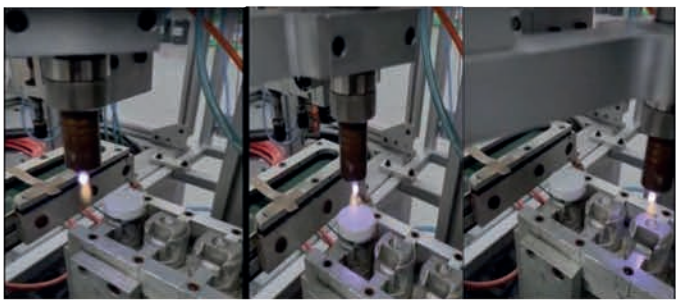


Fig. 6. Secuencia de flameo por plasma mediante un robot

ISSN en trámite

Al mismo tiempo, al iniciar el movimiento del carro transportador de piezas, se reinicia la secuencia de alimentación de material. El carro transportador cuenta con 21 estaciones. Durante el desplazamiento de material se trasladan 3 piezas cada ciclo dando como resultado 7 ciclos de transportación para que el material sea totalmente procesado del sistema.

El sistema automatizado se mantiene realizando las secuencias de alimentación, flameo y transportación de manera cíclica. El sistema cuenta con 3 decoradoras tampográficas. Cada una de ellas realiza de manera independiente la acción de decorar cuando detectan material en su estación correspondiente. La Fig. 7 muestra el panorama general del sistema de decorado por tampografía.

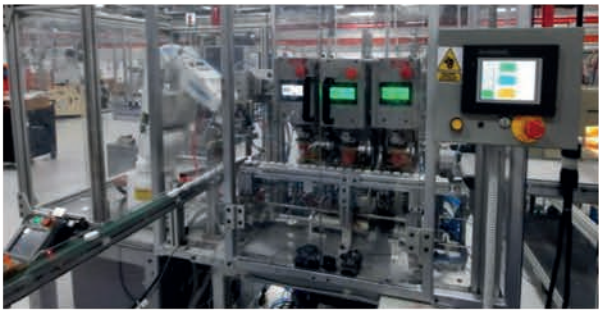


Fig. 7. Sistema automatizado

Todo el material pasa por un horno de secado a 80°C durante 30 segundos, con el fin de acelerar el secado de la pintura adherida al material. La Fig. 8 muestra el horno de secado de piezas.

Fig. 8. Horno de secado de piezas

Por último, el material es inspeccionado por un operador y se empaca para ser llevado al almacén y después al cliente.

Durante la primera corrida trabajada por el sistema automatizado se obtuvo la siguiente información:

– Produce 32 piezas por minuto.

– 1 de cada 256 piezas presentaron problemas de adhesión.

– 1 de cada 256 piezas presentaron algún golpe o daño por la transportación.

Este sistema presentó una alta mejoría a comparación del primer prototipo en el aspecto de calidad y de velocidad de producción. Esto es gracias a la alta repetibilidad de los componentes del sistema y a la ejecución del flameo por plasma sobre 3 piezas a la vez, en lugar de una.

Es de suma importancia identificar las variables de este proceso, ya que, en base a su control, es posible trabajar con un proceso estable y garantizar un producto de calidad. Los aspectos de control más críticos fueron:

– Presión de aire de la pistola de plasma.

– Frecuencia del voltaje de la fuente de poder (MHz).

– Altura de la pistola sobre la pieza.

– Velocidad de la rutina del robot.

– Secuencia de la rutina del robot.

Los parámetros establecidos durante el desarrollo del proceso son: 0.816” pulgadas de la pistola a la pieza, 15 PSI de presión de la pistola y 40 MHz de frecuencia de voltaje de la fuente. La secuencia del robot pasa sobre las piezas 3 veces hasta abarcar la totalidad del área, a una velocidad de 1 m/s. El incumplimiento de dichos parámetros causa defectos tales como: deficiencia de flameo (baja energía superficial) o daños o manchas al material. La Fig. 9 muestra los parámetros críticos del proceso de flameo.

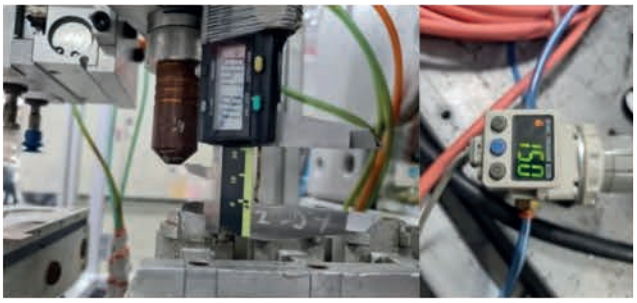


Fig. 9. Parámetros críticos del proceso de flameo.

Para medir la energía superficial se utiliza un plumón dinamómetro, que, al utilizarlo sobre una superficie, aplica un líquido especial. Este fluido se debe mantener de la forma del trazo realizado sobre la pieza. Si es así, la superficie cuenta con la energía superficial que el plumón indica. De lo contrario, la superficie no cuenta con las dinas suficientes. La Fig.10 muestra el fenómeno descrito.

 ISSN en trámite

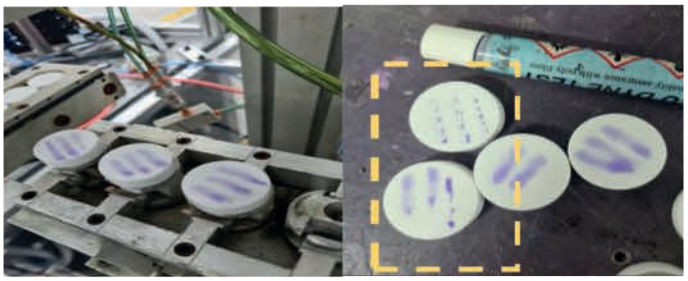


Fig. 10. Prueba de dinas aceptable (> 44 Dinas). Prueba fallida de Dinas (< 44 dinas)

## 4. RESULTADOS

Al finalizar la construcción del equipo automatizado, se tomaron datos de la primera corrida de producción. Además, se armó el escenario de trabajar el mismo producto de forma manual y convencional, los datos obtenidos, así como una comparativa entre ellos que se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1. Datos obtenidos del proceso manual convencional**

| ACTIVIDAD | Maquina manual | Maquina automatizada | % de mejora | Unidad de medida |
|---|---|---|---|---|
| **Costo anual del operador** | *7500* | *7500* | | *DLLS* |
| **Horas anuales del operador** | *2288* | *2288* | | *HRS* |
| **Costo hora / operador** | *3.28* | *3.28* | | *DLLS/HRS* |
| **N° de piezas por orden** | *270000* | *270000* | | *PIEZAS* |
| **Scrap del proceso** | *20%* | *10%* | 50.0% | |
| **N° de piezas totales por orden (incluyendo el scrap)** | *324000* | *297000* | 14.3% | *PIEZAS* |
| **Precio de piezas x millar** | *57.6* | *57.6* | | *DLLS* |
| **Ganancia por orden** | *15552* | *15552* | | *DLLS* |
| **Piezas por minuto del sistema** | *28* | *32* | 14.3% | *PZA/MIN* |
| **N° de operadores** | *4* | *2* | 50.0% | *OPERADORES* |
| **Tiempo estimado para concluir la orden** | *192.86* | *154.69* | 19.8% | *HORAS* |
| **Eficiencia del proceso** | *80%* | *90%* | 12.5% | |
| **Tiempo real para concluir la orden** | *231.43* | *170.16* | 26.5% | *HORAS* |
| **Costo del operador por orden** | *3034.47* | *1115.53* | 63.2% | *DLLS* |
| **Costo de mano de obra sobre utilidad** | *20%* | *7%* | 63.2% | |

La producción de 270000 piezas finales de forma manual requiere de 4 operadores y de 324000 piezas, ya que la eficiencia del proceso manual es del 80%. Este proceso manual elabora 28 piezas por minuto, lo cual requiere de 231.43 horas de trabajo para generar las 324000 piezas totales.

El costo por hora de un operador es de 3.28 dólares, de manera que el gasto total en operadores para elaborar la cantidad total de piezas es de 3034.47 dólar, lo cual representa el 20% del gasto a las ganancial del producto, siendo 15552 dólares la cantidad a la que se le restará el costo total de la mano de obra.

La producción de 270000 piezas finales de forma automática requiere de 2 operadores y de 297000 piezas, ya que la eficiencia del proceso automatizado es del 90%. Este proceso automatizado elabora 32 piezas por minuto, lo cual requiere de 154.69 horas de trabajo para generar las 297000 piezas totales.

El costo por hora de un operador es de 3.28 dólares, de manera que el gasto total en operadores para elaborar la cantidad total de piezas es de 1115.53 dólares, lo cual representa el 7% del gasto a las ganancias del producto.

El sistema automatizado de tampografía es mucho más eficiente que el proceso manual convencional. Esto se debe a lo siguiente:

1.- El proceso automatizado genera 50% menos de scrap que el proceso manual.

2.- El proceso automatizado produce 14.3% más piezas que el sistema manual.

3.- El número de operadores es 50% menor en el sistema automatizado.

 ISSN en trámite

4.- El tiempo estimado necesario para producir una cantidad total de piezas es 19.8% menor en el sistema automatizado.

5.- El sistema automatizado es 12.5% más eficiente que el proceso manual.

6.- El tiempo real necesario para producir una cantidad total de piezas es 25.5% menor en el sistema automatizado.

7.- El costo necesario en mano de obra para fabricar el producto es 63.2% menor en el sistema automatizado.

8.- Se redujo un 63.2% al gasto de mano de obra sobre la utilidad del producto.

Por último, se evaluaron los resultados de los costos por innovación. La Tabla 2 muestra la recuperación de la inversión estimada.

**Tabla 2. Recuperación de la inversión estimada**

| INFORMACION DE COSTOS DE LA INVERSION. | | |
|---|---|---|
| **Capex destinado (inversión inicial)** | 85000 | *DLLS* |
| **Vida del proyecto** | 5 | *AÑOS* |
| **Precio de piezas x millar** | 57.6 | *DLLS* |
| **Costo de operación** | 19000 | *DLLS* |
| **Piezas a producir con la inversión** | 5000000 | *PIEZAS* |
| **Ganancia total bruta** | 269000 | *DLLS* |
| **Costo robot** | 35000 | *DLLS* |
| **Costo máquina de plasma** | 20000 | *DLLS* |
| **Costo equipo eléctrico** | 15000 | *DLLS* |
| **Costo de herramentales y maquinados** | 15000 | *DLLS* |
| **Recuperación de la inversión** | 1.579925651 | *AÑOS* |

Al inicio del proyecto se otorgó un presupuesto de 85000 dólares para el desarrollo. La inversión se dividió de la siguiente manera:

– 15000 dólares en el costo de herramentales y maquinados.

– 15000 dólares en componentes y equipo eléctrico.

– 20000 dólares en el equipo nuevo de plasma.

– 35000 dólares en el costo del robot.

La ganancia total estimada del proyecto, restando el costo de los operadores humanos, es de 269000 dólares. El tiempo necesario para recuperar la inversión con respecto a la inversión inicial es de 1.57 años.

Para este proyecto se utilizó un robot ya adquirido previamente, así que no se requirió de realizar la compra de un robot de seis ejes.

## 5. CONCLUSIONES

Un beneficio de automatizar los sistemas de producción es la repetibilidad del proceso. El uso de un robot de seis ejes para el manejo de un equipo de flameo por plasma mejoró significativamente el proceso, volviéndolo más constante. Además, esta medida fortaleció el cuidado y la seguridad de las personas que trabajan en el proceso.

El sistema automatizado es muy amigable con el usuario, ya que las únicas funciones de las personas a trabajar en el equipo son: a) Introducir material al sistema productivo y b) Revisar el producto terminado.

El sistema automatizado cumplió con todas sus expectativas, demostrando que la automatización es viable en este tipo de procesos industriales. Además, se demuestra que la automatización no es tan costosa como se cree habitualmente, ya que se comprueba que el tiempo de recuperación de la inversión es aceptable.

Por último, y no menos importante el primer autor agradece a la empresa Cepillos de Matamoros S.A. de C.V., donde se realizó el proyecto y una estadía técnica cumpliendo con los requisitos de titulación de la Maestría en Administración Industrial, empleando lo aprendido de la maestría y reforzando la trayectoria de ingeniero mecatrónico en la especialidad de automatización.

## REFERENCIAS

Armada, E. G., 2022. *Los robots y sus capacidades.* Primera ed. Madrid: Los Libros De La Catarata.

Borràs, V. F., 2012. *Optimización de un tratamiento de plasma atmosférico sobre LDPE: Mejora de las propiedades adhesivas de un LDPE mediante optimización de un tratamiento de plasma atmosférico.* Primera ed. s.l.:Editorial Académica Española.

Gómez, C. R., 2014. *Impresión de productos en tampografía. ARGI0310.* Primera ed. Málaga : IC Editorial.

Plasma Etch, 2020. *Plasma Etch Progress Through Innovation.* Available at: https://www.plasmaetch.com/inline-atmospheric-plasma-cleaner.php

Rodríguez, J. C. Á., 2015. *Fenómenos relacionados con la Tensión Superficial: Ejemplos prácticos de Tensión Superficial.* Segunda ed. s.l.:Editorial Académica Española.

Schrage, D., 2010. *Diseño de Componentes Plásticos para el Proceso de Inyección.* Primera ed. Laredo : Lulu.com.

 ISSN en trámite

# IMPLEMENTATION OF A FUZZY SYSTEM IN FPGA FOR THE DETECTION OF MOVING OBJECTS.

**Erik Ruiz Lopez*. Agustin Medina Vazquez**. Marco Gurrola Navarro***. Ivan Padilla Cantoya****. Carlos Bonilla Barragan*****.**

** Dep. Of Electronic Engineering, Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Guadalajara 44430, México*
**e-mail: erik.ruiz5698@alumnos.udg.mx*
***e-mail: agustin.medina@academicos.udg.mx*
****e-mail: marco.gurrola@academicos.udg.mx*
*****e-mail: ivan.padilla@academicos.udg.mx*
******e-mail: alberto.bonilla@academicos.udg.mx*

**Abstract:** In this paper, we present the implementation of a Mandani fuzzy inference method for the emulation of the sensation of movement in the three-dimensional of an object, embedded in an FPGA device. The system currently has a square array of 12 ultrasonic sensors, but more sensors can be added. The data are obtained by the sensors and processed by a fuzzification unit, then data are evaluated using triangular membership functions, fuzzy inference of Max-Min-Iinference, and finally, the center of gravity method is used for defuzzification. The code was synthesized in Altera Quartus-II software. Despite having a large amount of experimental data, in this paper we show significant test cases that demonstrate the correct operation of the system emulating the sensation of the movement of an object in three dimensions. The results are presented in MATLAB graphic interface from the experimental data in real time. Thus, the system operates for objects from 3 cm to 60 cm distance allowing us to determine, in a fuzzy way, the presence and direction of motion of a test object.

*Keywords:* Algorithms, FPGA, Fuzzy logic, Ultrasonic sensors, Verilog.

## 1. INTRODUCTION

In this paper, we propose a solution for detecting and tracking the movement of objects in environments in complete darkness or where the visual media are clearly limited. In this case, we solving the problem using an FPGA. A possible application for this product is in the industrial sector where it is required to perform activities where monitoring the movement of objects is desired, while there is null or low illumination, as in the case of the processing of photosensitive devices and/or high danger to humans. Another possible application environment, although with more requirements and notorious adaptations, is to use this system in people with visual and/or sensory disabilities, this with appropriate actuators. The system proposed here could inform to the user about obstacles present in the environment, even when they are moving. As background, in (Plaza et al., 2016), the authors proposed a system that uses two sensors, one infrared and one ultrasonic which are mounted on a hat and use a haptic glove with 3 motors that provide vibration to manifest the presence of an object. In the case of (Kunz et al., 2018; Wang et al., 2019), the method is useful for people with visual disabilities and mobility problems. In (Dong et al., 2016), a device that controls a robot is presented; used in an environment where human manipulation is dangerous such as in the maintenance of a nuclear reactor. In (Nair et al., 2019) ultrasonic sensors are used for recognition of their environment. A mobile robot, for mapping and localization, with the use of three sensors, generates a 2D grid map. In the work (Orduña et al., 2019), the main background of the present work is found, where the fuzzy controller was designed for the detection of moving objects, but only the feasibility of implementation in an embedded system was proposed.

In this work, we focus on the materialization of the fuzzy algorithm in a FPGA using the Mandani inference method (Zadeh., 1965). As input to the system, an array of ultrasonic sensors was used to obtain the measurements of the distances of the test object when they enter to the measurement range. Because the system has several sensors in a matrix array and due to the separation of each sensor, an area is generated where more than one sensor detects the object due to individual field of view it has. As theory states, fuzzy logic allows the association of more than one area with the same set, increasing and decreasing the degree of membership. This justifies the use of fuzzy logic since the system can determine the distance measured by each sensor and determine the degree of proximity of the object in each case, all this, while the object is in motion. It is important to mention that a Field Gate Programmable

 ISSN en trámite

Array (FPGA) was chosen to implement the algorithm, due to its high processing speed. The FPGA can handle a large number of sensors and actuators simultaneously without slowing down the sensing speed (Sulaiman et al., 2009; Unsalan 2017). The algorithm was written in Verilog language and then synthesized on the FPGA to perform the test cases that validated the correct operation of the proposed system. The measurements obtained are displayed in a graphical interface that we generate in the Matlab environment.

## 2. FUZZIFICATION

Fuzzification is the process of assigning fuzzy values through membership functions to the input variables (Mamdani., 1974), in this case, the distance measured by the ultrasonic sensors. In our case, the universe of discourse is set to 3 - 60 cm, with the intention of using the available sensing range. On the other hand, linguistic values are created, which are the labels of the fuzzy sets. Among the different types of membership functions, the most commonly functions used in practice are triangular, then the assignment of the linguistic terms are “very close”, “close”, neutral”, “far” and “very far” as shown in Fig. 1.

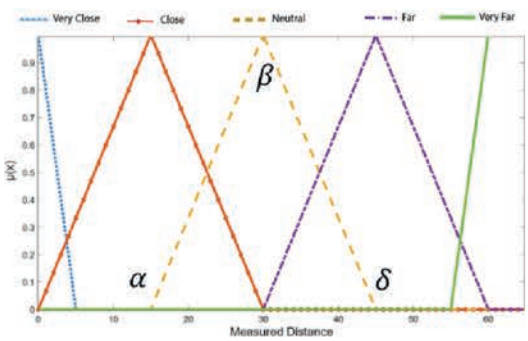



Figure 1. Membership function for the distance.

The triangular membership function is defined by three points, being α at the beginning of the positive slope, β at the vertex that reaches unity, and δ taking the last value of the negative slope, and this can be seen in Fig. 1.

The equations of the triangular membership functions are

$$f(x)=\begin{cases} \dfrac{x-\alpha}{\beta-\alpha} & \rightarrow \alpha \le x \le \beta \\ \dfrac{x-\delta}{\beta-\delta} & \rightarrow \beta \le x \le \delta \\ 0 & if\ it's\ not\ in\ range \end{cases} \qquad (1)$$

As an example, consider we have a value of "35" for distance and we must obtain the membership function calculations with (1). In this case, the distance is between the “neutral” and “far” ranges. The obtained values of the degree of membership in this example are 0.66 and 0.33, and the representation are shown in (2) and (3).

$$Nuetro=\begin{cases} 0 & if & x \le 15 \\ \dfrac{x-15}{15} & if & 15 < x \le 30 \\ \dfrac{45-x}{15} & if & 30 < x \le 45 \\ 0 & if & x > 45 \end{cases} \qquad (2)$$

$$Far=\begin{cases} 0 & if & x \le 30 \\ \dfrac{x-30}{15} & if & 30 < x \le 45 \\ \dfrac{60-x}{15} & if & 45 < x \le 60 \\ 0 & if & x > 60 \end{cases} \qquad (3)$$

Below, we show the Verilog implementation for one of the equations from the previous example, the code is practically the same for the other equations.

```
If (din ≤15)
  neutro=0;
else if ( din > 15 && din ≤ 30)
  neutro = (din – 15) * 7;
else if ( din > 30 && din ≤ 45)
  neutro=(45 – din)*7;
else
  neutro =0;
```

The output membership functions are also triangular. We use five functions. The linguistic term we used are, “Very low”, “Low”, “Medium”, “High” and “Very high”. This is shown in Fig. 2.

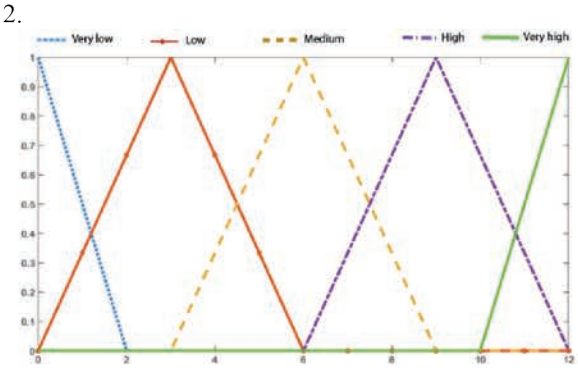



Figure 2. Membership function for the output.

 ISSN en trámite

## 3. RULE EVALUATION

Now we show the linguistic rules created to define the actions to be taken in response to a given set of membership degrees. The numerical results of this computation are called fuzzy outputs and such rules have the structure of relations, which are determined employing the fuzzy if-then rules:

$$\textit{If } x \textit{ is } A \textit{ AND } y \textit{ is } B \textit{ then } z \textit{ is } C \tag{4}$$

That is IF certain causes are met THEN such a consequence occurs.

If sensor 1 is "Very Close", then Actuator 1 is "Very High"
If sensor 1 is "Close", then Actuator 1 is "High"
If sensor 1 is "Neutral", then Actuator 1 is "Medium"
If sensor 1 is "Far", then Actuator 1 is "Low"
If sensor 1 is "Very Far", then Actuator 1 is "Very Low"

The fuzzy rules previously showed, were implemented only for a sensor with its respective actuator. The inference technique we use is Mamdani's minimum-maximum, using the maximum operator to calculate the final degree of the membership function to return the output fuzzy set of each rule. The method is expressed as shown in (5).

$$\mu_{A^K}(y) = \max\left[\min\left[\mu_{S1^K}(X_1, Y_1), \mu_{S2^K}(X_2, Y_2)\right]\right] \tag{5}$$

## 4. DEFUZZIFICATION

Defuzzification is the last stage of the process. Its function is to convert the fuzzy output, resulting from our inference process to a specific numerical value. There is a great variety of methods to carry out this activity; the one that we use was the center of gravity method (Ross et al., 2010). This method consists of multiplying each fuzzy output by its corresponding singleton position. Then, the sum of this product is divided by the sum of all fuzzy outputs to get the final output result.

$$output = \frac{\sum_{x=a}^{b} \mu(x) * x}{\sum_{x=a}^{b} \mu(x)} \tag{6}$$

In order to identify in which area an object is, we use sensors, and depending on the number of sensors detecting the object we obtain the number of linguistic values that will be divided in the universe of discourse, as shown in Fig 2. In our implementation, three areas were created, as shown in Fig. 3. This figure shown the membership function used in this work. Then, the new defuzzification process is carried out. Based in the obtained information, an average of the first output value and the new value of the areas are generated.

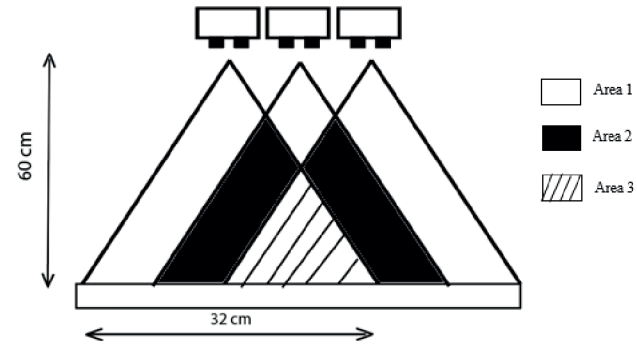



Figure 3. Geometry and arrangement of the sensors.

## 5. IMPLEMENTATION

### *5.1 Ultrasonic Sensor*

The HC-SR04 ultrasonic sensor is a very affordable and easy-to-use proximity/distance sensor that has been widely used for different robotics applications (Guerreroa et al., 2015). The basic operation is to send ultrasonic waves through the emitter, towards an object and reflects on it, measuring the time that elapses until the pulse returns to the receiver. With this, it is possible to determine the distance of an object in a range of 2 to 500 cm for this specific module.

Knowing that the maximum time that takes the measurement cycle of a sensor is 40 milliseconds, this gives us a time of 480 ms for the 12 sensors. The Echo waiting time was progammed to 15 ms, since the maximum distance for the experiment was 60 cm, thus improving the response speed to 180 ms. Given the advantages offered by the FPGA of being able to perform parallel readings, it was necessary to able the measurements one at a time, because if we calling more than one sensor simultaneously, the echo could be received by another sensors giving erroneous measurements.

In order to carry out the experiment, it was proposed to use 12 sensors in a 3x4 matrix formation, as shown in Fig. 4. The distance between sensors was established at 8 cm, the sensor has an effective angle of 15º causing the measurement area to expand to 32 cm at 60 cm as shown in Fig. 3, creating areas where more than one sensor can detect the same object.

 ISSN en trámite

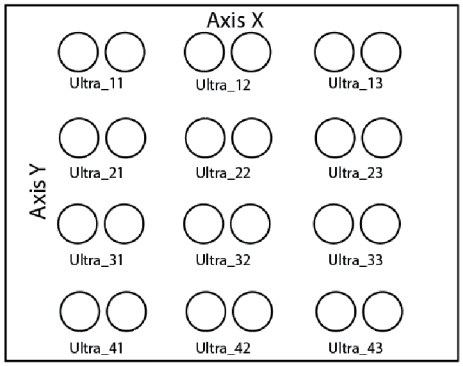



Figure 4. Prototype of the ultrasonic sensor array.

*5.2 Uart Communication interface*

Asynchronous serial communication has been replaced over the years by standards of greater complexity and speed. However, it is still in use, because this is a simple and efficient method for sending and receiving information. Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) is an integrated circuit that is programmed to control the interface from a computer to a connected serial device (Dakua et al., 2015). Fig. 5 shows the pins for a conventional module to make the transmitter.

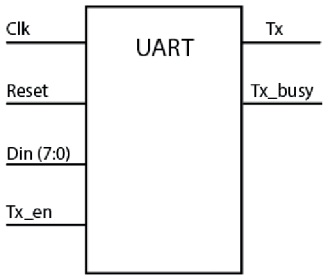



Figure 5. Example of an UART entity module.

The main function of this device is to transmit data resulting from the fuzzy design to the Matlab application. The entity (figure 5) has four inputs and two outputs. The "clk" (50 MHz) and "reset" signals are global system inputs. The 8-bit port "Din" receives the byte to transmit via serial. On the other hand, we must to taking to account that we use Verilog as the programming language in the implementation of the entire system. In this way, to create the code in Verilog, we used a finite state machine, as shown in Fig. 6.

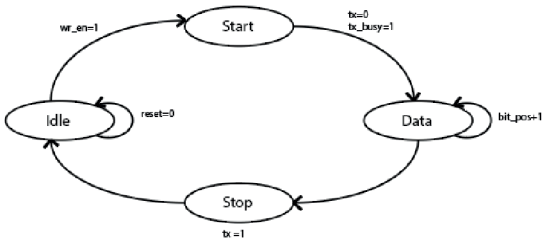



Figure 6. State diagram of UART transmitter.

Analyzing the state machine, the "Start stage" state represents when logic 1 is received at "tx_en" port. In the "Data" state, the UART starts sending bit by bit via the "tx" port. This port is the output pin that transmits data to the computer in serial form. Finally, "tx_busy", sends logic 1 while the transmission is in progress and the UART module does not accept bytes until it is finished. For the "Stop" state, the "tx" signal is set to high to indicate that the module has finished sending information, and finally, returns to the "Idle" state, where all variables are set to zero and the system is ready to start the cycle again.

To establish communication with Matlab, the protocol was configured at 9600 baud, and the calculation of the necessary pulse generator according to the baud rate (M):

$$M = \frac{System\ frequency}{Factor\ of\ baud\ rate \times baud\ rate} \tag{7}$$

*5.3 Implementation in Fpga*

Field-Programmable Gate Arrays (FPGA) are integrated circuits that can be reprogrammed for a specific job or change their requirements after they have been manufactured. As we have to take readings from various sensors, FPGA is one of the most successful technologies for developing systems that require immediate action.

The proposed design was implemented on the FPGA board: EP2C20F484C7 from Altera cyclone II and the code was synthesized in Quartus II. The top module contains the instantiation of sub-modules: ultrasonic, display, fuzzy logic, and UART. The FPGA receives the measurements from the ultrasonic sensor in binary values which we convert to decimal numbers to be sent to the fuzzy module and the display module, the display is used to visualize that the reading is correct and that the sensors are working. At the same time, the fuzzy logic module performs its calculations and then, we call the UART module to send the information in ASCII to the computer. We used 6% of slice LUTs and 2% of the capacity of the card, 64 pins, 20%, for each sensor, we assigned 2 pins for ECHO and trigger signals.

We build a panel on a wooden board, and we install an array of sensors, as shown in the figure 5. Each sensor is labeled with its position in the array. The FPGA assigns a reading time to each sensor and performs fuzzy processing before taking another reading. This is possible thanks to the speed of the FPGA.

## 6. SIMULATION RESULTS

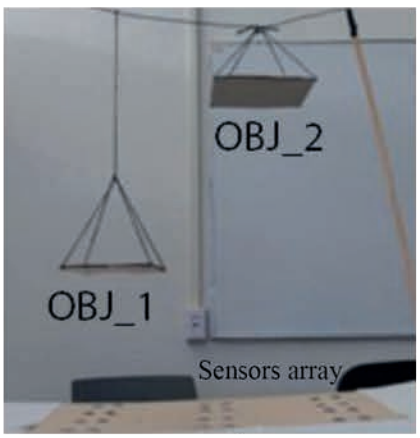
A wide variety of test cases of the system were performed; however, we show below three relevant cases. For the first case, we have 2 square objects, labeled OBJ_1 and dimensions of 10 cm x 10 cm at 17 cm of distance and the other labeled OBJ_2 with dimensions of 15 cm x 15 cm at 40 cm of distance.

 ISSN en trámite

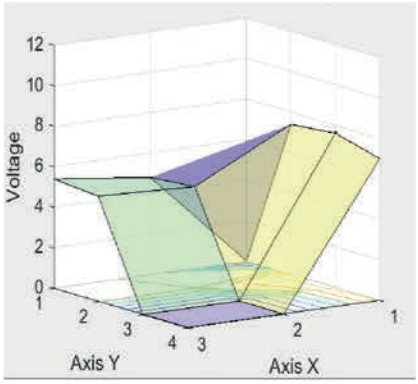
This situation is shown in figure 7a. On the other hand, it can be seen in figure 8b that the two objects have been detected. The magnitude of the voltage represents the distance to the object, and this voltage is obtained according to the calculations of fuzzy logic module.

In this case, for OBJ_1 we have a distance of 17 cm, and based in figure 1, we can observe that it belongs to the linguistic label of "Close" and "Neutral". Given the fuzzy rules that we have proposed, the calculations are performed resulting in the following matrix.

| | | |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 |
| 8.2 | 3.6 | 3.2 |
| 0 | 4.2 | 3.8 |




a)

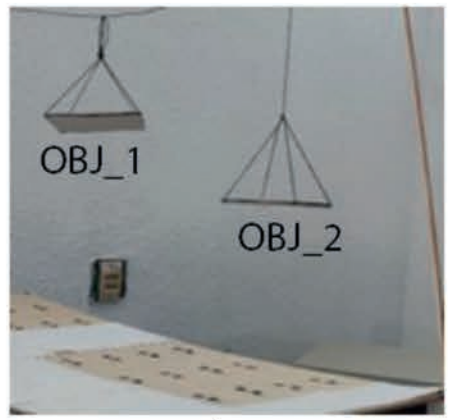



b)

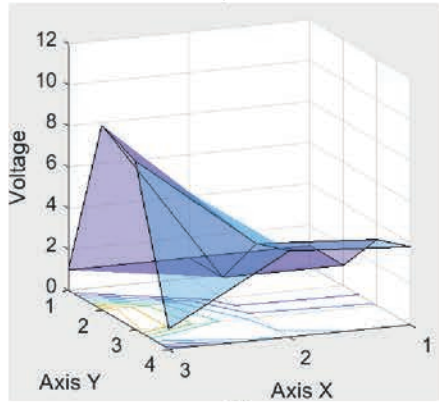
Figure 7. Test case 1, a) Position of OBJ_1 and OBJ_2, b) Results measured and displayed in Matlab for case 1.

For the second test case represented in Figure 8, the same objects were used, but at different distances; OBJ_1 at 35 cm and OBJ_2 at 25 cm resulting in the matrix shown next:

| | | |
|---|---|---|
| 5.4 | 4.8 | 0 |
| 5.2 | 5 | 7.4 |
| 0 | 0 | 7.63 |
| 0 | 0 | 7 |




a)




b)

Figure 8. Test case 2, a) Position of OBJ_1 and OBJ_2, b) Results measured and displayed in Matlab for case 2.

For the last test case, a third object was added at 12 cm of distance. While the other objects were kept in the same position as the previous test and the matrix obtained in the fuzzy process is shown next:

| | | |
|---|---|---|
| 5.4 | 9.7 | 0 |
| 5.2 | 9.6 | 7.4 |
| 0 | 0 | 7.63 |
| 0 | 0 | 6.8 |

## 7. CONCLUSIONS

In this paper, we show the design and implementation of a fuzzy logic algorithm, tacking the signal of 12 ultrasonic sensor. These sensors are accommodated on a wooden board. It is worth mentioning that the system can be increased to more

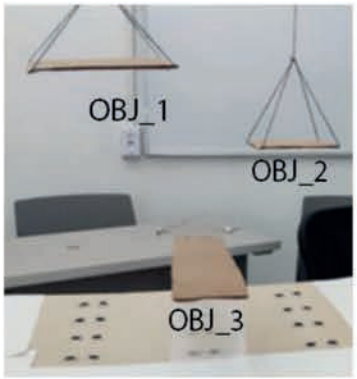
 ISSN en trámite

sensors, depending on the input pin capacity of the FPGA used. The results are visualized in the graphical interface of Matlab by means of an UART interface. On the other hand, we use Verilog language for programming the FPGA.

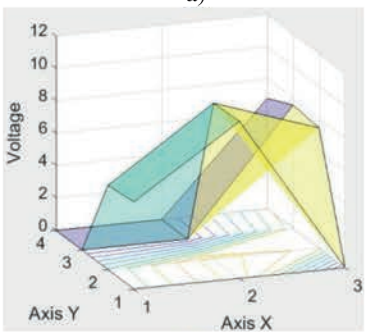
The technique of fuzzy logic was useful for the application since it was possible to detect the areas in which the objects were located. Once the algorithm was implemented on the FPGA, the output was observed through an application developed in Matlab, which gives us an instant and accurate image.

Knowing the position of the object in real time, it is possible to detect the direction of movement and even calculate the speed of the object when it is in motion. This calculation has not been implemented yet, but we consider that knowing the position of the object at each moment and taking a time base, it is possible to obtain the direction and speed of the movement of the objects and due to the fuzzy algorithm, the system experiences "the feeling" that the object leaves one area of influence and enters another and we call this phenomenon “sensation of movement”.

To have a higher resolution or better result of the environment we need to increase the number of sensors and reduce the separation between them, in this way, more areas are generated, allowing us to identify the position of a small object. In this case, we must increase the size of the prototype, but it would be a limitation since the more it increases, the less ergonomic it would be for the end user.




a)




b)

Fig. 9. Test case 3, a) Position of OBJ_1 and OBJ_2, b) Results measured and displayed in Matlab for case 3.

REFERENCES

Dakua B.R., Hossain M.I., Ahmed F. (2015). Design and Implementation of UART Serial Communication Module Based on FPGA. *International Conference on Materials, Electronics & Information Engineering*.

Dong, P., Wang, X., Xing, H., Liu, Y. (2016). Design and control of a tracked robot for search and rescue in nuclear power plant. *International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*, pp. 330-335.

Guerreroa, J.S.G., Gonzáleza A.F.C., Vega J.I.H., and Tovarb L.A.N. (2015). Instrumentation of an array of ultrasonic sensors and data processing for unmanned aerial vehicle (UAV) for teaching the application of the kalman filter. *Procedia Computer Science*, 75, pp. 375-380.

Kunz, A., Miesenberger K., Zeng L. (2018). Virtual Navigation Environment for Blind and Low Vision People. *International Conference on Computers Helping People with Special Needs*. pp. 114–122

Mamdani, E.H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proc IEEE*, 121, pp. 1585-1588.

Nair, S.K.A., Joladarashi, S., Ganesh, N. (2016). Evaluation of ultrasonic sensor in robot mapping. *Proc. Int. Conf. Trends Electron Informat*, pp. 638-641.

Orduña, I., Medina, A.S., Gurrola, M.A., Bonilla, C.A. (2019). Virtual Motion Detection Method Using Fuzzy Logic for an Embedded System. *IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV)*. pp. 80-87.

Plaza, M., Aperador, W., and Cifuentes, A. (2016). Sistema de visión térmica para desplazamiento en personas invidentes y con problemas de movilidad, *Revista Cubana de Investigaciones Biómedica*, 35, pp. 102–111.

Ross, T.J. (2010). Fuzzy Logic with Engineering Applications. *Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd*.

Sulaiman, N.Z., Zeyad, A.O., Mohammad, H.M., Mohd, N.H. (2009). FPGA-Based Fuzzy Logic: Design and Applications a Review. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 1, pp. 456-462.

Unsalan, C., Bora, T. (2017). *Digital System Design with FPGA: Implementation Using Verilog and VHDL*. D McGraw Hill, 1st.

Wang, D., Guo, Y., Liu, S., Zhang, Y., Xu, W., & Xiao, J. (2019). Haptic display for virtual reality: Progress and challenges. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 2, pp. 136–142.

Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8, pp. 338-353.

 ISSN en trámite

# ASPECTOS BIOTECNOLÓGICOS EN EL CRECIMIENTO INICIAL DE *Pinus oaxacana* Mirov EN LA REGIÓN MIXTECA DE OAXACA

**Rosalino Ortiz Barrios*, Octavio Lemuel Cruz Santiago****

*Profesor-investigador-Instituto Tecnológico Superior de San Miguel el Grande Oaxaca, e-mail: ortiz.rosalino90@gmail.com
**Profesor-Ingeniería Forestal-Instituto Tecnológico Superior de San Miguel El Grande Oaxaca (ITSMIGRA). C.P. 71140.

**Resumen.** La asociación micorrízica se establece entre raíces de plantas y hongos específicos, la ectomicorriza es una simbiosis mutualista que incrementa el abastecimiento de nutrimentos a árboles de interés forestal, que repercute en incrementar la tasa de crecimiento y supervivencia de las plantas. El presente trabajo tuvo como objetivo conocer el efecto en la germinación y crecimiento inicial de *Pinus oaxacana* Mirov cuando éste fue inoculado con hongos comestibles ectomicorrízicos. El estudio se realizó en el vivero forestal del Instituto Tecnológico Superior de San Miguel el Grande, se empleó el diseño experimental completamente al azar y se evaluó el efecto de la inoculación ectomicorrízica de *Laccaria laccata* (en polvo y líquido), *Suillus aff. tomentosus,* suelo nativo y sustrato esterilizado en el crecimiento en altura y diámetro. La evaluación del crecimiento se realizó a los 92 días después de la siembra. Las plantas inoculadas con *L. laccata* (líquido) presentaron el valor más alto en altura (4.879 cm), mientras que las plantas inoculadas con *Suillus aff. tomentosus* presentaron el mayor diámetro promedio (0.942 mm); en tal sentido se considera que las especies de hongos silvestres comestibles utilizados tienen potencial biotecnológico como fuente de inóculo en programas de producción de *P. oaxacana* Mirov.

**Palabras clave:** *Ectomicorriza, inóculo, Laccaria laccata, Pinus oaxacana, Suillus aff. Tomentosus.*

## INTRODUCCIÓN

En México, los bosques templados están dominados por géneros de angiospermas y gymnospermas formadores de ectomicorrizas, en específico, el género *Pinus*, representado por 49 especies, casi el 50% de la diversidad mundial (Garibay-Origel *et al*., 2013).

Las coníferas, y en particular el género *Pinus*, necesitan establecer asociaciones simbióticas con hongos ectomicorrízicos incrementan la capacidad de las plantas para absorber, movilizar y traslocar nutrientes como: fosforo, nitrógeno, agua y los micronutrientes del suelo, y de manera inversa las plantas aportan monosacáridos a los hongos (Agerer *et al*., 2012). Sin embargo, estos beneficios, varían con las condiciones ambientales y con la asociación particular de las especies involucradas en la simbiosis mutualista (Barroetaveña *et al*., 2012).

La simbiosis ectomicorrízica es un componente esencial de la mayoría de las comunidades forestales, ya que las especies vegetales dominantes en bosques de coníferas en regiones alpinas y boreales, en muchos bosques de ecosistemas templados y mediterráneos, en grandes áreas tropicales y subtropicales son especies arbóreas ectomicorrízicas (Guarneros, 2017).

Cuando se establece la interacción, los hongos por lo general modifican la morfología de la raíz, desarrollando nuevas estructuras que caracterizan a los diferentes tipos de micorrizas (Aguilera *et al*., 2007). Honrubia (2009) define el concepto de micorriza en un sentido amplio, como una simbiosis no necesariamente mutualística.

En la actualidad, la producción de inoculantes basados en hongos ectomicorrízicos ha cobrado una enorme importancia en los países con tradición forestal, como México, esta biotecnología ha recibido escasa atención, a pesar de su enorme potencial, por tal motivo, es necesaria la generación de conocimientos vinculados con la utilización de hongos ectomicorrízicos nativos, con plantas de interés forestal (Martínez-Reyes *et al.,* 2012).

Hoy en día la bioinoculación con hongos ectomicorrízicos en la producción de plantas ha cobrado gran interés dado la superioridad de las plántulas micorrizadas frente a las no micorrizadas en términos de supervivencia y crecimiento en las reforestaciones, aunque se requiere más investigación, particularmente en el *Pinus oaxacana* Mirov, que es una especie con potencial para reforestación en el estado de Oaxaca. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la germinación de semillas y el crecimiento inicial de *Pinus oaxacana* Mirov en la fase de vivero, en donde grupos de plantas se inocularon con especies diferentes de hongos, *Suillus aff. tomentosus* o *Laccaria laccata.*

 ISSN en trámite

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio.** El experimento se desarrolló en el Laboratorio de Ciencias Biológicas y en el vivero forestal del Instituto Tecnológico Superior de San Miguel el Grande (ITSMIGRA). Se colectó semillas de *P. oaxacana* Mirov., suelo nativo y esporomas del hongo *Suillus aff. tomentosus*, en las inmediaciones del ITSMIGRA. De igual manera se utilizó hongo de la especie *Laccaria laccata* en dos presentaciones: polvo y líquido.

**Material fúngico.** Para la preparación de inoculantes en presentación líquida se cortaron los estípites de los esporomas de *L. laccata* y *Suillus aff. tomentosus*, los píleos frescos fueron molidos con molino eléctrico (Thomas Scientific®, Model 4 Wiley Mill) con agua destilada estéril, en una proporción 1:1 (1 g de tejido en 1 ml de agua destilada).

El inóculo en polvo se obtuvo a partir de los píleos de *L. laccata*, los cuales se cortaron de los estípites, se deshidrataron a 35 °C (deshidratador tipo charola Jersa®, México) y se molieron. Posteriormente, el inóculo en liquido como en polvo se tamizó a través de una malla de 1.19 mm de diámetro de abertura, para homogeneizar el tamaño de las partículas. El inóculo así obtenido se depositaron en bolsas de plástico con sello hermético y se almacenó a 5 °C hasta su utilización.

**Viabilidad de la semilla.** Se llevó a cabo mediante el método de viabilidad por flotación (Huerta-Paniagua y Rodríguez-Trejo, 2011), consistió en agregar 200 semillas a un vaso de precipitado con 500 ml de agua estéril y se dejó remojar por 24 h.
El porcentaje de viabilidad se calculó con la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de viabilidad}(\%)=\frac{(\text{Número total de semillas - Número de semillas flotantes})}{\text{Número total de semillas}}*100$$

Las semillas viables antes de la siembra fueron esterilizadas con peróxido de hidrógeno ($H_2O_2$) al 30% durante 20 minutos y se enjuagaron tres veces con agua destilada estéril bajo condiciones asépticas (Martínez-Reyes *et al.*, 2012; Hernández, 2016).

**Diseño experimental.** Se estableció de acuerdo a un diseño completamente aleatorio (DCA) con los tratamientos siguientes: T1= plantas inoculadas con *S. aff. tomentosus*, T2= plantas inoculadas con *L. laccata* en líquido, T3= plantas inoculadas con *L. laccata* en polvo, T4= plantas inoculadas con suelo nativo, y T5= plantas en sustrato esterilizado (testigo). Cada tratamiento se formó por 24 réplicas y un total de 120 unidades experimentales, cada una constituida por tres semillas para la etapa de germinación.
A los 92 días de la siembra se realizó una depuración dejando una planta por cavidad de la charola (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Semillas sembradas, plántulas germinadas y plantas evaluadas para el crecimiento inicial.

| Tratamiento | Semillas sembradas (n) | Semillas germinadas (n) | Plantas evaluadas para crecimiento inicial (n) |
|---|---|---|---|
| T1 | | 33 | 24 |
| T2 | | 40 | 24 |
| T3 | 60 | 19 | 19 |
| T4 | | 9 | 9 |
| T5 | | 27 | 24 |
| TOTAL | 300 | 128 | 100 |

**Hipótesis**

H0: Todos los tratamientos tuvieron el mismo efecto en la variable diámetro y altura inicial de *Pinus oaxacana* Mirov.
Ha: Al menos un tratamiento tuvo efecto diferente en la variable diámetro y altura inicial de *Pinus oaxacana* Mirov.

**Preparación y esterilización del sustrato.** El sustrato COLPOS (Martínez-Reyes *et al.*, 2012) consistió en una mezcla de arena de río, corteza de pino pulverizada y suelo forestal a una proporción 2:2:1. La esterilización del sustrato se realizó dos veces a baño María a 125 °C durante 4 horas y se dejó reposar durante 24 horas. Los contenedores fueron charolas de 24 cavidades de 125 $cm^3$, que se esterilizaron mediante inmersión durante 24 horas en una solución al 0.5% de hipoclorito de sodio (NaClO) preparada a partir de diluir a 1/10 un producto comercial. Posteriormente las charolas se enjuagaron con agua potable, y entonces se vació el sustrato.

**Siembra e inoculación de la semilla.** La siembra se realizó de forma directa colocando tres semillas por cavidad a una profundidad de 2 cm, con ayuda de una pipeta se realizó la inoculación del hongo ectomicorrízico de forma simultánea con la siembra bajo el esquema del Cuadro 2. El ambiente para la germinación de semillas y crecimiento de plantas fue en condiciones de vivero tradicional cubierto de malla sombra de monofilamento plano al 50% para protección del área de producción.

 ISSN en trámite

**Cuadro 2.** Cantidad de semillas e inóculo por tratamiento.

| Tratamiento | Cantidad de inoculo por replica | Replicas | Semillas por Replicas |
|---|---|---|---|
| *S. aff. tomentosus* | 3 g | | |
| *L. laccata* polvo | | | |
| *L. laccata* líquido | 3 ml | 24 | 3 |
| Suelo nativo | 20 g | | |
| Testigo | Sustrato estéril | | |

Una muestra de suelo nativo, antes de la siembra se llevó a laboratorio para observar los morfotipos de las micorrizas presentes y así asegurar el éxito de la inoculación.

**Riegos y crecimiento vegetal**. Durante el proceso de germinación y crecimiento inicial de *P. oaxacana* Mirov. se efectuó un riego periódico de 5ml de agua cada tres días por replica de cada tratamiento.

Las plántulas se desarrollaron durante tres meses a partir de la siembra, posteriormente se midieron a 100 plántulas su altura y diámetro con ayuda de un calibrador vernier digital (MIYUTOYO®, modelo 500-196-30 CD6).

**Análisis estadístico.** Se realizó el análisis de varianza mediante el procedimiento PROC ANOVA (Hernández, 2016) con el software estadístico Stattistical Analysis System (SAS Institute, 1999), bajo el modelo estadístico lineal para un diseño completamente al azar:

$$Y_{ij} = U_i + E_{ij} \qquad i=1,2,\ldots,t \qquad j=1,2,\ldots,r$$

Donde:
$Y_{ij}$= observación de la J-ésima unidad experimental del i-ésimo tratamiento
$U_i$= media del i-ésimo tratameinto
$E_{ij}$= error experimental de la unidad *ij*

Se compararon las medias con la prueba de rango múltiple de Duncan ($P \leq 0.05$), la cual permite comparar las medias de los t niveles de un factor después de haber rechazado la Hipótesis nula de igualdad de medias mediante la técnica ANOVA:

$$R_p = q_{\propto p}; p, N - I\sqrt{\frac{\hat{S}_R^2}{n}} \qquad p=2,3,\ldots,I$$

Donde:
$q_{\propto p};p$,N - I es el punto crítico del rango estudentizado basado en la comparación de la media mayor y la menor de *p* medias.
$\hat{S}_R^2$ es la varianza residual con N – I grados de libertad.
$\propto p$ es el nivel de significación conjunto relativo a *p* medias consecutivas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Prueba de viabilidad

Mediante la inmersión de semillas de *Pinus oaxacana* Mirov en agua, el 13% de éstas flotó, las que se consideraron vanas. Mientras que 87% de las semillas quedaron sumergidas, lo que se considera una estimación rápida de las semillas que tuvieron más posibilidad de ser viables con mayor capacidad germinativa.

### Capacidad germinativa

Se realizó mediante el conteo de las semillas germinadas y plantas obtenidas a los 92 días después de la siembra. El porcentaje de germinación promedio de *P. oaxacana* fue de 35.55 %, teniendo el máximo porcentaje (55.55%) de semillas que germinaron en las establecidas en el sustrato que se aplicó *L. laccata* líquido, mientras que en el grupo de semillas que estuvieron en suelo nativo, germinó el 12.5% de éstas (Figura 1).

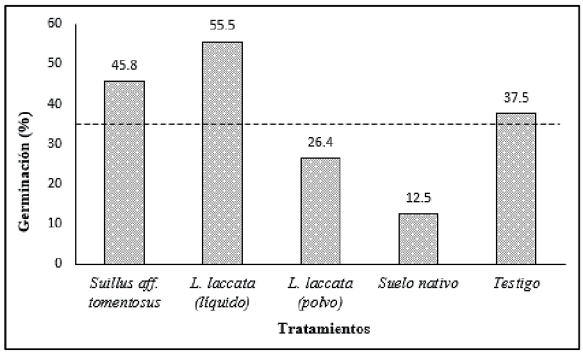



**Figura 1.** Capacidad germinativa de semillas de *Pinus oaxacana* inoculados con hongo micorrizico.

### Crecimiento en altura

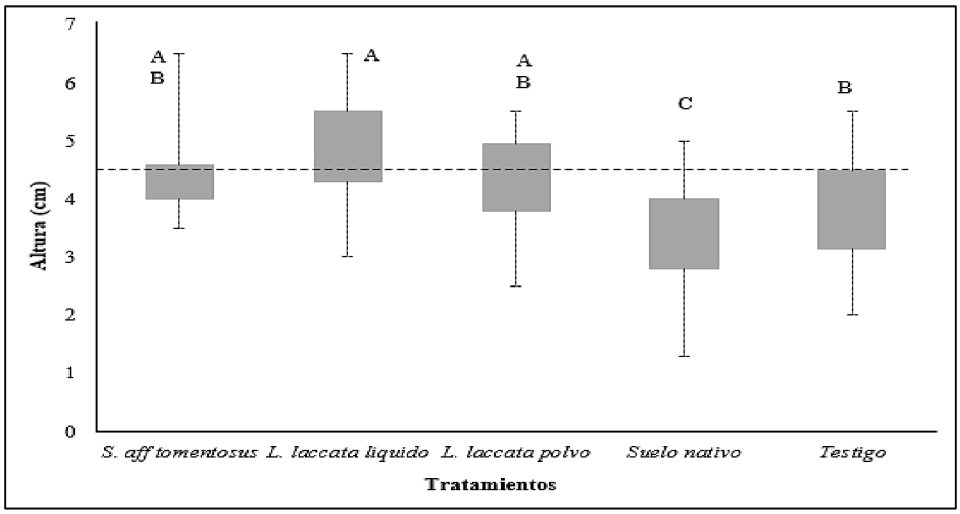
Los resultados de análisis de la varianza (Cuadro 3) indica que los tratamientos tuvieron efectos diferentes significativos ($P<0.0001$) en la altura de las plantas. Este resultado hace referencia que al menos un sustrato provee las mejores condiciones para el crecimiento en altura de *Pinus oaxacana* con inoculo en la fase de vivero.

 ISSN en trámite

**Cuadro 3.** Análisis de varianza del crecimiento en altura de *Pinus oaxacana* Mirov.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | F-valor | Pr > F |
|---|---|---|---|---|---|
| Modelo | 4 | 26.3185 | 6.5796 | 7.97 | <.0001 |
| Error | 95 | 78.4433 | 0.8257 | | |
| Total | 99 | 104.7619 | | | |

Las plantas a las que se aplicó el tratamiento con inóculo de *Laccaria laccata* (T2) en su presentación en líquido, tuvieron altura promedio de 4.879 cm, en definitiva, que fue 26.8% y 55.7% superior y significativamente diferente (Duncan, 0.05) a las alturas de plantas que estuvieron en los sustratos de suelo nativo (T4) y sustrato esterilizado (T5) respectivamente. Estos datos indican que la adición de inoculo representa un incremento en el crecimiento en altura (Figura 2).




* Misma letra no son significativamente diferentes (Duncan, 0.05).

**Figura 2.** Crecimiento en altura promedio por tratamiento.

**Crecimiento en diámetro**

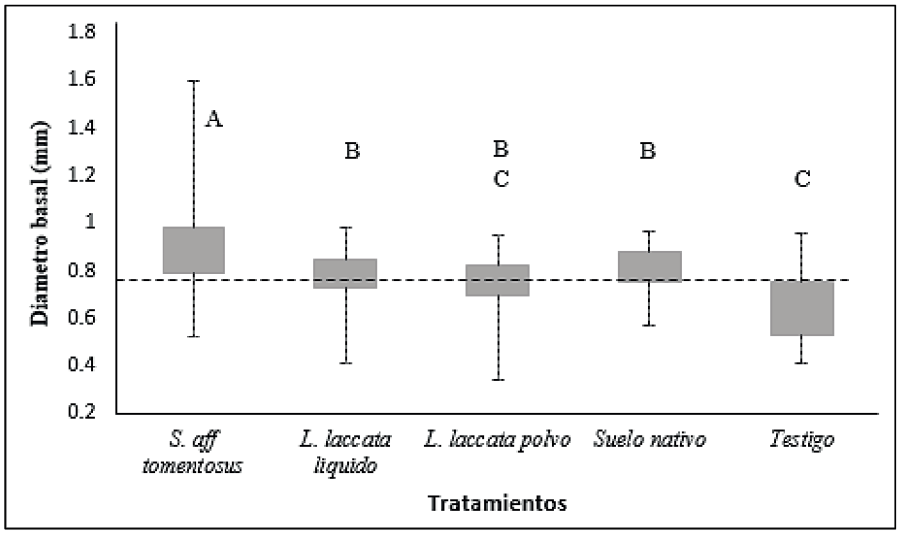
El análisis de la varianza muestra que existe diferencias estadísticas significativas (P<0.0001) en el crecimiento en diámetro de las plantas (Cuadro 4). Este resultado hace referencia que al menos un sustrato provee las mejores condiciones para el crecimiento en diámetro de *Pinus oaxacana* con inoculo en la fase de vivero.

**Cuadro 4.** Análisis de varianza del crecimiento en diámetro de *Pinus oaxacana* Mirov.

| Fuentes de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | F-valor | Pr > F |
|---|---|---|---|---|---|
| Modelo | 4 | 1.1489 | 0.2872 | 9.61 | <.0001 |
| Error | 95 | 2.8383 | 0.0298 | | |
| Total | 99 | 3.9872 | | | |

Las plantas en el tratamiento que corresponde a *Suillus aff. tomentosus* (T1) presentaron 0.94 mm de diámetro, magnitud que fue 48.26% superior y significativamente diferente (Duncan, 0.05) al diámetro de tallo de las plantas que estuvieron en el sustrato esterilizado (T5). Con este resultado se demuestra que la adición de inoculo como componente de los sustratos mejoro las condiciones para el desarrollo de las plantas (Figura 3).

 ISSN en trámite




* Misma letra no son significativamente diferentes.

**Figura 3.** Crecimiento en diámetro promedio por tratamiento.

## DISCUSIÓN

Alba-Landa *et al*. (2003) compararon la germinación de semillas de *Pinus oaxacana* Mirov de tres procedencias, y obtuvieron que entre 15 y 30% de las semillas germinaron. En la presente investigación se encontró 55.5% de germinación para las especies inoculadas con hongo *L. laccata* en su presentación líquida.

Ma *et al.* (2008) infieren que las micorrizas promovieron el crecimiento en altura y diámetro del cuello de la raíz, pero también mayor cantidad de raíces.

La zonificación ecológica de *Pinus oaxacana* Mirov realizado por Picazo *et al.* (2015) con la aplicación de modelos de simulación del efecto del cambio climático, sugiere que se esperan cambios en la superficie de distribución en el estado de Oaxaca, considerando que se tiene que adaptar a esas condiciones o se tendría que buscar nuevas áreas en donde se desarrolle mejor dicha especie.

Martínez-Reyes *et al.* (2012) mostraron en *Pinus gregii* Engelm tanto el peso seco de la parte aérea y de la raíz, altura y diámetro del tallo así como el contenido total de N, P, K, Ca y Mg, fueron mayores en las plantas inoculadas con el hongo comestible *Hebeloma mesophaeum* con respecto a las plantas no inoculadas.

Gómez-Romero *et al.* (2013) evaluaron altura, diámetro de la base, cobertura, número de ramas y porcentaje de supervivencia, demostraron que los pinos que se establecieron en campo fueron inoculados con *Pisolithus tinctorius* presentaron mayor crecimiento en todas las variables en comparación a árboles no inoculados.

Carrera-Nieva y López-Ríos (2004) evaluaron el crecimiento en condiciones de invernadero en plantas de *P. patula* y *P. greggi* que se inocularon con *Lacaria laccata, Suillis pseudobrevipes* y *Boletus clavipes*, observando que estas plantas alcanzaron mayores alturas, peso seco y diámetro del tallo, en comparación a plantas no inoculadas.

Barragán-Soriano *et al* (2018) evaluaron el diámetro del tallo en plantas de *Pinus montezumae* bajo condiciones de invernadero inoculadas con el hongo ectomicorrízico comestible *Hebeloma mesophaeum* (Hm), solo y en combinación con las bacterias *Cohnella sp.* (C) o *Azospirillum brasilense* (Ab) determinaron que dicha variable incrementó en mayor medida en las plantas inoculadas tanto con Hm como en las plantas con Hm + C y Hm + Ab en comparación a las plantas no inoculadas.

## CONCLUSIONES

Semillas de *P. oaxacana* Mirov establecidas en sustrato en que se aplicó el hongo *Laccaria laccata* en líquido, el 55.5 % de éstas germinó, mientras que las semillas establecidas en suelo nativo y en sustrato esterilizado 12.5 y 37.5% de las semillas germinó, respectivamente. Lo que evidencia que la utilización de hongos ectomicorrícicos son fundamentales para obtener buenos resultados en la germinación.

La adición de inóculo, de los hongos ectomicorrícicos mejoró significativamente el crecimiento en diámetro y altura de las plántulas. Las plantas de *P. oaxacana*, que estuvieron en el sustrato en que se aplicó *Suillus*

 ISSN en trámite

*aff. tomentosus* alcanzaron los diámetros mayores, mientras que las plantas en el sustrato en que se aplicó *L. laccata* en presentación líquido, alcanzaron las alturas mayores en condición de vivero.

Debido al efecto registrado, se considera que las especies de hongos silvestres comestibles *Suillus aff. tomentosus* y *L. laccata* tienen potencial biotecnológico como fuente de inóculo en programas de producción de *P. oaxacana* Mirov.

## AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento al proyecto "Aspectos biotecnológicos y de biodiversidad ectomicorrízica de *Pinus oaxacana* Mirov en la región Mixteca de Oaxaca" con clave de registro 7486.19-P

Al Instituto Tecnológico Superior de San Miguel el Grande por las facilidades brindadas para el desarrollo de la investigación.

## LITERATURA CITADA

Agerer, R., A. Hartmann, K. Pritsch, S. Raidl, M. Schloter, R. Verma y R. Weigt 2012. Plantas and their ectomycorrhizosphere: Cost and benefit of symbiotic soil organisms. Growth and Defence in Plants. Resource Allocation at Multiple scales (Ecological Studies). 213-242 pp.

Aguilera, G., L. I., V. Olalde P., M. Rubí A., y R. Contreras A. 2007. Micorrizas arbusculares. Revista Ciencia Ergo Sum. 14(3):300-306.

Alba-Landa, J., L. Mendizábal-Hernández y A. Aparicio-Rentería. 2003. Estudio de germinación y plántulas de tres poblaciones de *Pinus oaxacana* Mirov de México. Foresta Veracruzana 5(1):33-38.

Barragán-Soriano, J. L., Pérez-Moreno, J., Almaraz-Suárez, J. J., Carcaño-Montiel, M. G., & Medrano-Ortiz, K. I. (2018). Inoculation with an edible ectomycorrhizal fungus and bacteria increases growth and improves the physiological quality of *Pinus montezumae* Lamb. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 24(1), 3-16. doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.01.010

Barroetaveña, C., V. N. Bassani y M. Rajchenberg. 2012. Inoculación micorrícica de *Pinus ponderosa* en la Patagonia Argentina: colonización de las raíces, descripción de morfotipos y crecimiento de las plántulas en vivero. BOSQUE. 33(2):163-169.

Carrera-Nieva, A., y G.F. López-Ríos. 2004. Manejo y evaluación de ectomicorrizas en especies forestales. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 10(2): 93-98.

Garibay-Origel, R., E. Morales-Marañon., M. Domínguez-Gutiérrez y Flores-García., D. 2013. Caracterización morfológica y genética de las ectomicorrizas formadas entre *Pinus montezumae* y los hongos presentes en los bancos de esporas en la Faja Volcánica Transmexicana. Revista Mexicana de Biodiversidad. 84:153-169.

Gómez-Romero., M., J. Villegas., C. Sáenz-Romero., y R. Lindig-Cisneros. 2013. Efecto de la micorrización en el establecimiento de *Pinus pseudostrobus* en cárcavas. Madera y Bosques. 13(3):51-63.

Guarneros H., A. M. 2017. Impacto del manejo forestal intensivo sobre la diversidad de los hongos ectomicorrízicos en un bosque de coníferas en la región de Chignahuapan, Puebla, México. Tesis de maestría. Universidad autónoma de Tlaxcala.127p.

Hernández S., F. 2016. Biotecnología, etnomicología y mesosfauna asociada con hongos ectomirrízicos comestibles en la Mixteca Oaxaqueña. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. México. 217 p.

Honrubia, M. 2009. Las micorrizas: una relación planta-hongo que dura más de 400 millones de años. Anales del Jardín Botánico de Madrid. 66S1:133-144.

Huerta-Paniagua, R., y D.A. Rodríguez-Trejo. 2011. EFECTO DEL TAMAÑO DE SEMILLA Y LA TEMPERATURA EN LA GERMINACIÓN DE *Quercus rugosa* Née. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 17(2): 179-187.

Ma, L., X. Wu, and L. Zheng. 2008. Mycorrhizal formation of nine ectomycorrhizal fungi on poplar cuttings. Front. For. China. 3(4):475-479.

Martínez-Reyes, M., J. Pérez-Moreno., L. Villarreal-Ruiz**.,** R. Ferrera-Cerrato**.,** B. Xoconostle-Cázares**.,** J. J. Vargas-Hernández**., y** M. Honrubia-García. 2012**.** Crecimiento y contenido nutrimental de *Pinus greggii* Engelm. inoculado con el hongo comestible ectomicorrizico *Hebeloma mesophaeum* (Pers.) Quél**.** Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente. 18:183-192.

ISSN en trámite

Picazo O., E J., J.C. Leyva L., P. Zamora M., y J. Martínez de la C. 2015. Zonificación ecológica de *Pinus oaxacana* Mirov y aplicación de modelos de simulación del efecto del cambio climático. Revista Mexicana de Agroecosistemas. 2(1): 29-39.

Statistical Analysis System Institute (SAS). (1999). *SAS User's Guide, versión 8.0.* Cary, N. C.: SAS Institute Inc.

 ISSN en trámite

# Control de Actuadores para un Sistema de Rehabilitación de Movimiento

**Jesus A. Medrano Hermosillo** * **Ricardo Lozoya Ponce** *
**Abraham E. Rodriguez Mata** * **Rogelio E. Baray Arana** *

* *División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Chihuahua (ITCH), Av. Tecnologico 2909, Tecnológico, 31200 Chihuahua, México (e-mail: jesus.mh@chihuahua.tecnm.mx; ricardo.lp@chihuahua.tecnm.mx; abraham.rm@chihuahua.tecnm.mx; rogelio.ba@chihuahua.tecnm.mx).*

Resumen
Este artículo describe una propuesta para el desarrollo de técnicas de control enfocadas a un sistema de rehabilitación de movimiento de miembros inferiores en personas que padecen trastornos neurológicos. Los elementos principales que constituyen este sistema de rehabilitación son: control de actuadores del sistema, motores de corriente directa (CD) ensamblados a los eslabones del sistema, sensores de efecto Hall encargados de medir la velocidad de giro de los motores, manejador de potencia para suministrar la energía necesaria a los motores, acelerómetro de tres ejes para medir la posición de los eslabones, entre otros. Se presenta un control coordinado de cadera y rodilla con perfil de velocidad trapezoidal, con el propósito de obtener un movimiento suavizado y disminuir el efecto que pueden llegar a sufrir los actuadores a causa de señales de entrada inesperadas. Adicionalmente, se evalúan las respuestas del control ante disturbios que se puedan presentar.

*Keywords:* Control de actuadores, Denavit-Hartenberg, Motor CD.

## 1. INTRODUCCIÓN

Generalmente una de las secuelas más importantes para las personas que han padecido accidentes cerebrovasculares (ACV) es la pérdida y/o alteración de funciones necesarias para desenvolverse y desempeñar actividades cotidianas, por ejemplo: la función del movimiento de marcha.

El desarrollo de sistemas mecatrónicos ha tenido un gran auge en los últimos años, esto debido a que esta disciplina logra integrar diversas ingenierías para diseñar y desarrollar procesos que involucran técnicas de control para crear sistemas que faciliten las actividades al ser humano y favorecer al desarrollo de nuevas tecnologías. La neurorehabilitación tiene como propósito general el reentrenamiento del sistema nervioso después de una lesión, así como minimizar el efecto que ésta puede llegar a causar. Es posible que el sistema nervioso llegue a experimentar cambios estructurales y funcionales, los cuales se manifiestan en el número de contactos sinápticos creando circuitos nuevos. El factor que participa en estos cambios estructurales es la función sináptica, la cual es el resultado de eventos químicos y eléctricos que generan potenciales de acción. Estos potenciales pueden aumentarse o disminuirse dependiendo de la frecuencia y magnitud de los estímulos a los que se exponga la persona, o bien, como resultado de la experiencia. Por lo tanto, el aprendizaje motor es un conjunto de procesos asociados con la práctica y la experiencia que originan cambios permanentes en la capacidad para efectuar actividades motoras. Algunos estudios han comprobado el principio de la neuroplasticidad mediante la evaluación de funciones cerebrales, en donde se han documentado los cambios que ocurren a nivel celular y molecular (Nudo (2011)). En escencia, la neuroplasticidad se fundamenta en la reactivación de neuronas vecinas a la superficie de la célula muerta.

El reentrenamiento de la locomoción es un método efectivo para ayudar a las personas que presentan alteraciones en su manera de caminar. La automatización de este reentrenamiento mejora significativamente la eficiencia y amplitud de las terapias tradicionales, las cuales se basan en movimientos repetitivos de los miembros inferiores de los pacientes. Estos movimientos iterativos pueden ser fácilmente ejecutados por un sistema robótico que tenga predefinidos los movimientos coordinados.

## 2. METODOLOGÍA

El modelo propuesto del sistema de rehabilitación se muestra en la Figura 1, donde se aprecian los bloques principales que lo conforman. Una persona capacitada,

 ISSN en trámite

preferentemente un terapeuta, es la comisionada para manejo del sistema a través de una interfaz de usuario en la cual se muestra la ejecución de los movimientos, así como el control total de esta ejecución; los movimientos que se utilizan en terapias fisioterapéuticas son las trayectorias predefinidas; la unidad de control evalúa y toma decisiones acerca del movimiento de las extremidades del paciente, con base en los datos leídos por los sensores; se cuenta con sensores de velocidad de giro de los motores y sensores de posición de los eslabones de la estructura; en este caso se tiene un movimiento coordinado de dos articulaciones cadera-rodilla, por lo tanto se hace uso de un manejador de potencia capaz de suministrar la energía necesaria a los motores.

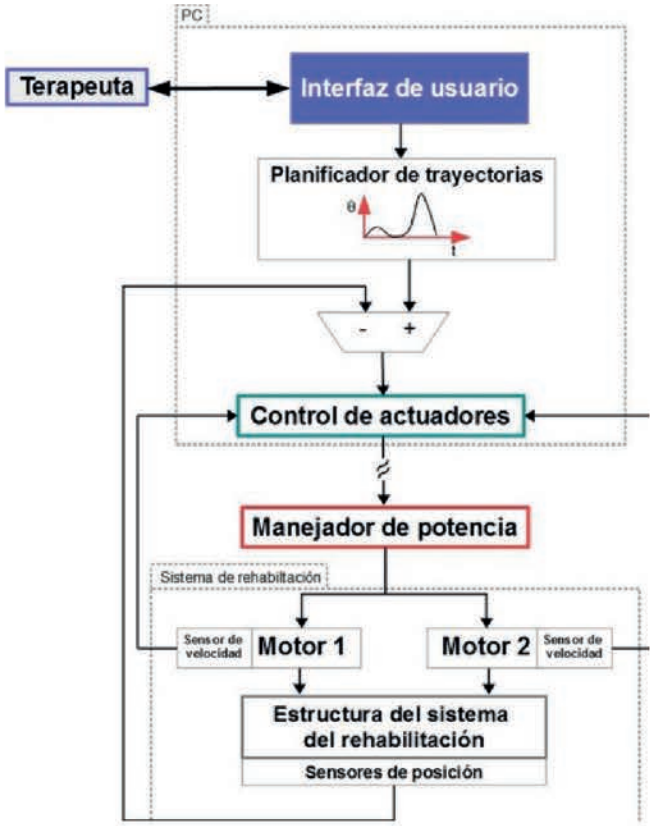



Figura 1. Diagrama propuesto de un sistema de rehabilitación.

### *2.1 Planificación de Trayectorias*

El análisis de la trayectoria de marcha es sumamente útil para coordinar todas las fases que conforman un ciclo de marcha completo. Además, se puede utilizar para determinar el grado de la discapacidad que padece la persona y determinar el tratamiento más adecuado para alcanzar una rehabilitación óptima. Algunos investigadores han utilizado métodos que involucran sistemas de visión para obtener información acerca del movimiento del cuerpo de la persona. Estos métodos pueden presentar algunas variaciones, ya que algunos utilizan marcadores luminosos o de colores predeterminados alineados a cada articulación de interés; o bien, existe el caso donde la persona simplemente camina y una cámara graba la secuencia de caminado, posteriormente una etapa de procesamiento de imágenes es la encargada de decidir, con base en descripciones, la posición donde se encuentran las articulaciones de interés y se despliega la información requerida. En la Figura 2 se muestra el modelo de un sistema de visión sin marcadores para la extracción y visualización de información (Chacon (2007)).

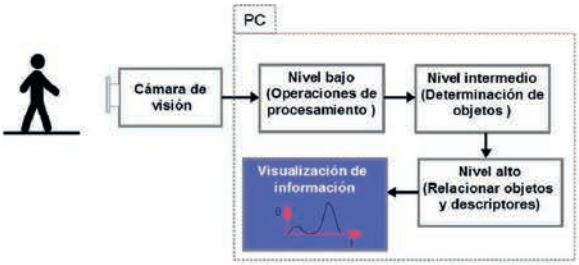



Figura 2. Diagrama de un sistema de visión.

En (Wang et al. (2011); Winter (2009); Chacon-Murguia et al. (2012)) se muestran análisis y extracciones de características de la trayectoria de marcha humana, en los cuales se proponen algunos patrones que describen los movimientos de cadera, rodilla y tobillo, a lo largo de un ciclo de marcha, ver Figuras 3, 4, 5. La metodología que siguen estos autores consiste en realizar estudios a personas sin alteraciones en el movimiento realizado al caminar y, obtener promedios y desviaciones permisibles que pueden tener. Un sistema robótico de rehabilitación es una interfaz máquina-hombre, es decir, es un sistema que ejecuta movimientos de patrones predefinidos que han sido validados como modelos que facilitan la rehabilitación de movimiento en las extremidades del paciente.

Actualmente existe una gran variedad de sistemas de rehabilitación en el mercado, los cuales se diferencian con base en: dimensiones y peso de la estructura, número de grados de libertad que integran, resolución de los movimientos predefinidos y, sobre todo, el precio que pueden llegar a tener.

Indiscutiblemente cada articulación tiene su convención para describir su magnitud y sentido. Se considera únicamente el movimiento de las extremidades inferiores desde un plano sagital, ya que la contribución principal del caminado se produce en este plano. La Figura 6 muestra la asignación de sistemas coordenados, siguiendo el criterio propuesto por Denavit y Hartenberg, en cada articulación para obtener el cinemático directo, con el cual a partir de los valores angulares en cada articulación se puede encontrar un grupo de ecuaciones que describen el elemento final del sistema (en este caso se considera el talón) en términos de posición y orientación respecto a un sistema global (Schilling (1996)). Para calcular la ecuación que mapea al sistema coordenado final respecto del sistema coordenado global, se realiza la multiplicación de manera compuesta de las matrices de transformación homogénea

 ISSN en trámite

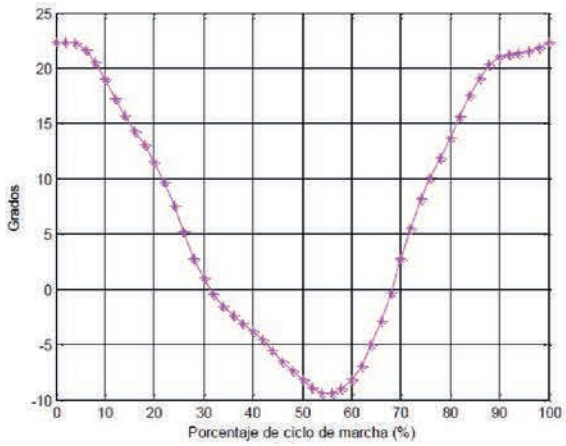



Figura 3. Comportamiento angular de la cadera en un ciclo de marcha.

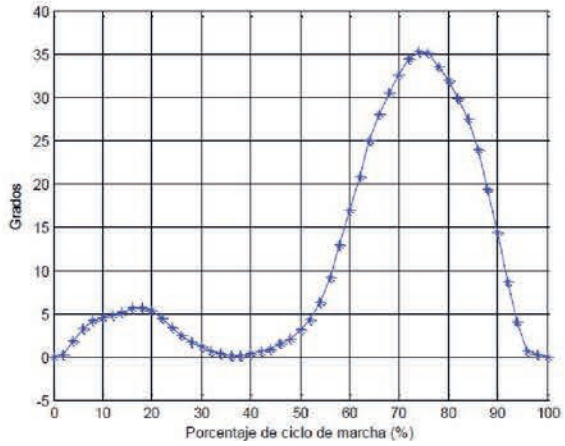



Figura 4. Comportamiento angular de la rodilla en un ciclo de marcha.

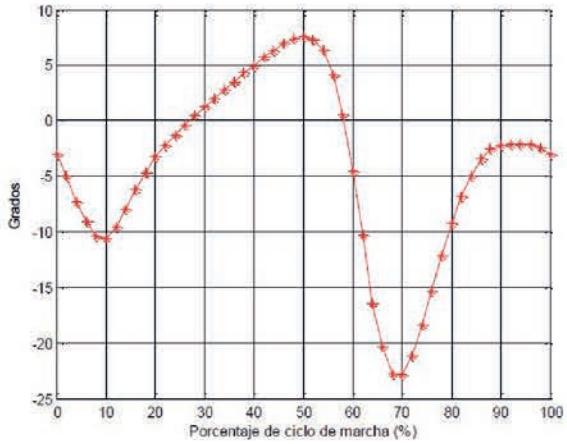



Figura 5. Comportamiento angular del tobillo en un ciclo de marcha.

de la cadena de eslabones, como se muestra en la Ecuación (1).

$$T_0^n = \prod_{i=0}^{n-1} T_i^{i+1} \tag{1}$$

Donde $T$ es la matriz de transformación homogénea de la cadena de eslabones. Además, la cinemática directa también puede llegar a ser utilizada como herramienta de simulación del movimiento a ser efectuado antes de que el sistema de rehabilitación lo ejecute, ésto debido a que con base en las posiciones angulares se pueden determinar los valores mínimos y máximos en el sistema cartesiano que alcanzarán las extremidades de la persona, así como el rango de movimiento que se desarrollará.

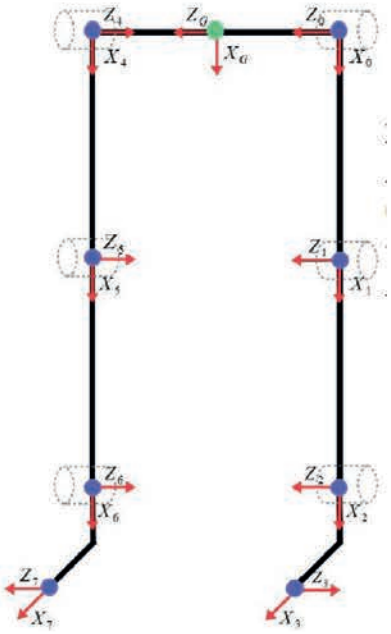


Figura 6. Asignación de ejes coordenados en cada articulación.

La Tabla 1 muestra los parámetros de Denavit- Hartenberg de la pierna izquierda, mientras que para la pierna derecha son muy similares, el único punto a considerar es la ubicación y sentido de los ejes coordenados.

Tabla 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg.

| N | $\theta$ | d | $\alpha$ | a | home |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $\theta_1$ | 0 cm | 0° | 40 cm | 0° |
| 2 | $\theta_2$ | 0 cm | 0° | 40 cm | 0° |
| 3 | $\theta_3$ | 0 cm | -180° | 25 cm | 90° |

### *2.2 Manejador de Potencia*

Los manejadores de potencia son dispositivos que suministran energía a actuadores como: resistencias, calefactores, motores eléctricos, entre otros. Básicamente el principio en el que se fundamentan es que la magnitud

 ISSN en trámite

del voltaje de salida depende directamente del valor que se encuentra en la entrada del manejador. Aunque existen diversos modos de operación, los datos de entrada más comunes son: señales analógicas, señales digitales o señales moduladas en ancho de pulso. En esta propuesta se decidió comunicar inalámbricamente al manejador de potencia con una PC a través del protocolo Zigbee, esto con la intención de aislar la etapa de control de la etapa de potencia. Ver Figura 7.

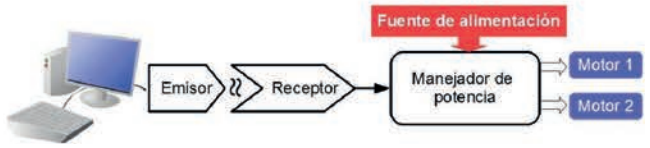



Figura 7. Diagrama de comunicación con el manejador de potencia

La Figura 8 ilustra la curva característica del manejador de potencia, donde se muestra que en algunos segmentos no es completamente lineal, pero esta no linealidad es permisible ya que en estos segmentos la tensión de salida se encuentra en un rango de [-1,1] volts, dichos valores no son utilizados debido a que no son suficientes para hacer girar los motores.

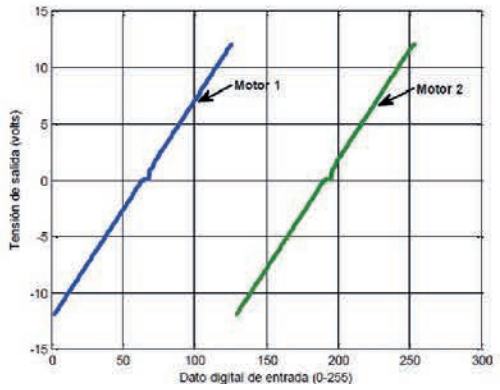



Figura 8. Curva característica del manejador de potencia

*Encoder con Sensor de Efecto Hall* Para la medición de la velocidad de giro en los motores, se eligió un encoder con sensor de efecto Hall. El principio en el que se basa consiste en: hacer circular una corriente conocida (IA) a través de una capa de semiconductor, al presentarse un campo magnético de manera perpendicular a la superficie del sensor se genera una desviación de la corriente (IA) y una cambio de tensión en las terminales de salida (B1-B2), ver Figura 9.

De tal manera que al girar el motor se genera un tren de pulsos con un periodo proporcional a la velocidad de giro, el cálculo del periodo de tiempo se realiza con un microcontrolador a través de una interrupción externa conectada a la salida del encoder. Cada vez que el algoritmo de control envía una petición de lectura, el microcontrolador se encarga de convertir el periodo actual

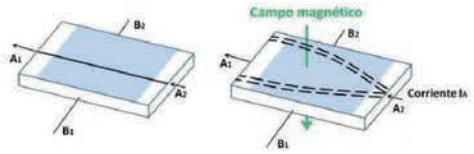



Figura 9. Principio del sensor de efecto Hall

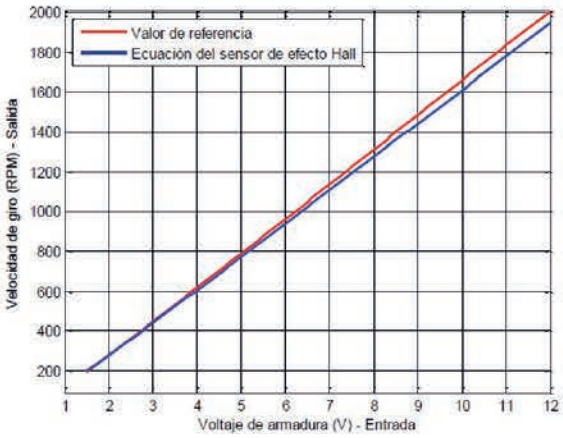



Figura 10. Curva característica del encoder

a su equivalente de velocidad de giro en revoluciones por minuto. Es necesario considerar el tiempo que trascurre en enviar la lectura hacia la PC, lo cual produce que un retardo de tiempo que perturbará en el cálculo de la velocidad de giro. Como experimento se aplicaron diferentes tensiones de entrada al motor y se obtuvieron las lecturas que proporciona el encoder implementado. Como se puede ver en la Figura 10, a tensiones bajas de entrada, las lecturas son exactas al valor de referencia; pero conforme se aumenta esta tensión, el error va aumentando y toma un valor máximo de 58 rpm de diferencia respecto al valor de referencia. Para obtener lecturas más exactas se empleó el algoritmo de calibración polinomial progresivo propuesto en (Rivera-Mejia et al. (2013)), con el cual se aplicaron dos puntos de reajuste: calibración de offset y calibración de ganancia, las ecuaciones (2, 3) definen estos puntos, respectivamente.

$$h_1(x) = f(x) + (y_1 - f(x_1)) \tag{2}$$

$$h_2(x) = h_1(x) + \left(\frac{y_2 - h_1(x_2)}{h_1(x_2) - y_1}\right)(h_1(x) - y_1) \tag{3}$$

Al aplicar estas dos calibraciones, como se muestra en la Figura 11, a la curva característica del encoder, se cumple con un valor del porcentaje de error de no linealidad menor al uno por ciento, ver Figura 12.

*Sensor de Posición* Un acelerómetro es un dispositivo que mide el valor de cambio en la velocidad de un objeto. El principio que utilizan puede variar dependiendo de las especificaciones y de la aplicación donde se requiera. Por lo general su unidad de medida es la fuerza de gravedad (g), una sola fuerza de gravedad es equivalente a

 ISSN en trámite

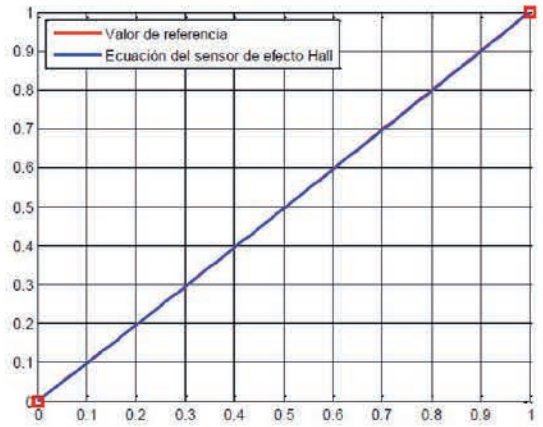



Figura 11. Curva característica del encoder calibrada y normalizada

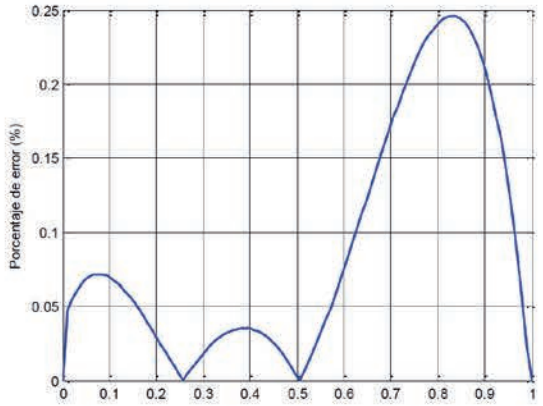



Figura 12. Porcentaje de error

$9.81\frac{m}{s^2}$. Los acelerómetros son utilizados para monitorear vibraciones y, en este caso, para medir posiciones. Para la determinación de la inclinación de un eslabón del sistema de rehabilitación se puede utilizar dos ejes de movimiento (x, y) y un tercer eje (z) sobre el cual se efectúa la rotación, donde cada eje tiene una respuesta de tipo sinusoidal, ver Figura 13. Este procedimiento se puede aplicar para los tres ejes proporcionados por el acelerómetro, y se obtiene la rotación en cada uno de ellos.

Considerando el comportamiento de estas respuestas, es posible obtener, mediante la Ecuación (4), la magnitud y sentido en que se está girando el eslabón del sistema, ver Figura 14. Esta información es la que se utiliza como señal de retroalimentación de control al sistema, el cual se encarga de evaluar y tomar la decisión acerca de cómo se está ejecutando la trayectoria predefinida y, en caso de ser necesario, determina la acción de control necesaria.

$$\theta = atan2(A_y, -A_x) \tag{4}$$

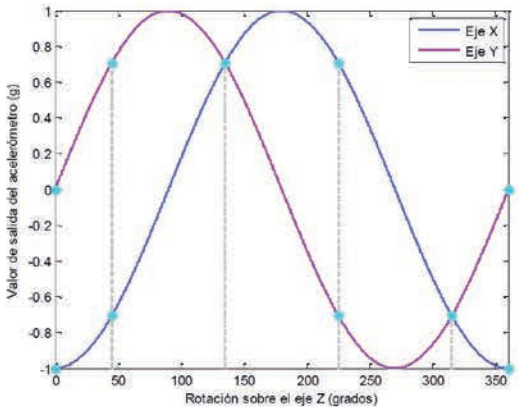



Figura 13. Respuesta de dos ejes respecto a la rotación del acelerómetro

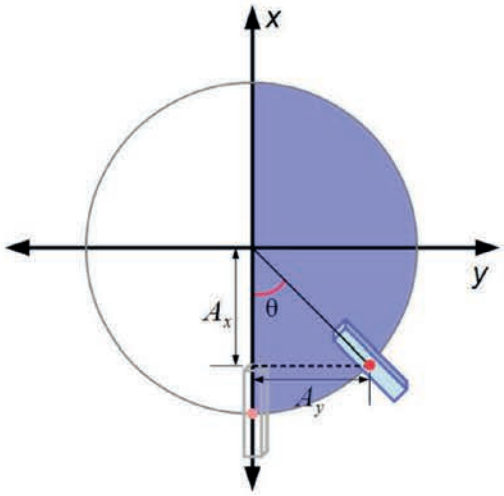



Figura 14. Representación para el cálculo del sentido de giro y ángulo de rotación.

## 3. CONTROL Y PERFIL DE VELOCIDAD TRAPEZOIDAL

Con la intención de brindar un movimiento suave en cada eslabón del sistema, se propone seguir un perfil de velocidad de tipo trapezoidal. Este perfil se caracteriza por contener los siguientes componentes: un periodo de tiempo ($t_a$) en el cual la velocidad se incrementa siguiendo una recta de pendiente conocida; un periodo de tiempo en donde la velocidad se mantiene de manera constante (V), lo que ocasiona que la aceleración sea igual a cero; un último periodo ($t_d$) en donde la velocidad se disminuye hasta llegar a un valor de cero. Este comportamiento se ejemplifica en la Figura 15, en donde la parte de la sinusoidal de color azul representa la aceleración, la sección de color rojo corresponde a la velocidad constante y, por último, la de color verde corresponde a la desaceleración.

Considerando que se tiene un sistema de control de lazo cerrado conformado por: la función de transferencia obtenida de un modelo matemático de un motor de CD

 ISSN en trámite

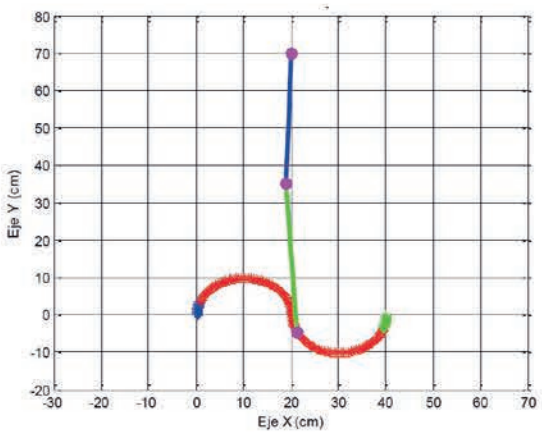



Figura 15. Puntos vía de la trayectoria con perfil trapezoidal.

representada en la Ecuación (5), la función de transferencia de un controlador proporcional integral dada por la Ecuación (6) y la función de transferencia del bloque de retroalimentación.

$$\frac{W(s)}{V_a(s)} = \frac{K_T}{JL_a s^2 + (JR_a + BL_a)\, s + BR_a + K_v K_T} \quad (5)$$

Donde $w$ define la velocidad angular de giro, $V_a$ corresponde al voltaje de armadura, $K_T$ es el torque continuo, $J$ es la inercia del motor, $L_A$ es la inductancia eléctrica de armadura, $R_A$ es la resistencia eléctrica de armadura de armadura, $B$ es el coeficiente de fricción viscosa y $K_v$ es la contante de voltaje.

$$K_c = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (6)$$

Donde $K_p$ y $K_i$ corresponden a las constantes de los términos proporcional e integral, respectivamente. En la Figura 16. en la parte izquierda, se muestra la respuesta que tiene el control propuesto ante señales de entrada de tipo trapezoidal, mientras que la parte derecha se muestra la respuesta añadiendo disturbios de tipo Gaussiano a la entrada.

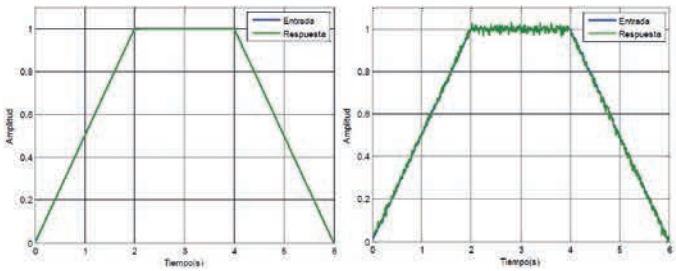



Figura 16. Respuesta del sistema a una señal trapezoidal de entrada.

## 4. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una propuesta de un sistema de rehabilitación de movimiento, así como los principios de funcionamiento de los elementos que integran este sistema, esto con el fin de proporcionar un movimiento coordinado y suavizado en las extremidades inferiores de personas que padecen alteraciones en el movimiento de marcha.

## REFERENCIAS

Chacon, M. (2007). *Procesamiento digital de imagenes/ Digital Image Processing*. Editorial Trillas Sa De Cv.

Chacon-Murguia, M.I., Sandoval-Rodriguez, R., and Arias-Enriquez, O. (2012). Human gait feature extraction including a kinematic analysis toward robotic power assistance. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9(3), 68. doi:10.5772/50723. URL `https://doi.org/10.5772/50723`.

Nudo, R.J. (2011). Neural bases of recovery after brain injury. *Journal of Communication Disorders*, 44(5), 515–520. doi: https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2011.04.004. 20th Annual NIDCD-Sponsored ASHA Research Symposium (2010): Neuroplasticity in the Mature Brain.

Rivera-Mejia, J., Carrillo-Romero, M., and Herrera-Ruiz, G. (2013). Self-compensation to build reconfigurable measurement systems. *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*, 16(2), 10–19. doi: 10.1109/MIM.2013.6495675.

Schilling, R.J. (1996). *Fundamentals of Robotics: Analysis and Control*. Simon amp; Schuster Trade, 1st edition.

Wang, P., Low, K.H., and Tow, A. (2011). Synchronized walking coordination for impact-less footpad contact of an overground gait rehabilitation system: Nature-gaits. In *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 1–6. doi:10.1109/ICORR.2011.5975353.

Winter, D. (2009). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Wiley.

 ISSN en trámite

# Platos biodegradables base biológica como alternativa sostenible para recipientes de un solo uso.

**C. A. De León-Condes[1], J. A. Reyes-Pérez[1], M. González Torres[1], G. Roa-Morales[2] y P. Balderas-Hernández[2]**

[1]Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco (TEST), Km. 22, Carretera Tenango - La Marquesa Santiago Tilapa, Santiago Tianguistenco, 52650, Méx. (e-mail: reyesperezj.aydee02@gmail.com; cristina_arely@test.edu.mx, maribel.gonzalez@test.edu.mx).

[2]Universidad Autónoma del Estado de México, (UAEMex), Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS) UAEM-UNAM, Carretera Toluca-Atlacomulco, Km 14.5, Toluca, MEX, México. 50200 (e-mail: groam@uaemex.mx; pbalderash@uaemex.mx).

**Resumen:** Las principales deficiencias en los platos biodegradables es la hidrofilicidad. Con el objetivo de mejorar, se elaboró un material base compuesto por 300g de cascarilla de arroz, 200g de sorgo, 200g de trigo y 250g de almidón de arroz para todas las pruebas. Este trabajo presenta los resultados de un conjunto experimental que evaluó tres biorecubrimientos con resistencia al agua aplicada al material base. Los materiales fueron caracterizados con espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) y microscopio digital. Las muestras fueron sometidas a diferentes proporciones de recubrimiento glicerol-cera de abeja, y se investigó la resistencia al agua y la biodegradabilidad del material compuesto, el análisis de los datos se realizó mediante ANOVA al 0.05. Se encontró que el bloque A con proporción de 66% cera de abeja y 33% glicerol exhibió el 32% más de resistencia al agua en comparación con el resto de los bloques prueba. La cera de abeja proporciona mayor estabilidad y resistencia al agua en los platos, inversamente proporcional ocurre con la biodegradabilidad, ya que el bloque C con menor proporción de cera de abeja se degradó con mayor facilidad.

*Palabras clave:* cascarilla de arroz, cera de abejas, almidón de arroz, glicerol.

## 1. INTRODUCCCIÓN

La forma actual de producción, consumo y venta desmedida de compuestos que permanecen en el entorno por millones de años ha determinado plantear alternativas, mediante bases biológicas como las fibras, cereales, residuos agrícolas entre otros en beneficio de la sociedad, economía y medio ambiente. Disminuyendo los residuos plásticos, que causan daño al planeta y por consecuencia al ser humano, con productos orgánicos los cuales pueden llegar a sustituir en gran proporción a un plástico sintético generando grandes cambios a nivel mundial. La producción de materiales plásticos desde inicios de la década de los 50´s al 2017 es estimada en 9200 millones de toneladas métricas (TM) mundialmente, gran parte de estos han sido utilizados en empaque y en envases debido a sus excelentes capacidades de conservación, capacidad de protección y relativo precio bajo, reemplazando diversas formas de materiales basados en recursos naturales. Aunado a esto la sustitución de envases reutilizables por envases de un solo uso que representa el 40% del total producido anualmente. Las propiedades mecánicas durables se convierten en obstáculo al ser desechadas. El mercado mundial de envases está en continuo crecimiento convirtiendo en necesidad una regulación gubernamental y mayor conciencia en la población, además de representar desafíos para investigadores e industria en el desarrollo de envases sostenibles que fomenten producción más limpia en beneficio del mejor aprovechamiento de recursos naturales. Se estima que el 79 % de residuos plásticos se ha acumulado en el medio ambiente debido a que no llegan a ser reciclados (Walker *et al.*, 2021). La celulosa proveniente de productos agrícolas (almidón - ácido láctico (PLA)) y residuos forestales (desechos agrícolas, bagazo de caña y cascarilla de arroz), han sido aplicados para generar envases y envolturas de un solo uso utilizados en alimentos. El reciclaje de envases es un componente importante en la sostenibilidad por lo tanto lo convierte en potencial tendencia sostenible (Stark and Matuana, 2021). Recientemente, se han realizado varios intentos para utilizar estos materiales de desecho en estructuras compuestas (Suhot *et al.*, 2021).

Se ha reportado avances en desarrollos tecnológicos en la elaboración de pulpa y termoformado para fibras como el

 ISSN en trámite

bagazo, el trigo y el bambú, aplicados en la obtención de envases para alimentos con pulpa moldeada teniendo como desafíos mejorar ciclos de producción, altos usos químicos y energéticos, competencia de bioplásticos y presencia de sustancias tóxicas de perfluoroalquilo y polifluoroalquilo (PFAS). La investigación evoluciona buscando nuevos procesos, aditivos naturales, mezclas de fibras personalizadas y productos libres de PFAS, además de mejoras en el ciclo de vida (Semple *et al.*, 2022). Los residuos del sector agroalimentario han sido aprovechados cada vez más para la producción de vasos, platos, diferentes vajillas y objetos 3D biodegradables. Entre ellos predominan los productos obtenidos a partir de salvados de varios cereales como centeno, cebada, avena, trigo y cáscaras de naranja. Otros subproductos como la palma areca (*Areca catechu L.),* el árbol de sal (*Shorea robusta Gaertn.*), la enredadera Maloo (*Bauhinia vahlii Villar*), el banano (*Musa acuminata Colla*) y de cocos han resultado compatibles para elaboración de envases biodegradables. Una de las áreas de oportunidad de los recipientes obtenidos con base biológica es mejorar la resistencia al agua, alineado a esto se ha reportado la aplicación de emulsión con cera de abeja para mejorar las propiedades impermeables en materiales base biológica degradable (Iewkittayakorn *et al.*, 2020). Otro material que ha sido probado con buenos resultados como plastificante natural es el glicerol aplicado para mejorar las propiedades fisicoquímicas y estructurales de películas comestibles (Taghizadeh *et al.*, 2018). En la actualidad existen productores potenciales en el mercado que producen platos de salvado desechables. Son adecuados para servir platos fríos, calientes o para el horno de microondas. Potenciales para bandeja de vuelo para obtener bandejas reutilizables hechas con café molido y cáscaras mezcladas con un aglutinante de lignina. Publicaciones científicas reportan elaboración de recubrimientos comestibles, siendo una gran categoría de materiales de envasado de alimentos (Dybka-Stepien *et al.*, 2021). Este trabajo presenta la obtención de 15 muestras de recipientes en forma de plato base biológica (sorgo, cascarilla de arroz, trigo y almidón de arroz) con recubrimiento elaborado con glicerol y cera de abeja probados a diferentes proporciones; el análisis de los datos se realizó mediante el ANOVA al 0.05 para determinar la diferencia entre las pruebas.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales base

La cascarilla de arroz natural se adquirió de un proveedor de residuos agrícolas para sembradíos al sur del Estado de México fue fragmentado y lavado repetidamente con agua destilada posteriormente, el material se sometió a secado durante 24 horas en un horno a 60°C. Se realizó el proceso de molienda por medio de licuadora y tamizado para obtener tamaño de partícula homogéneo (> 250 m). Las harinas de sorgo, trigo y el almidón de arroz se adquirieron por venta comercial grado alimentario y fueron analizadas por Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) para confirmar las señales características de grupos funcionales correspondientes a los materiales. Para el pesaje de pruebas se utilizó equipo de pesaje Mettler Toledo MS204TS. Fueron utilizados moldes metálicos para dar forma al recipiente en forma de plato. La morfología superficial fue analizada con un Microscopio digital BXAV-X0-CA 0.03mm. Se realizó una revisión de artículos de investigación sobre pruebas con materiales compuestos base biológica aplicada a obtener recipientes de un solo uso. A partir de estos resultados se propusieron, proporciones y cantidades de cada material a utilizar. Se realizaron 3 bloques de prueba para el análisis ANOVA (Bloque A, B y C), con tres distintas proporciones de glicerol y cera de abeja.

### Producción de bloques A, B Y C

Para los bloques experimentales A,B,C la formulación quedo determinada por cada 15 recipientes en 300g harina de sorgo, 200g cascarilla de arroz, 200g harina de trigo, 250g almidón de trigo, 250g almidón de arroz y 500g agua destilada. El sorgo y la cascarilla de arroz fueron sometidos a molienda, mientras fue obtenida la mezcla de almidones con agua. Ambas formulaciones fueron mezcladas hasta obtener un compuesto homogéneo para ser aplanado con grosor de 3mm, después se coloca en el molde de 12 cm de diámetro. Todas las muestras fueron sometidas a secado en horno 250°C durante 25 minutos para eliminar humedad.

### Materiales de recubrimiento

Los bloques A, B y C fueron probados a diferentes proporciones de material recubrimiento, mismo que se obtuvo pesando y agregando de acuerdo con el desglose de la Tabla 1.

Tabla 1. Cantidades de material de recubrimiento.

| **Cantidades/bloques** | **A** | **B** | **C** |
|---|---|---|---|
| **Cera de abeja (g)** | 60 | 60 | 60 |
| **Glicerol (ml)** | 30 | 60 | 120 |

La cera de abeja fue calentada a 75ºC para poder ser mezclada con el glicerol bajo agitación constante.

### Pruebas realizadas

Las pruebas a las que se sometieron los bloques fueron; Impermeabilidad para medir la resistencia al agua colocando agua natural y poder analizar el comportamiento en horas. La degradación bajo tierra colocando los platos bajo tierra, sin que les de la luz del sol sometidos al ambiente natural, con seguimiento en días.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis FT-IR

En la Fig. 1, se observa el análisis de Espectroscopia infrarroja este estudio confirma los componentes utilizados y el cambio

 ISSN en trámite

obtenido en su estructura después de unirlos a un material compuesto. En la Fig.1a se muestra como el sorgo, cascarilla de arroz y trigo son muy parecidos, esto se debe a su estructura molecular y las propiedades funcionales similares.

La banda de absorción entre 3100 $cm^{-1}$ a 3500 $cm^{-1}$ está relacionada con los enlaces de hidrógeno de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. En 2900 $cm^{-1}$ se debe a la vibración de estiramiento de los grupos $CH_2$. Las bandas situadas a 1627 $cm^{-1}$ y 1510 $cm^{-1}$ correspondían al anillo aromático C=C. La región entre 400 $cm^{-1}$ y 1250 $cm^{-1}$ se observan bandas características de almidón (Ismojo *et al.*, 2017; Anchondo-Trejo *et al.*, 2021).

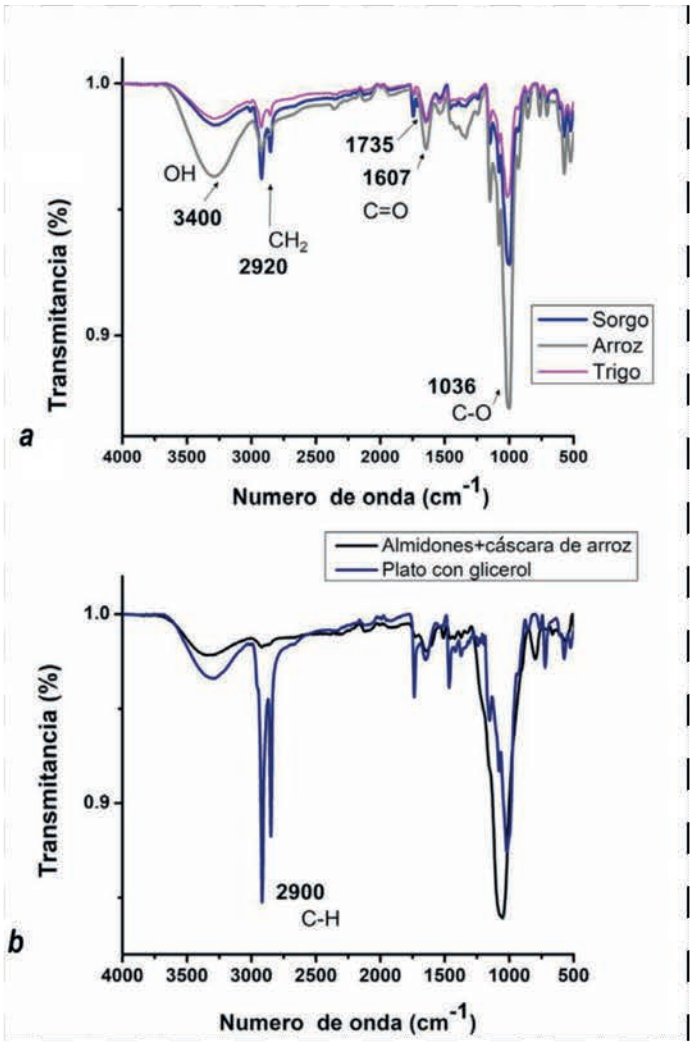



Fig. 1. FT-IR materiales base (a), materiales base más materiales de recubrimiento (b).

La diferencia en la Fig. 1b es que aparece una banda alrededor de 3000 $cm^{-1}$ atribuible a enlaces C=C presente en la parte alquílica de la cadena de ácidos grasos del glicerol (Danish *et al.*, 2017).

Producción de bloques A, B Y C

Fueron obtenidos recipientes en forma de plato para bloques experimentales (A, B y C) con la formulación base constante de (trigo, sorgo, y cascarilla de arroz), con un recubrimiento experimental buscando contribuir a mejorar la resistencia al contacto con el agua por esta razón el glicerol es parte de la emulsión debido a ser agente plastificante potencial con mejor comportamiento al unirse con el almidón debido a su compatibilidad con la amilosa (Tarique *et al.*, 2021). La experimentación para el recubrimiento consistió en mantener fija la cantidad de cera de abeja y variación en la proporción del glicerol. Las proporciones del recubrimiento para los bloques A, B y C fueron de 66%, 50% y 33% de cera de abeja y 33%, 50%, 66% de glicerol respectivamente.

Pruebas de propiedades de barrera contra el agua

Las pruebas para cada bloque se realizaron colocando 100mL de agua en los recipientes, se contabilizó el número de horas que resistieron sin que traspasara el líquido, los 3 bloques no presentan cambios significativos en las primeras 5 horas con agua, después de un tiempo de 10 horas presentan un deterioro físico de deformación del recipiente. En la Fig. 2 se observa la resistencia en horas a contener agua por cada bloque, el bloque A supera al resto en un 20% y un 32% con respecto al bloque B y C respectivamente.

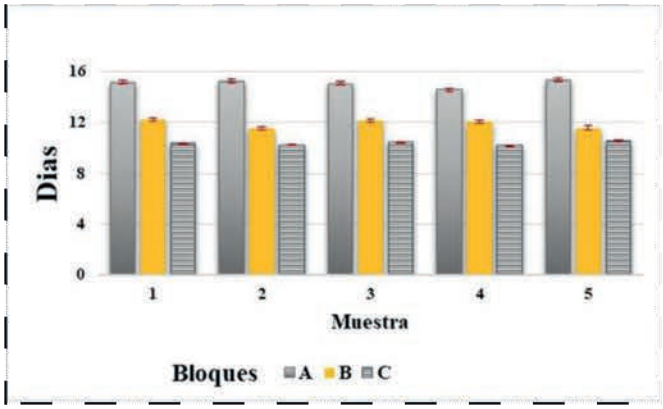



Fig. 2. Resistencia por cada bloque en las cinco muestras.

En la Fig. 3a se observan las muestras con recubrimiento y ligero color amarillo. La Fig. 3b del microscopio digital muestra la superficie del material sin recubrimiento con cavidades y rugosidades propias del material. En la Fig. 3c se observa la superficie a tamaño de mm con el recubrimiento del bloque A (glicerol 33% -cera de abeja 66%), el cambio de morfología da como resultado una superficie homogénea, plana y sin poros, contribuyendo a una mayor capacidad de resistencia al paso de agua.

 ISSN en trámite

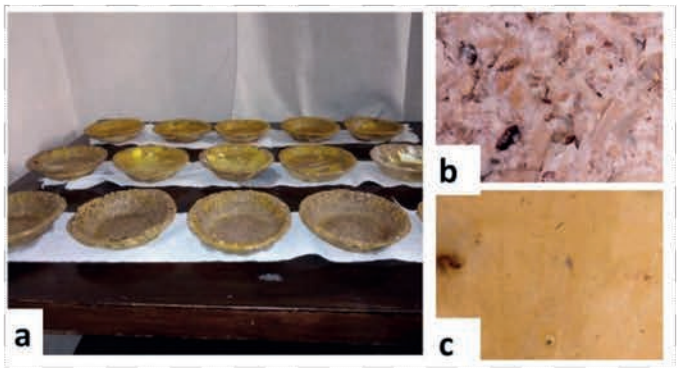



Fig. 3. Muestras de bloques con recubrimiento (a). Imágenes del Microscopio digital (0.03mm) para las muestras antes y después del recubrimiento con glicerol y cera de abeja (b,c)

La superficie sin poros del material obtenido con el recubrimiento a mayor proporción de cera de abeja contribuye a argumentar por qué las muestras del bloque A resultaron con mayor resistencia al agua que el resto.

Análisis ANOVA

El análisis de los datos fue realizado por medio del cálculo de ANOVA para las pruebas experimentales y así establecer la diferencia estadística entre las medias de los tres bloques independientes como se muestra en la Fig. 4. Como resultado se tiene el rechazó de la hipótesis nula que establece la relación entre las pruebas, por lo tanto, existe diferencias entre los recubrimientos aplicados en los tres bloques.

Zona crítica: $F\ 0{,}95_{\ 2,12} = 3.8853$

Como 419.61 > 3.8853 rechazamos H0, existe diferencias entre los bloques y sus recubrimientos.

Lo anterior representa la diferencia entre los resultados obtenidos de resistencia para cada bloque.

Pruebas de biodegradación bajo tierra

Las muestras de cada bloque fueron utilizadas como recipientes de salsa durante 10 horas, se dejaron secar a temperatura ambiente durante la noche y se colocaron a secar a temperatura de 25ºC hasta alcanzar un peso constante, fueron enterradas bajo tierra por espacio de 15 días, se recuperaron las piezas los días 3, 9 y 15, se limpiaron de restos de suelo adheridos, se tomaron fotos y dejaron secar a temperatura de 25ºC, para ser pesadas y obtener la pérdida de peso con respecto a las muestras iniciales.

La muestra del bloque C con menor proporción de cera de abeja (33%) y mayor de glicerol (66%) fue el que más rápidamente se descompuso, esto podría deberse a que la cera de abeja ha sido ampliamente utilizado como aditivo de grado alimenticio en productos de la industria de los cosméticos, farmacéuticos y alimentaria, por su alta hidrofobicidad y excelente resistencia a la humedad, lo cual aporta mayor resistencia a la degradación; esto coincide con lo reportado por (Taghizadeh *et al.*, 2018).

**ANOVA de un solo factor: horas vs. Bloques**

**Método**

| | |
|---|---|
| Hipótesis nula | Todas las medias son iguales |
| Hipótesis alterna | No todas las medias son iguales |
| Nivel de significancia | α = 0.05 |

*Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.*

**Información del factor**

| Factor | Niveles | Valores |
|---|---|---|
| Bloques | 3 | 1, 2, 3 |

**Análisis de Varianza**

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|---|---|---|---|---|---|
| Bloques | 2 | 58.0290 | 29.0145 | 419.61 | 0.000 |
| Error | 12 | 0.8298 | 0.0691 | | |
| Total | 14 | 58.8587 | | | |

**Resumen del modelo**

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|---|---|---|---|
| 0.262958 | 98.59% | 98.36% | 97.80% |

**Medias**

| Bloques | N | Media | Desv.Est. | IC de 95% |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 15.088 | 0.295 | (14.832, 15.344) |
| 2 | 5 | 11.922 | 0.317 | (11.666, 12.178) |
| 3 | 5 | 10.3600 | 0.1416 | (10.1038, 10.6162) |

*Desv.Est. agrupada = 0.262958*

Fig. 4. Análisis ANOVA de relación de pruebas entre bloques.

## 6. CONCLUSIONES

En el estudio actual, se utilizaron diferentes proporciones de glicerol con cera de abeja para ser aplicados como recubrimiento y contribuir a la resistencia del contacto con el agua y degradabilidad. Se observó que la incorporación de glicerol como plastificante aun con la interacción con el almidón del material base compuesto por cascarilla de arroz, trigo, sorgo y almidón de arroz no proporciona mayor resistencia al agua que la cera de abeja. Las variaciones en las pruebas a distintas proporciones si afectan las propiedades de hidrofilicidad del material base. Las mejores pruebas resultaron ser del bloque A donde la cera de abeja estuvo en mayor proporción confirmando ser agente hidrofóbico, al mismo tiempo incrementó la degradabilidad del material del cuál fue aplicado como recubrimiento.

ISSN en trámite

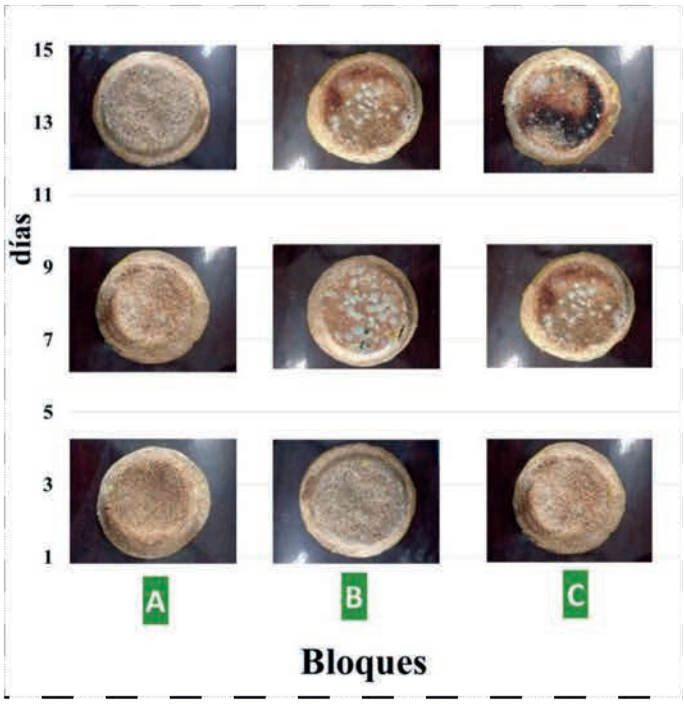



Fig. 5. Degradación de los platos en 15 días.

REFERENCIAS

Anchondo-Trejo, C. *et al.* (2021) 'Development of a Third Generation Snack of Rice Starch', *Molecules*, 26, pp. 1–24. doi: https://dx.doi.org/10.3390/molecules26010054.

Danish, M. *et al.* (2017) 'Response Surface Methodology Based Optimized Purification of the Residual Glycerol from Biodiesel Production Process', 44(4), pp. 1570–1582.

Dybka-Stepien, K. *et al.* (2021) 'Disposable Food Packaging and Serving Materials — Trends and', *Polymers*, pp. 1–38.

Iewkittayakorn, J. *et al.* (2020) 'Biodegradable plates made of pineapple leaf pulp with biocoatings to improve water resistance', *Integrative Medicine Research*. Korea Institute of Oriental Medicine, 9(3), pp. 5056–5066. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.03.023.

Ismojo *et al.* (2017) 'Preparation of micro-fibrillated cellulose from sorghum fibre through alkalization and acetylation treatments alkalization and acetylation treatments', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering PAPER*, 223, pp. 0–8. doi: 10.1088/1757-899X/223/1/012057.

Semple, K. E. *et al.* (2022) 'Moulded pulp fibers for disposable food packaging : A state-of-the-art review', *Food Packaging and Shelf Life*. Elsevier Ltd, 33(July), p. 100908. doi: 10.1016/j.fpsl.2022.100908.

Stark, N. M. and Matuana, L. M. (2021) 'Materials Today Sustainability Trends in sustainable biobased packaging materials : a mini review', *Materials Today Sustainability*. Elsevier Ltd, 15, p. 100084. doi: 10.1016/j.mtsust.2021.100084.

Suhot, M. A. *et al.* (2021) 'Recent Progress of Rice Husk Reinforced Polymer Composites ':, *Polymer*. doi: https:// doi.org/10.3390/polym13152391.

Taghizadeh, M. *et al.* (2018) 'Photosensitizer-induced cross-linking: A novel approach for improvement of physicochemical and structural properties of gelatin edible films', *Food Research International*. Elsevier Ltd, p. #pagerange#. doi: 10.1016/j.foodres.2018.06.010.

Tarique, J. *et al.* (2021) 'Recent developments in sustainable arrowroot ( Maranta arundinacea Linn ) starch biopolymers , fibres , biopolymer composites and their potential industrial applications : A review', *Journal of Materials Research and Technology*. Elsevier Ltd, 13, pp. 1191–1219. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.05.047.

Walker, T. R. *et al.* (2021) 'industry : consumer behavior and perceptions', *Humanities and Social Sciences Communications*. Springer US, pp. 1–11. doi: 10.1057/s41599-021-00747-4.

 ISSN en trámite

# Estudio de la Influencia de Barreras Externas en la Ventilación Natural de Invernadero Tipo Gótico mediante CFD

**Acevedo R. Mirka, Maily* Aguilar R. Cruz, Ernesto****
**Hernández B. Constantin, Alberto.***Ramos B. José Angel ****Muñoz R. José de Jesús**

*Instituto Tecnológico de Morelia. Michoacán., México.
(Tel: 6181223389; e-mail: D00040957@morelia.tecnm.mx).
** Instituto Tecnológico de los Reyes. Michoacán, México
(e-mail: ernesto.ar@losreyes.tecnm.mx)
*** Instituto Tecnológico de Morelia. Michoacán., México.
(e-mail: constantin.hb@morelia.tecnm.mx)
*** Instituto Tecnológico de Morelia. Mich., México.
(e-mail: jose.rb@morelia.tecnm.mx)
**** Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana. Durango, México.
(e-mail: jose.mr@vguadiana.tecnm.mx

**Resumen:** Una adecuada ventilación natural en invernaderos no automatizados, es la principal forma de disminuir la temperatura al interior y disminuir riesgos de condensación sobre las plantas, así como las enfermedades que pueden derivarse de la misma. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de colocar una barrera externa en el comportamiento de la ventilación natural de un invernadero tipo gótico mediante técnicas de CFD. Se llevó a cabo la obtención de datos colocando sensores de temperatura y velocidad de viento, dentro y fuera del invernadero. Los resultados muestran que las trayectorias del viento se ven modificadas al colocar una barrera externa de tres metros de altura.

***Palabras clave:*** Sensores de software en agricultura, Estimación de parámetros y estados, Modelado y control en agricultura

## 1. INTRODUCCION

La necesidad de satisfacer la creciente demanda alimenticia a nivel global, ha sido la pauta para el desarrollo y búsqueda de la mejora continua en la agricultura protegida. México, es un país que se caracteriza por una amplia variedad de regiones con condiciones naturales idóneas para el establecimiento de invernaderos, por lo tanto, la agricultura protegida se ha presentado como una opción viable entre los agricultores, que permite obtener productos de calidad para mercado nacional y de exportación. (Juarez, L.P., et al., 2011). Según datos de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, actualmente se cultivan 3 mil 442 hectáreas de invernaderos en México, y la mayor concentración de la producción se da en la zona Noroeste del país. En estos Estados, el clima se caracteriza por presentar cambios extremos de temperatura, por lo que la agricultura protegida presenta una alternativa que permite controlar las condiciones dentro de las estructuras, logrando extender los ciclos de cultivo y aumentar la productividad.

Los invernaderos se han convertido en una oportunidad factible para productores que no cuentan con grandes extensiones de terreno. En ocasiones, son instalados en espacios que cuentan con bardas perimetrales, edificios habitacionales huertos de árboles frutales etc. que pueden funcionar como barreras, y limitar la ventilación natural hacia el interior de las estructuras.
La función de los invernaderos, es proteger el cultivo del ambiente exterior y proporcionar condiciones ambientales favorables para el crecimiento y desarrollo de la planta.
El diseño y construcción de invernaderos, se basan en diferentes consideraciones que permiten obtener como resultado la optimización de las condiciones para el cultivo. Una de ellas es la posición geográfica, que toma en cuenta perpendicularidad de los rayos del sol y la incidencia que tendrán a lo largo del día, así como la dirección de vientos dominantes en la zona que a pesar de ser un factor medido al exterior del invernadero es de gran importancia en los procesos de evapotranspiración e intercambio de aire, sobre todo en invernaderos que carecen de sistemas de ventilación además del

 ISSN en trámite

que provee la geometría de su construcción (Larrazabal, M., 2020).
El enfriamiento evaporativo, se considera la mejor forma de enfriar el ambiente al interior de un invernadero, y el proceso se ve favorecido si el aire exterior es seco (Kittas et al., 2011).

El uso de dinámica de fluidos computacional en este tipo de estudios permite un mejor conocimiento del proceso de intercambio de aire, ya que aporta un panorama detallado del movimiento del aire y sus repercusiones en el clima interior del invernadero. (Flores y cols. 2011)

Serrano y colaboradores (2013), recomiendan como una primera aproximación en el análisis del comportamiento del clima dentro del invernadero, evaluar las temperaturas en estado estable para un día específico.

El objetivo de este estudio fue analizar el efecto de una barrera externa colocada a tres distancias diferentes, en el comportamiento de las corrientes de aire y perfiles de temperatura al interior de un invernadero tipo gótico, dedicado a la producción de hortalizas en el Valle del Guadiana en el estado de Durango mediante técnicas de simulación numérica.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### *2.1 Sitio experimental*

El invernadero usado como caso de estudio es de tipo gótico de 14.5 m de ancho y 80 m de largo. Cubierto con polietileno translúcido y malla antiáfidos en las ventanas. Cuenta con un sistema de ventilación natural basado en la apertura y cierre de dos ventanas laterales de tres metros de altura y ventana cenital de 1.5 m. La superficie de cultivo es una hectárea dividida en cinco camas de cuarenta centímetros de ancho, sembradas a doble hilera, con acolchado y con 1.5 m de separación entre ellas. Se contaba en el momento del estudio con cultivo establecido de tomate en etapa productiva con aproximadamente dos metros de altura. La instalación se ubica en el área de la parcela 31 del Ejido Parras de la Fuente, Durango, Dgo. Las coordenadas son: 23°59´28.87” N; 104¬32´34.98” O y una elevación de 1868 m.
En la región, predomina un régimen semicálido templado con lluvias en verano con una precipitación media anual en torno a 500 mm, el 85% ocurre de junio a octubre. La topografía es plana, el suelo es de tipo aluvial con textura franca.

Para la toma de datos se cuenta con tres estaciones Davis Vantage pro2. Dos de ellas, ubicadas dentro del invernadero a 30 y 60 metros de la entrada, ambas en la cama central y otra al exterior. Las variables monitoreadas fueron temperatura y velocidad de viento; así como datos de entrada para el modelo computacional.
(Juarez y cols., 2011)

### *2.2 Modelo Matemático*

Se consideraron cuatro geometrías para el estudio. Un invernadero sin barreras externas y tres más con una barrera de tres metros de altura, colocada de forma paralela a la entrada de aire, considerando la dirección normal a la del viento dominante. Se mantuvieron las ventanas laterales y cenital completamente abiertas.

Para la solución del modelo matemático se utilizó la metodología recomendada para el uso de CFD. Pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento.

En la figura 1 se muestra la geometría correspondiente al invernadero.

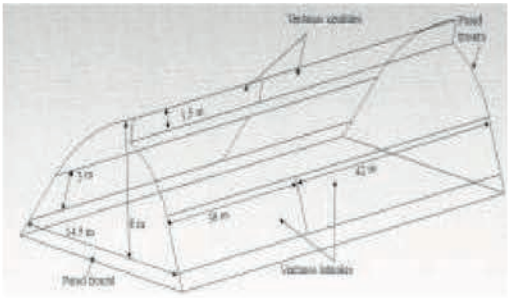


Fig. 1. Geometría del invernadero

Se realizó el mallado y las correspondientes pruebas de sensibilidad de malla realizando cinco variaciones en el número de elementos. Las curvas de prueba mostraron independencia de los resultados en relación al de número de elementos. Ver figura 2. La malla utilizada en el estudio es de tipo estructurado y cuenta con 399, 607 elementos y una calidad ortogonal promedio de 0.972 así como un promedio de deformación de 0.23.

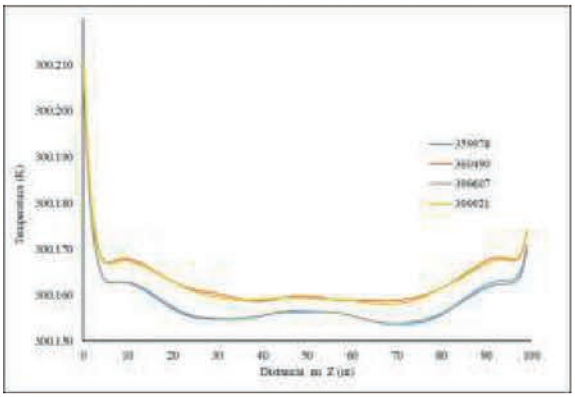


Figura 2. Prueba de sensibilidad de malla

### *2.2 Solución del modelo*

 ISSN en trámite

Para el modelo computacional en 3D se usó un solucionador basado en presión. En el modelo matemático, se resuelven las ecuaciones gobernantes de energía, continuidad y momento que se pueden presentar de forma generalizada en la ecuación de transporte, integrando los principios de Navier-Stokes a través de un balance de materia y energía (Rishor, R., 2015). Ver ecuación (1).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t}+\frac{\partial (U\Phi)}{\partial x}+\frac{\partial (V\Phi)}{\partial y}+\frac{\partial (W\Phi)}{\partial z}=-\Gamma \Delta \Phi^2+S_\Phi$$

Donde $\Phi$, representa la concentración del término adimensional, que se refiere a momento, masa o energía. $U$, $V$ y $W$ son los componentes del vector de velocidad en tres dimensiones (m/s). $\Gamma$, es el coeficiente de difusividad (kg /m s) y $S_\Phi$ es el término fuente.

Para la viscosidad se resolvió el modelo k-ε de dos ecuaciones, este modelo ha sido utilizado ampliamente en el estudio de clima bajo condiciones de invernadero (Cemet et al. 2017 y Flores, V.J., et al., 2014). Las características termo físicas del aire se consideraron constantes excepto la densidad, para ésta, se usó la aproximación de Boussinesq; para la caída de presión ocasionada por la presencia de mallas antiáfidas, se usó la ley de Darcy. Según Bartzanas et al. (2014), las mallas pueden disminuir las tasas de ventilación entre un 33% y un 50% dependiendo el tipo y por lo tanto, afectar los gradientes de temperatura.

Se supuso el suelo como fuente de calor y la temperatura de aire y velocidad del viento se estudiaron con un perfil constante. El cultivo se ha considerado un medio poroso.

*2.3 Condiciones de frontera*

Se establecieron las condiciones de operación y de frontera utilizadas para el desarrollo del modelo computacional, recabados por las estaciones meteorológicas para llevar a cabo una evaluación inicial. Ver tabla 1.

**Tabla 1. Condiciones de frontera**

| Condiciones de entrada del aire | |
|---|---|
| Velocidad de entrada | 2.68 m/s |
| Temperatura de entrada | 300.49 K |
| Condiciones de temperatura de suelo | |
| Suelo del dominio | 298.5 K |
| Suelo del invernadero | 296.45 K |
| Suelo del cultivo | 294.45 K |

Con base en, Flores y colaboradores (2011) y Villagran y colaboradores (2018) se realizaron las consideraciones para el modelo que enlista la tabla 2.

**Tabla 2. Consideraciones para el modelo computacional**

| Condición | Método |
|---|---|
| Solucionador | Basado en presión |
| Modelo de viscosidad | Estándar k-ε estándar |
| Ecuación a resolver | Energía |
| Temperatura del aire | Perfil constante |
| Velocidad del viento | Perfil constante |
| Ventanas del invernadero | Salto de presión |
| Cultivo | Medio poroso |

*2.4 Validación del modelo*

Para la validación del modelo se usaron los datos obtenidos por las estaciones meteorológicas en diferentes días. El valor de error se calculó mediante RSME de 2.4. con lo que se considera que el modelo es adecuado para realizar predicciones.

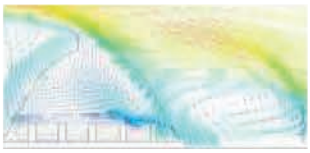
3. RESULTADOS

Se muestra un corte transversal a 30 m de la entrada del invernadero.
En los perfiles de velocidad de los escenarios simulados, se aprecia diferencia en el comportamiento del flujo de aire al entrar al invernadero, esto tiene una consecuencia en la temperatura dentro de la nave. La desviación hacia abajo que causa la barrera externa, genera un vórtice del lado derecho entre la barrera y el invernadero que limita el recorrido del aire, como se aprecia en la figura 3, donde se muestra el perfil de velocidad de aire en el dominio y la entrada del invernadero sin barrera y con ésta, colocada a 5 m, 10 m y 15 m respectivamente.

En ausencia de la barrera se observa la entrada de aire por la ventana lateral derecha alcanzando velocidades de hasta 2.6 m $s^{-1}$ y en las salidas por la ventana cenital y lateral izquierda de 1.01 m $s^{-1}$.

3a

3b


3c

3d

 ISSN en trámite

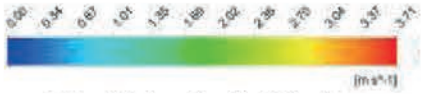


Figura 3. Perfil de velocidad de viento (m $s^{-1}$)

En el caso de la presencia de la barrera, la corriente de aire se disminuye a cero al impactarla y desviar su trayectoria, esto forma un vórtice entre la barrera y la ventana lateral que se ensancha conforme se incrementa la distancia entre la barrera y el invernadero. Éste fenómeno disminuye las velocidades de entrada de aire a rangos de entre 0.67 hasta 1.5 m $s^{-1}$ aproximadamente.

La Figura 4 muestra una comparativa de los perfiles de velocidad dentro del invernadero para cada uno de los escenarios. La desviación del viento en la entrada, ocasionada por la barrera externa, forma también un vórtice cercano a la pared derecha al ser más marcado éste en la figura 3b, permite un comportamiento en el flujo de aire que permite aun alcanzar velocidades de salida de hasta 0.5 m $s^{-1}$, a diferencia de las figuras 3c y 3d que representan separaciones de 10 m y 15 m respectivamente, donde se observan velocidades más cercanas al cero.

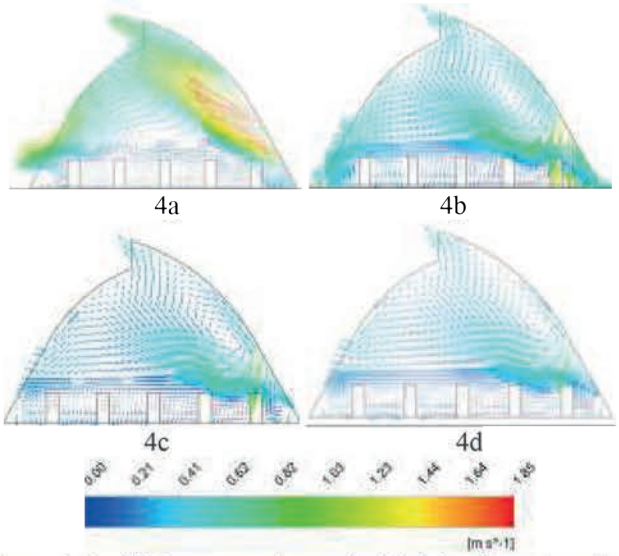



Figura 3. Perfil de trayectoria y velocidad de viento (m $s^{-1}$) al interior del invernadero

En la figura 4 se muestran perfiles de comportamiento de temperatura al interior del inveranadero para cada uno de los escenarios. El comportamientor térmico de los invernaderos con ventilación natural se ve influenciado por la capacidad de renovación del aire. Los perfiles mostrados en los diferentes casos muestran la influencia de la barrera externa sobre la temperatura, donde los escenarios 4b, 4c y 4d, muestran las menores temperaturas distrubuidas solo al lado derecho del invernadero. Lo anterior ocasionado por los vórtices creados por las corrientes de aire.

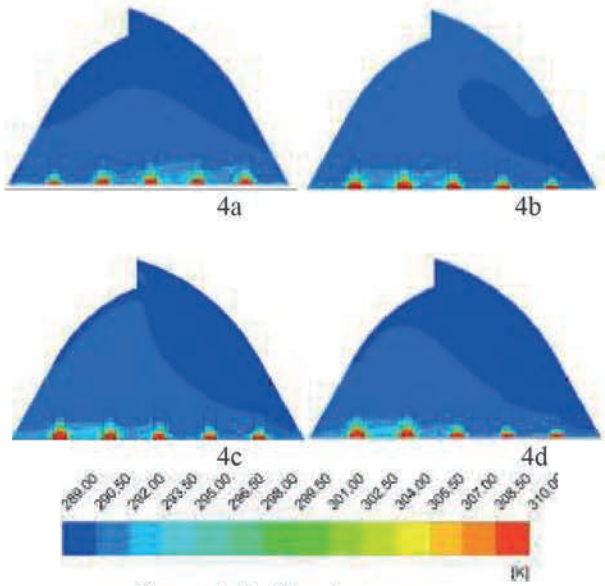



Figura 4. Perfiles de temperatura

## 4. CONCLUSION

Considerando que el clima dentro de los invernaderos es predominante en los procesos de desarrollo fisiológicos del cultivo, se considera de gran importancia el estudio de factores internos y externos que puedan afectarlo. En el presente estudio se encontró que los mejores resultados de enfriamiento se registran a la entrada del invernadero en todos los escenarios simulados, donde se observa que la temperatura interna es igual a la registrada en el exterior, (289 K) sin embargo se encontró una diferencia significativa en el comportamiento de las corrientes de y velocidad de viento derivadas de la presencia de la barrera externa. Las temperaturas más bajas ocasionadas por la ventilacion natural con las ventanas completamente abiertas, cambian su distribución, la cual se ve sezgada hacia la parte derecha. Se sugiere continuar con el estudio para determinar la distancia mínima recomendable entre barreras e invernaderos así como variar la altura de las barrera.

La construcción de estructuras cerca de los invernaderos, ya sean bardas perimetrales, edificios, o incluso huertas de frutales, deberán ser un factor más a tomar en cuenta al momento de la construcción de un invernadero.

## 5. REFERENCIAS

Bartzanas, T. B. T. K. C., Boulard, T., y Kittas, C. (2004). Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering*, *88*(4), 479-490.

Cemek, B. İ. L. A. L., Atİş, A., y Küçüktopcu, E. R. D. E. M. (2017). Evaluation of temperature distribution in different greenhouse models using computational fluid dynamics (CFD). *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, *32*(1), 54-63.

ISSN en trámite

Flores, V.J., Mejía, S.E. y Montero, J.I. (2011). Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica. *Agrociencia,* vol. 45, nº 5, pp. 545-560.

Flores, V.J., et al., (2014). Evaluación del desempeño climático de un invernadero baticenital del centro de México mediante dinámica de fluidos computacional (CFD). *Agrociencia,* vol. 48, nº 2, pp. 131-146.

Juarez, L.P., et al. (2011). Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *CONACYT*.

Kittas, C., Katsoulas, N., y Bartzanas, T. (2009). Characterization and analysis of the effects of greenhouse climate control equipment on greenhouse microclimate and crop response. *In International Symposium on High Technology for Greenhouse Systems: GreenSys2009 893* (pp. 117-132).

Larrazabal, M., (2020). Tipos de Invernadero. Clasificación y Características. Construcción y Equipamientos. [Blog] Disponible en: https://www.bialarblog.com/tipos-de-invernadero-clasificacion-caracteristicas/. [Consultado 20 de enero de 2020].

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2017). Planeación Agrícola Nacional 2017-2030, México.

Serrano, A.J., Xamán J., y Álvarez, G. (2013). Optimum ventilation based on the ventilation effectiveness for temperature and $CO_2$ distribution in ventilated cavities. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *62*, 9-21.

Villagran, M.E.A., Bojacá, A.C.R., y Rojas, B.N.A. (2018). Determinación del comportamiento térmico de un invernadero espacial colombiano mediante dinámica de fluidos computacional. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, *21*(2), 415-426.

Rishor, R. (2015). Análisis del Comportamiento Térmico de un Invernadero Construido en Ladera, Aplicando Dinámica de Fluidos Computacional (Doctoral dissertation, Bachelor's Thesis), *Costa Rica University*, San Jose, Costa Rica, 2015. Disponible en: https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2016/02/tesis-adriana-rojas.pdf.

Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada
Volumen 5, Núm. 2, Julio - Diciembre 2022

ISSN en trámite

# Modelo Dinámico de Crecimiento de dos Especies en Amensalismo para Representar el Comportamiento de un Fenómeno Económico

**Ahtziry Guadalupe Jacobo Grande*. Alfonso de Jesús Morales Erosa**, Juan Reyes Reyes****

**Estudiante de la Carrera de Ingeniería en Gestión Empresarial, Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico del Sur de Nayarit, Carretera Crucero Ahuacatlán-Jala Km 4.5, C.P. 63880 Jala, Nayarit, (e-mail: ahtziry.jacgra@gmail.com).*
***Departamento de Ingeniería Electrónica, Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. (e-mail: alfonso.morales17ee@cenidet.edu.mx, juan.rr@cenidet.tecnm.mx)*

**Resumen:** El presente artículo muestra algunas propiedades de un sistema dinámico de crecimiento de dos especies, así como una metodología para seleccionar los parámetros del mismo a partir de la inspección de datos de algún fenómeno de crecimiento. El modelo de dos especies mostrado, está basado en una extensión del modelo tipo Verhulst con un par de parámetros que acoplan el efecto de cada especie con la otra. La metodología para ajustar los parámetros, permite que, dado un conjunto de datos muestreados y registrados para un fenómeno con características de crecimiento, se logre que haya una aproximación de las trayectorias hasta alcanzar el equilibrio Al final del artículo, se muestra un ejemplo con sus simulaciones numéricas para verificar el enfoque propuesto con un modelo dinámico de crecimiento de dos especies en régimen de amensalismo, y el modelo correspondiente es ajustado para aproximar el comportamiento dinámico de un fenómeno económico.

*Palabras clave:* Modelo dinámico de crecimiento, amensalismo, fenómeno económico.

## 1. INTRODUCCIÓN

Gómez López, R. (2004) sugiere que "los modelos en general juegan un papel fundamental en economía puesto que permiten la representación de teorías mediante la simplificación de la realidad".

El uso de modelos dinámicos de crecimiento se han usado desde tiempos de la segunda guerra mundial, para saber cómo operaba la economía. Hoy en día no solo se utilizan para conocer cómo se desarrolla la economía sino para realizar predicciones sobre el comportamiento de hechos y determinar los efectos o tomar decisiones sobre los mismos. Un ejemplo de modelo de crecimiento es el de coexistencia tipo Verhulst propuesto por Ribeiro, F. (2010) y se utiliza para representar el acoplamiento entre el crecimiento dinámico de dos especies. Dicho acoplamiento ayuda a definir si la interacción entre las especies es positiva, negativa o neutral, y poder predecir el crecimiento de las especies.

El modelo se ha utilizado para representar la competencia, o el acoplamiento, del crecimiento del mercado de vehículos de combustible tradicional (gasolina, diesel) en contra de los vehículos a base de energías limpias (híbridos, eléctricos) por Sun, S. (2018). También para modelar el crecimiento de la industria de servicios logísticos y la interacción entre grandes, medianos y pequeños proveedores por Sundarakani, B. (2019).

Y, por otro lado, Zhou, Y. (2021), analiza el acoplamiento entre el crecimiento de la industria de servicios logísticos y la industria manufacturera. Los casos anteriores tienen como propósito ayudar en la estrategia de toma de decisiones.

Una de las interacciones básicas entre las especies que puede representar el modelo de coexistencia es el amensalismo, donde una especie afecta negativamente a otra, mientras que la segunda especie tiene muy poco o ningún efecto sobre la primera. Chen, B. (2018) Durante la última década, se han investigado sobre los comportamientos dinámicos del modelo de amensalismo. Temas tales como la estabilidad local del equilibrio, la existencia de la solución periódica positiva, extinción de las especies, bifurcación del sistema con retraso y la influencia del refugio han sido estudiados y se han obtenido muchos resultados excelentes.

En este artículo se aborda un marco teórico en una sección con las herramientas y definiciones para abordar el resultado principal, cuya sección que describe un modelo de competencia o coexistencia de dos especies con sus propiedades principales y un algoritmo propuesto para ajustar el modelo, ajuste se hace para una configuración en amensalismo enfocado a un

 ISSN en trámite

fenómeno económico. Se muestran simulaciones para comparar los datos del fenómeno con los que desarrolla la simulación del modelo.

## 2. MARCO TEÓRICO

### *2.1 El método numérico de Euler para la simulación para modelos dinámicos*

La formulación del método de Euler puede considerarse a partir de una ecuación diferencial de la forma:

$$\dot{x}(t) = f\,(x(t), u(t))\,, \quad x(0) = x_{ini}\,; \qquad (1)$$

esta ecuación diferencial puede ser la representación de un sistema dinámico, donde:

$x(t)$ es una variable de interés que tiene un valor en el instante de tiempo $t$.

$u(t)$ es una variable escalar de entrada o de excitación del sistema.

Si se desea realizar la simulación numérica en tiempo discreto del sistema (1), para un intervalo de tiempo

$$0 \leq t \leq T_{fin}; \qquad (2)$$

se puede hacer mediante la siguiente ecuación de diferencias basada en el método de Euler

$$x(t_{k+1}) = x(t_k) + h \cdot f\,(x(t_k), u(t_k))\,, \quad x(t_0) = x_{ini}\,; \qquad (3)$$

donde:

$h > 0$ es el tiempo de muestreo

$k = 0, 1, 2, \cdots, N;$ es la iteración.

$t_k = k \cdot h;$ es el instante de tiempo en la $k$-ésima iteración.

El tiempo final de simulación $T_{fin}$ define el número de iteraciones $N$, de modo que el diseñador escoge el número de iteraciones de tal forma que $N \cdot h$ sea prácticamente igual a $T_{fin}$, es decir:

$$N \cdot h \cong T_{fin}. \qquad (4)$$

### *2.2 Modelo de coexistencia tipo Verhulst*

El modelo de coexistencia tipo Verhulst considera el siguiente sistema dinámico de dos especies:

$$\Sigma : \begin{cases} \dot{x}_1 = r_1 x_1 \left(1 - \frac{x_1}{N_1} + \alpha_1 \frac{x_2}{N_1}\right) \\ \dot{x}_2 = r_2 x_2 \left(1 - \frac{x_2}{N_2} + \alpha_2 \frac{x_1}{N_1}\right) \end{cases} \qquad (5)$$

donde las variables $x_1$ y $x_2$ son el número instantáneo de individuos de la especie 1 y 2 respectivamente, se le ha retirado la notación en el tiempo para simplificar la notación, es decir,

$$x_1 = x_1\,(t)\,, \quad x_2 = x_2\,(t)\,; \qquad (6)$$

y además las condiciones iniciales son

$$x_{1_{ini}} = x_1\,(0)\,, \quad x_{2_{ini}} = x_2\,(0)\,. \qquad (7)$$

Los tipos de coexistencia que pueden ser configurados en el modelo (5) son: presa-predador, mutualismo o simbiosis, competencia, amensalismo, comensalismo y neutralismo. En la tabla 1 se muestran las configuraciones posibles del modelo de coexistencia tipo Verhulst.

**Tabla 1. Configuraciones de la competencia en el modelo expresado en (5)**

| Valor de $\alpha_1$ | Valor de $\alpha_2$ | Tipo de Coexistencia | Característica de la coexistencia |
|---|---|---|---|
| $\alpha_1 < 0$ | $\alpha_2 > 0$ | Presa-depredador | $x_1$ es la presa, $x_2$ el predador. |
| $\alpha_1 > 0$ | $\alpha_2 < 0$ | | $x_1$ es el predador, $x_2$ la presa. |
| $\alpha_1 < 0$ | $\alpha_2 < 0$ | Competencia | Cada especie perjudica a la otra. |
| $\alpha_1 > 0$ | $\alpha_2 > 0$ | Mutualismo o simbiosis. | Cada especie se beneficia de la otra. |
| $\alpha_1 < 0$ | $\alpha_2 = 0$ | Amensalismo | $x_1$ es la ***especie perjudicada*** por $x_2$, la especie $x_2$ crece de manera ***independiente***. |
| $\alpha_1 = 0$ | $\alpha_2 < 0$ | | La especie $x_1$ crece de manera ***independiente***, $x_2$ es ***perjudicada*** por $x_1$. |
| $\alpha_1 > 0$ | $\alpha_2 = 0$ | Comensalismo | $x_1$ es la ***especie beneficiada*** por $x_2$, la especie $x_2$ crece de manera independiente. |
| $\alpha_1 = 0$ | $\alpha_2 > 0$ | | La especie $x_1$ crece de manera ***independiente***, $x_2$ es ***beneficiada*** por $x_1$. |
| $\alpha_1 = 0$ | $\alpha_2 = 0$ | Neutralismo | Cada especie crece de manera ***independiente*** de la otra. |

#### *2.2.1 Características del Modelo de coexistencia tipo Verhulst*

Previamente se mostró en la tabla 1, que el modelo de competencia tipo Verhulst puede tener varias configuraciones o regímenes de competencia. Después de analizar el modelo de

 ISSN en trámite

coexistencia (5), se pueden definir las siguientes propiedades generales del sistema:

**Valores finales.-** Cada especie con condiciones iniciales no nulas, es decir,

$$x_{1_{ini}} > 0 \quad \text{y} \quad x_{2_{ini}} > 0$$

tiene sus valores finales definidos por las siguientes expresiones:

$$\bar{x}_1 := \lim_{t\to\infty} x_1(t) = \frac{N_1 + \alpha_1 N_2}{1 - \alpha_1\alpha_2} \quad \text{y} \quad \bar{x}_2 = \lim_{t\to} x_2(t) = \frac{N_2 + \alpha_2 N_1}{1 - \alpha_1\alpha_2}.$$

Esto quiere decir que al momento en que $x_1$ o $x_2$ alcanzan su valor final, se detiene el crecimiento y las poblaciones de cada especie permanecen constantes en el valor $\bar{x}_1$ para la población 1 y en $\bar{x}_2$, para la población 2.

**Puntos de inflexión.-** El punto de inflexión indica el momento en el cual la tasa de crecimiento de la población de una especie pasa de acelerarse a decerelarse, o cuando la concavidad de la trayectoria de una población cambia de ser "hacia arriba" a ser "hacia abajo" y viceversa. Y se puede definir para cada especie como:

$$x_{1_{infx}} = \frac{2N_1 + \alpha_1 N_2}{4 - \alpha_1\alpha_2} \qquad (8)$$

$$x_{2_{infx}} = \frac{2N_2 + \alpha_2 N_1}{4 - \alpha_1\alpha_2} \qquad (9)$$

Nótese que las propiedades mostradas dependen de los parámetros del sistema y son independientes de las condiciones iniciales.

**Propiedades generales de la estructura del sistema.-** En cualquiera de las configuraciones, los términos que se tienen del lado derecho de cada ecuación diferencial expresadas en (5), poseen las características o propiedades descritas en seguida.

El término

$$\frac{r_j}{N_j}x_j, \quad j = 1,2;$$

es el término que define la tasa de crecimiento de la especie j de manera intrínseca, el término correspondiente a

$$-\frac{r_j}{N_j}x_j^2, \quad j = 1,2;$$

define la tasa de muerte de la especie j por su propia naturaleza.

Ahora bien, el término que acopla a una especie con la otra a través del parámetro $\alpha_j$ es el siguiente

$$\alpha_j\frac{r_j}{N_j}x_j x_k, \quad j = 1,2; \quad k = 3 - j;$$

el cual es un término correspondiente a la tasa de crecimiento de la especie j por el efecto de la especie k, es decir, el efecto la competencia interespecífica en el crecimiento de cada especie, el cual no solamente tiene ponderada su magnitud a través del parámetro $\alpha_j$, si no que también define el signo del término completo. Por ello dicho término define si la especie j es favorecida, perjudicada o independiente de la especie k, como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 2. Efecto del término interespecífico**

| Caso | Efecto del término interespecífico $\alpha_j\frac{r_j}{N_j}x_j x_k$ |
|---|---|
| $\alpha_j > 0$ | La tasa de crecimiento de la especie j es favorecida por la especie k. |
| $\alpha_j = 0$ | La tasa de crecimiento de la especie j es independiente de la especie k. |
| $\alpha_j < 0$ | La tasa de crecimiento de la especie j es perjudicada por la especie k. |

Así por ejemplo, en el caso del neutralismo, los nacimientos son representadas por los términos

$r_1x_1$ para la especie 1 y,

$r_2x_2$ para la especie 2.

Mientras que las muertes se representan por los términos

$-\frac{r_1x_1^2}{N1}$ para la especie 1, y

$-\frac{r_2x_2^2}{N2}$ para la especie 2.

*2.2.2 Un Ejemplo del modelo de crecimiento de dos especies tipo Verhulst configurado como presa-depredador*

Dentro del modelo de crecimiento tipo Verhulst se consideró el siguiente sistema dinámico :

$$\Sigma : \begin{cases} \dot{x}_1 = x_1\left(1 - \frac{x_1}{20} + 0.25\frac{x_2}{20}\right) \\ \dot{x}_2 = 2x_2\left(1 - \frac{x_2}{30} - \frac{x_1}{30}\right) \end{cases} \qquad (10)$$

Donde podemos observar que se tienen 2 especies, la tasa de nacimientos de la especie 1 es igual a $x_1 + 0.25x_1x_2$ y la tasa de nacimientos de la especie 2, es solamente el término $r_2x_2 = 2x_2$ ; por otra parte la tasa de muertes de especie 1, están representadas por el término $-\frac{x_1^2}{20}$ y la tasa de muertes de especie 2, está representada por $-\frac{2x_2^2}{30} - \frac{2x_2x_1}{30}$. En este caso la especie 1 es de depredadores y la especie dos las presas, por ello la tasa de nacimientos o de crecimiento de la especie 1, tiene acoplada de manera positiva a la especie 1, a su vez, en la dinámica de las presas se observa el efecto negativo en el

 ISSN en trámite

crecimiento de éstas, a través del acoplamiento negativo con los depredadores.

Estos efectos pueden mostrarse simulando el sistema con los siguientes parámetros de simulación:

$$x_{1_{ini}} = 1,\ x_{2_{ini}} = 2,\quad N_1 = 20,\ N_2 = 30$$
$$\alpha_1 = 0,25,\ \alpha_2 = -1,\ r_1 = 1 \text{ y } r_2 = 2;$$

quedando de la siguiente manera:

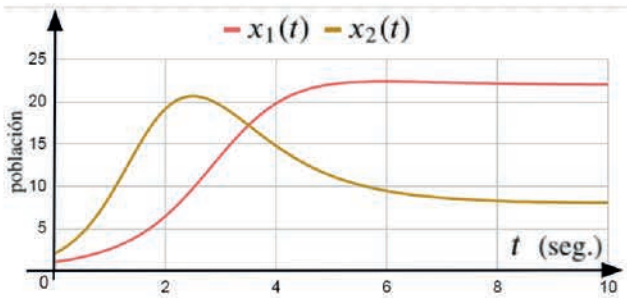



Fig. 1. Poblaciones de $x_1$ depredadores y $x_2$ presas

Se observa que la especie $x_1$ tiene un efecto depredador sobre la especie $x_2$ que es la presa, ya que en la medida que crece la población de depredadores, la de las presas disminuye. Además, se observa que el valor final de la especie 1 es de 22 depredadores y su punto de inflexión se encuentra cuando existen aproximadamente 12 individuos. Mientras que el valor final de la especie 2 es igual a 8 presas y su punto de inflexión se encuentra cuando existen 9 individuos, estos últimos valores pueden corroborarse con las ecuaciones.

## 3. RESULTADO PRINCIPAL

### *3.1 Ejemplo de configuración del modelo de coexistencia en amensalismo, en un servicio de transporte de pasajeros*

El modelo de coexistencia tipo Verhulst, configurado como amensalismo tiene la siguiente estructura:

$$\Sigma : \begin{cases} \dot{x}_1 = r_1 x_1 \left(1 - \frac{x_1}{N_1}\right) \\ \dot{x}_2 = r_2 x_2 \left(1 - \frac{x_2}{N_2} + \alpha \frac{x_1}{N_2}\right) \end{cases} \quad (11)$$

con $\alpha < 0$, se le ha retirado el subíndice de la representación generalizada, para simplificar la notación. Este modelo es el que se abordará en el resultado principal de este reporte, de modo que represente un modelo económico en el que la especie 2, es decir, $x_2(t)$ representará una variable económica, cuyo comportamiento es perjudicado por una variable antagónica o nociva $x_1(t)$, cuyo comportamiento de crecimiento tiene una trayectoria independiente.

Así por ejemplo en la siguiente figura 2 se muestra un ejemplo entre servicios de transporte de pasajeros por aplicación móvil (Uber y Lyft), que representaremos por $x_1(t)$ y otros tradicionales (renta de autos y taxis) representados $x_2(t)$, disponible en el artículo "Numbers are in: Uber, Lyft v. Rental Cars & Taxis in the US in Q2" del periódico Wolf Street: The Stories behind Business, Finance & Money; por Wolf Richter de julio 29 de 2018. (enlace: https://wolfstreet.com/2018/07/29/the-numbers-are-in-uber-lyft-versus-rental-cars-and-taxis-in-the-us-in-q2/)

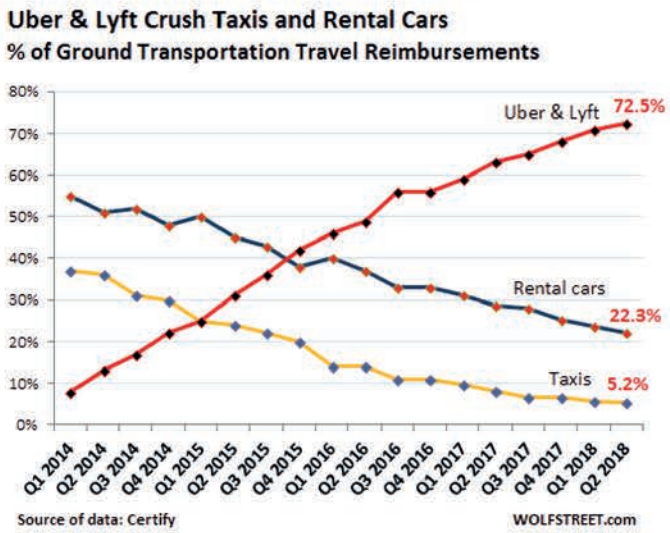



Fig. 2. Uber & Lyft Crush Taxis and Rental Cars

Dada la figura anterior y para darle la dimensión adecuada a la variable del tiempo tiempo, se considerará a la variable del tiempo $t$ con unidades en trimestres.

**Tabla 2. Porcentaje de servicios de transporte solicitados por trimestres**

| $i$ | Periodo | $t_i$ | Especie 1, los servicios de aplicación Uber y Lyft : $x_{1Exp}(t_i)$ | Especie 2, los servicios tradicio- nales $x_{2Exp}(t_i)$ |
|---|---|---|---|---|
| 0 | ene-mar 2014 | 1 | 8 | 92 |
| 1 | abr-jun 2014 | 2 | 11 | 89 |
| 2 | jul-sept 2014 | 3 | 18 | 82 |

 ISSN en trámite

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 3 | oct-dic 2014 | 4 | 21 | 79 |
| 4 | ene-mar 2015 | 5 | 25 | 75 |
| 5 | abr-jun 2015 | 6 | 30 | 70 |
| 6 | jul-sep 2015 | 7 | 38 | 62 |
| 7 | oct-dic 2015 | 8 | 40 | 60 |
| 8 | ene-mar2016 | 9 | 48 | 52 |
| 9 | abr-jun 2016 | 10 | 49 | 51 |
| 10 | jul-sep 2016 | 11 | 58 | 42 |
| 11 | oct-dic 2016 | 12 | 58 | 42 |
| 12 | ene-mar2017 | 13 | 59 | 41 |
| 13 | abr-jun 2017 | 14 | 62 | 38 |
| 14 | jul-sept 2017 | 15 | 65 | 35 |
| 15 | oct-dic 2017 | 16 | 68 | 32 |
| 16 | ene-mar 2018 | 17 | 71 | 29 |
| 17 | abril-jul 2018 | 18 | 72,5 | 27.5 |

Ahora bien, se transcribe el modelo en régimen de amensalismo tipo Verhulst:

$$\Sigma : \begin{cases} \dot{x}_1 = r_1 x_1 \left(1 - \frac{x_1}{N_1}\right) \\ \dot{x}_2 = r_2 x_2 \left(1 - \frac{x_2}{N_2} + \alpha \frac{x_1}{N_2}\right) \end{cases} \quad (12)$$

en el cual se desea que se aproxime al comportamiento mostrado en la tabla anterior, de modo que $x_1(t)$ se aproxime a los servicios de Uber y Lyft $x_{1Exp}(t_i)$, y que $x_2(t)$ se aproxime a los valores mostrados en el servicio tradicional de transporte $x_{2Exp}(t_i)$.

Una manera de resolverlo es realizando una simulación y siguiendo los pasos del algoritmo que enseguida se define.

**Algoritmo para ajuste paramétrico**

**Paso 1**. Seleccionar la condición inicial $x_{1ini}$.
**Paso 2**. Seleccionar a la capacidad de carga $N_1$.
**Paso 3**. Seleccionar el parámetro de crecimiento intrínseco $r_1$.
**Paso 4**. Si el resultado es satisfactorio, ir al **paso 5**, si no, ir al **paso 2**.
**Paso 5**. Seleccionar la condición inicial $x_{2ini}$.
**Paso 6**. Seleccionar a la capacidad de carga $N_2$.
**Paso 7**. Seleccionar el parámetro de crecimiento intrínseco $r_2$ y $\alpha$.
**Paso 8**. Si el resultado es satisfactorio, ir al **paso 9**, si no, ir al **paso 6**.
**Paso 9**. Fin.

El paso de integración para la simulación fue de 0.1 unidades de trimestre, mediante el método de integración de Euler expresado en las ecuaciones de diferencias en (3). La gráfica obtenida del modelo y las simulaciones asociadas al algoritmo de ajuste paramétrico se muestran en la figura 3.

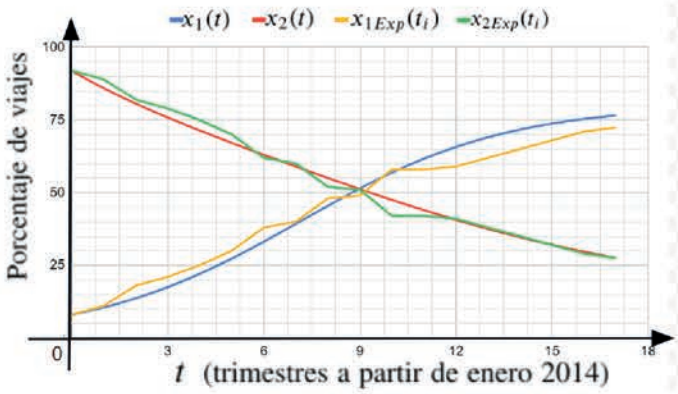



Fig. 3. Resultado del ajuste del modelo dinámico en régimen de amensalismo: Uber, Lyft $x_1(t)$ vs Rental Cars & Taxis $x_2(t)$

El objetivo de esta simulación fue demostrar que el modelo de competencia en amensalismo, en el que la especie 2, es decir, $x_2(t)$ (Línea roja) es perjudicado por una variable antagónica o nociva $x_1(t)$ (Línea azul), cuyo comportamiento de crecimiento tiene una trayectoria independiente.

El modelo que se logrò con el algoritmo para ajuste paramétrico es el siguiente:

$$\Sigma_{Transp} : \begin{cases} \dot{x}_1 = 0.311 x_1 \left(1 - \frac{x_1}{80}\right) \\ \dot{x}_2 = 0.0699 x_2 \left(1 - \frac{x_2}{50} + \alpha \frac{x_2}{50}\right) \end{cases}$$

$$r_1 = 0.311, \; r_2 = 0.0699, \; \alpha = -1,$$

$$x_{1_{ini}} = 8, \; x_{2_{ini}} = 92. \quad (13)$$

Desde el punto de vista del contexto del fenómeno, puede notarse que en el modelo obtenido $N_1 = 80$, es decir, que dada la tendencia de los datos y el modelo obtenido de los mismos, después de julio de 2018 el mercado quedaría eventualmente con un equilibrio de 80% de servicios Uber y Lift y el 20% de servicios de transporte tradicional.

Es decir, se puede ratificar que los servicios de aplicación móvil, no desplazarán a los transportes tradicionales, es decir, ambos servicios coexisten ofreciendo servicios.

 ISSN en trámite

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta de manera general el modelo de crecimiento de dos especies tipo Verhulst, mostrando algunas propiedades que pueden ser útiles para la interpretación y modelado de fenómenos de competencia. Se propone un algoritmo basado en la interpretación de las propiedades citadas, que deja descrita una manera de construir un modelo de competencia o coexistencia. Los resultados del modelado se ejemplifican en un fenómeno de oferta de dos servicios de transporte de pasajeros, el cual, a través del algoritmo da como resultado un modelo de amensalismo de servicio transportes de pasajeros. Sin embargo, el modelo y su ajuste a través del algoritmo puede ser abordado para la representación de otros fenómenos políticos, económicos, biológicos, sanitarios, meteorológicos, etc. en el resto de los regímenes.

Particularmente, el modelo de amensalismo tiene la posibilidad de que la especie independiente extinga a la otra especie. En el ejemplo de simulación mostrado, el modelo obtenido, muestra que los servicios de transporte de aplicación no desplazan (extinguen) a los de transporte tradicional. Y es importante señalar, que esto no sucedió porque, los datos mostrados para hacer el modelo, así lo configuraron.

Por otro lado, los modelos permiten en muchos casos conocer el funcionamiento de manera sencilla, rápida y precisa para identificar las variables más importantes que determinan cualquier fenómeno ya sea económico, biológicos, meteorológicos, etc.

## REFERENCIAS

Ribeiro, F., Cabella, B.C.T., Martinez, A.S., A verhulst-like two-species population dynamics model. arXiv preprint arXiv:1010.3361(2010).

Sun, S. Wang, W., Analysis on the market evolution of new energy vehicle based on population competition model. Transportation Research Part D: Transport and Environment 65, 36–50 (2018).

Sundarakani, B., Lai, Y.S., Goh, M., de Souza, R.: Studying the sustainability of third party logistics growth using system dynamics. Journal of Modelling in Management 14(4), 872–895 (2019).

Zhou, Y., Yan, L., An analytical study of the external environment of the coevolution between manufacturing and logistics based on the logistic model. Complexity 2021 (2021).

Chen, B. Dynamic behaviors of a non-selective harvesting Lotka–Volterra amensalism model incorporating partial closure for the populations. Adv Differ Equ 2018, 111 (2018). https://doi.org/10.1186/s13662-018-1555-5

Garcia, A., Tume, J., Juárez, V., Determinación de los parámetros de crecimiento de la Tilapia Nilótica (Oreochromis niloticus) en un estanque revestido con geomembrana y abastecido con agua de subsuelo; Ciencia y Desarrollo V. 15 / Nº 2- 2012, Universidad Alas Peruanas, PERÚ.

Jørgensen, S., y Fath, B. (2008). Encyclopedia of Ecology. Amsterdam the netherlands: Elsevier B.V.

Lin, Q.X., Zhou, X.Y.: On the existence of positive periodic solution of a amensalism model with Holling II functional response. Commun. Math. Biol. Neurosci. 2017, Article ID 3 (2017)

Richter, W. (Julio 29, 2018). Numbers are in: Uber, Lyft v. Rental Cars & Taxis in the US in Q2., de Wolf Street: The Stories behind Business, Finance & Money Sitio web: https://wolfstreet.com/2018/07/29/the-numbers-are-in-uber-lyft-versus-rental-cars-and-taxis-in-the-us-in-q2/#comments

Sita Rambabu, B., Narayan, K.L., & Bathul, S.: A mathematical study of two species amensalism model with a cover for the first species by homotopy analysis method. Adv. Appl. Sci. Res. 3(3), 1821–1826 (2012)

Xie, X., Chen, F., & He, M. (2016). Dynamic behaviors of two species amensalism model with a cover for the first species. J. Math. Computer Sci. 16 (2016), 395–401.

Xiong, H.H., Wang, B.B., Zhang, H.L.: Stability analysis on the dynamic model of fish swarm amensalism. Adv. Appl. Math. 5(2), 255–261 (2016)

Zhang, Z.: Stability and bifurcation analysis for a amensalism system with delays. Math. Numer. Sin. 30, 213–224 (2008)

# INGENIERÍA MECÁNICA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

 ISSN en trámite

# Evaluación térmica de una ventana de vidrios múltiples caso de estudio: clima Aw, Mérida, Yucatán 2022

**Samanta López Salazar*, E. Simá*, I. Hernández-López****

* Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Mor., CP, 62490, México
(e-mail:samanta.lopez.salazar@gmail.com, efrain.sm@cenidet.tecnm.mx)
**Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, CP 83000
(e-mail: irving.hernandez@unison.mx).

**Resumen**: Se realizó un estudio teórico del efecto del número de vidrios y la orientación sobre el desempeño térmico de una ventana bajo condiciones del día más cálido de Mérida, Yucatán. A través de un código numérico propio desarrollado en FORTRAN se modeló la transferencia de calor conjugada en la ventana en dos dimensiones por el método de volumen finito. Se compararon tres configuraciones de vidrio: simple (SPW), doble (DPW) y triple (TPW); se encontró que la configuración DPW reduce la temperatura superficial de la ventana hasta 3.4°C y la ganancia de energía por convección y radiación 36.6% con respecto al vidrio simple. No obstante, la configuración TPW es capaz de reducir el flujo de calor total hacía el interior hasta 16.1 y 37.8% con respecto a la DPW y SPW. Además, cuando se utiliza la configuración TPW la energía requerida para mantener condiciones de confort térmico al interior es menor: 1.28, 1.81, 1.51 y 2.52 $kWhm^{-2}$ en el norte, sur, este y oeste, respectivamente. En la orientación oeste, el incremento de la radiación solar y la temperatura exterior después del mediodía crean la necesidad de utilizar vidrios múltiples para disminuir la transmitancia del sistema y reducir hasta 32.6% la energía requerida para mantener la temperatura al interior en 25°C.

***Palabras clave:*** vidrios múltiples, transferencia de calor conjugada, evaluación térmica, estudio transitorio.

## 1. INTRODUCCIÓN

Por estética, los arquitectos o diseñadores optan por integrar a los edificios grandes áreas vidriadas para aprovechar la luz natural y brindar vista al exterior. Sin embargo, las ventanas y fachadas de vidrio son las partes más frágiles de la edificación en términos de rendimiento energético [1] debido a sus propiedades ópticas y a su bajo aislamiento térmico. Una alternativa para mejorar el aislamiento térmico de las ventanas es cambiar su estructura: aumentar el número de vidrios [2] y usar fluidos encapsulados como aire [3] o gases nobles [4]. No obstante, una ventana óptima no es aquella que solo cumple con estándares de confort térmico, sino también con el aspecto visual que involucra su tamaño [5], posición [6] y orientación [7].

*Amaral et al., 2016* [8] consideraron el número de vidrios (1-3), tamaño, posición y efecto sombra que permitiera mejorar el desempeño térmico de una ventana en términos de confort y ahorro de energía; en todos los casos el vidrio solo y el doble tuvieron un comportamiento térmico similar, no obstante, el vidrio triple obtuvo resultados prometedores. Más adelante, *Arici et al., 2020* [9] analizaron el efecto del número de vidrios y el espesor de la capa de aire sobre el coeficiente global de transferencia de calor $U$; el riesgo de aumentar el valor de $U$ en ventanas inclinadas puede reducirse al utilizar más vidrios y un espesor óptimo para la capa de aire. Recientemente, *Rodríguez-Aké et al., 2022* [10] reportaron el primer trabajo enfocado al desempeño térmico de una ventana de vidrio triple (TPW) bajo condiciones de clima cálido (Aw) de México. A través de un código numérico propio determinaron el espesor óptimo de las capas de aire para la configuración TPW ($b$=0.01m). Asimismo, evaluaron el potencial de ahorro de energía y la emisión de $CO_2$ de la configuración propuesta con respecto a una ventana de vidrio doble y simple. Con respecto a un vidrio simple, las ventanas de vidrio doble y triple reducen el flujo de calor 12 y 40%, respectivamente [3 y 10]. No obstante, estos resultados se obtuvieron a través de un análisis realizado en estado permanente mediante un falso transitorio; es decir, a partir de tendencias construidas en instantes de tiempo definidos que no consideran la información previa. Además, la ventana se consideró en la orientación sur; en esta orientación los niveles de radiación solar descienden en primavera/verano cuando la temperatura ambiente aumenta, mientras en otoño/invierno ocurre lo contrario, debido a esto, hay un equilibrio natural en las condiciones climáticas bajo las cuales se evalúa la ventana; los resultados pueden cambiar si la ventana se considera en otra orientación (i.e. este/oeste).

Por lo anterior, en este trabajo se presenta la evaluación dinámica de la transferencia de calor conjugada en una ventana de vidrios múltiples (uno, dos y tres vidrios), y se analiza el efecto de la orientación sobre su desempeño térmico. La evaluación térmica se llevó a cabo bajo las condiciones climáticas del día más cálido en Mérida, Yucatán (Aw).

 ISSN en trámite

## 2. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

### 2.1. *Modelo físico*

En la Figura 1 se muestra el modelo físico, sistema coordenado y la nomenclatura usada en la solución numérica de ventanas de vidrios múltiples, en específico la configuración de vidrio triple (TPW). La TPW está conformada por tres paredes semitransparente de espesor $x_{vidrio}$=0.004 m; los vidrios están separados por dos capas de aire $b$=0.01 m. Para la configuración de dos vidrios (DPW) el espesor de la capa de aire es 0.02 m de acuerdo con lo reportado por [11], la altura de la ventana es $H = 0.80$ m.

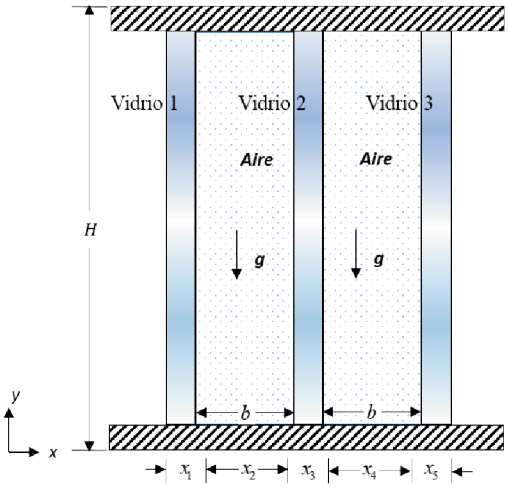



Figura 1. Modelo físico de una ventana de vidrios múltiples: configuración de vidrio triple (TPW).

Los mecanismos de transferencia de calor involucrados en la TPW se muestran en la Figura 2, estos son: conducción a través de paredes semitransparentes, convección natural en el aire encapsulado e intercambio radiativo entre las superficies que encierran al fluido. La transferencia de calor conjugada entra en juego a través de las fronteras verticales.

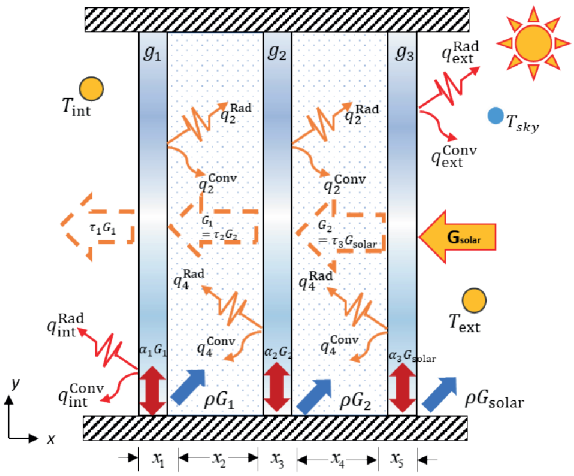



Figura 2. Mecanismos de transferencia de calor en una ventana de vidrio triple.

### 2.2. *Consideraciones*

- Debido a las dimensiones de la ventana y la diferencia de temperaturas que puede existir, el flujo se considera en régimen laminar.
- Las paredes horizontales, superior e inferior, se consideran adiabáticas.
- El fluido en este caso aire, es newtoniano e incompresible.
- Se considera aire seco, por lo tanto, es un medio radiativamente no participante.
- Las propiedades termofísicas se consideran constantes, con excepción de la densidad en el término de flotación (aproximación de Bussinesq) en la ecuación de cantidad de movimiento en dirección $y$.

### 2.3. *Modelo matemático*

El modelo de convección natural para el aire encapsulado se representa a través de las ecuaciones de Navier-Stokes (Ecs. 1-3) y la ecuación de la energía, Ec. (4). Donde las variables dependientes son: las componentes de velocidad ($u$ y $v$), la presión ($P$) y la temperatura ($T$).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\, u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\, u)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) - \frac{\partial P}{\partial x} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho\, v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\, v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\, v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g \beta (T - T_\infty) \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho C_P T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\, C_P\, u\, T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\, C_P\, v\, T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) \tag{4}$$

El modelo de conducción de calor en paredes semitransparentes se representa por la Ec. (5). Dónde: $\Theta(x) = G \cdot exp\left[-S_g(x_{\text{vidrio}} - x)\right]$ es la función de atenuación de energía por absorción y dispersión, $G$ es la radiación incidente en el vidrio antes de penetrarlo, $S_g$ es el coeficiente de atenuación del vidrio y $x_{\text{vidrio}}$ corresponde al espesor del vidrio.

$$\frac{\partial(\rho C p_g T_g)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y}\right) + \frac{\partial \Theta(x)}{\partial x} \tag{5}$$

Para considerar el intercambio radiativo entre las superficies que encapsulan el fluido se realiza un balance de energía radiativo, Ec. (6), en el que se establece la diferencia entre la radiación que sale de la pared (radiosidad, $\boldsymbol{q}_{\text{o,k}}$) y la que llega a dicha pared ($\boldsymbol{q}_{\text{i,k}}$).

 ISSN en trámite

$$q_{\mathrm{r,k}}(\mathrm{r_k}) = q_{\mathrm{o,k}}(\mathrm{r_k}) - q_{\mathrm{i,k}}(\mathrm{r_k}) \tag{6}$$

Las condiciones de frontera hidrodinámicas para el fluido encapsulado son de no deslizamiento, por otro lado, las condiciones de frontera térmicas para ambas cavidades llenas de aire se presentan en las Ec. (7) y (8).

$$\begin{aligned}
&\textbf{Para } \boldsymbol{0 \le y \le Hy} \\
&q_{vidrio}^{cond} = q_{fluido}^{cond} + q_2^{Rad}, x = x_1 \\
&q_{fluido}^{cond} = q_{vidrio}^{cond} - q_4^{Rad}, x = (x_1 + x_2) \\
&\textbf{Para } \boldsymbol{x_1 < x_2} \\
&q_1^{conv} = -q_1^{Rad}, y = 0 \\
&q_3^{conv} = -q_3^{Rad}, y = Hy
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
&\textbf{Para } \boldsymbol{0 \le y \le Hy} \\
&q_{vidrio}^{cond} = q_{fluido}^{cond} + q_2^{Rad}, x = (x_1 + x_2 + x_3) \\
&q_{fluido}^{cond} = q_{vidrio}^{cond} - q_4^{Rad}, x = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \\
&\textbf{Para } \boldsymbol{(x_1 + x_2 + x_3) < x < (x_1 + x_2 + x_3 + x_4)} \\
&q_1^{conv} = -q_1^{Rad}, y = 0 \\
&q_3^{conv} = -q_3^{Rad}, y = Hy
\end{aligned} \tag{8}$$

De acuerdo con la Figura 2, el vidrio 1 es el vidrio en contacto con el ambiente interior a una temperatura constante ($T_{int}$=25°C), mientras el vidrio 3 está sometido a las condiciones ambientales del exterior: temperatura ambiente ($T_{ext}$), velocidad del viento ($V_{aire}$) y radiación solar ($G_{solar}$). La radiación solar incide de forma normal a la superficie del vidrio exterior, esta se refleja, se absorbe y se transmite a través de los vidrios en diferentes proporciones de acuerdo con las propiedades ópticas del vidrio claro reportadas por [3]. La energía que absorben los vidrios propicia un cambio en su temperatura lo que provoca transferencia de calor por convección y radiación al interior y exterior del sistema, Ec. (9) y (10). Los coeficientes de transferencia de calor por convección al interior y exterior del sistema fueron tomados de [10]; el coeficiente de transferencia de calor por convección al interior se considera constante, 2.5 W/m$^2$, mientras el $h_{ext}$ se calcula en función de la velocidad del viento; la temperatura de cielo ($T_{sky}$) se calculó mediante la correlación reportada por [12].

$$-\lambda \frac{\partial T_{\mathrm{g_1}}}{\partial x} = h_{int}\left( T_{int} - T_{\mathrm{g_1}}\right) + \varepsilon_{\mathrm{g_1}} \sigma \left(T_{int}^4 - T_{\mathrm{g_1}}^4\right) \tag{9}$$

$$-\lambda \frac{\partial T_{\mathrm{g_3}}}{\partial x} = h_{ext}\left(T_{\mathrm{g_3}} - T_{ext}\right) + \varepsilon_{\mathrm{g_3}} \sigma \left(T_{\mathrm{g_3}}^4 - T_{sky}^4\right) \tag{10}$$

## 3. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN NUMÉRICA

Las ecuaciones gobernantes en estado transitorio en dos dimensiones de flujo de fluidos y transferencia de calor (modelo convectivo y conductivo) se resolvieron numéricamente utilizando el método de volumen finito, mediante un código numérico desarrollado en FORTRAN. El acople de las ecuaciones de masa y momentum se realizó a través del algoritmo SIMPLEC, con un esquema de interpolación hibrido para los términos advectivos y un esquema centrado para los términos difusivos. Con respecto al término temporal, este se discretizó utilizando un esquema completamente implícito. Para resolver los sistemas de ecuaciones resultantes se utilizaron métodos iterativos, para las componentes de velocidad se utilizó el método de línea por línea en dirección *x* y *y* (LBL-*x* y LBL-*y*); mientras que para la presión y las temperaturas se utilizó el método de Gauss-Seidel en direcciones alternantes LGS-ADI. Posteriormente, se estableció un criterio de convergencia para asegurar la confiabilidad de la solución; para esto, se estableció una tolerancia máxima 10-$^{9}$. El cálculo del residual se realizó por medio de la raíz cuadrática media. Todo lo descrito anteriormente se resuelve en cada paso de tiempo, del tiempo inicial al tiempo final establecido para la modelación. Después de un estudio de independencia de malla temporal y espacial, se eligió un paso de tiempo de 15 s y una malla de $11 \times 91$ nodos para los vidrios y $21 \times 91$ nodos para las cavidades llenas de aire.

Para verificar la funcionalidad del código numérico se calculó el coeficiente global de transferencia de calor *U* en la ventana compuesta por dos y tres vidrios, este ejercicio se llevó a cabo con los datos reportados por [2] para condiciones de invierno, los resultados de esta verificación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Coeficiente global de transferencia de calor, *U*.

| Tipo de acristalamiento | *U*, W/m$^2$K | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | [2] | [10] | [13] | PE | PW vs [13] |
| Doble (6.4 mm) | 3.33 | 3.28 | 3.34 | 3.34 | 0.00 |
| Doble (12.7 mm) | 2.95 | 2.90 | 2.91 | 2.94 | 1.03 |
| Triple (6.4 mm) | 2.24 | 2.34 | 2.35 | 2.32 | 1.28 |
| Triple (12.7 mm) | 1.89 | 2.06 | 2.06 | 2.02 | 1.94 |

## 4. RESULTADOS

### *4.1. Parámetros de estudio*

Se llevó a cabo la modelación numérica de tres configuraciones de vidrio: simple (SPW), doble (DPW) y triple (TPW) bajo las condiciones climáticas del día más cálido del año en Mérida, Yucatán; el día se eligió con base en la temperatura exterior. De acuerdo con la clasificación de Köppen, Mérida posee un clima Aw, tropical con inviernos secos y veranos húmedos. Los datos climáticos (temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar) fueron obtenidos de la página web de la Comisión Nacional del Agua [14]. En la Figura 3 se muestra el comportamiento de las variables climáticas a lo largo del día seleccionado para llevar a cabo la evaluación térmica. Hasta la fecha el día con la mayor temperatura se registró el 06 de abril (41.3°C) del año en curso. La radiación solar máxima medida en el plano horizontal fue 1014.2 W/m$^2$, mientras los valores máximos de radiación solar en el norte, sur, este y oeste fueron: 235.9, 416.3, 420.6 y 701.9 W/m$^2$, respectivamente.

Para analizar el desempeño térmico de las tres configuraciones de vidrio se presentan los resultados de la temperatura promedio

 ISSN en trámite

de la superficie del vidrio en contacto con el ambiente interior $(T_{s,int}^{ave})$ y el flujo de calor total hacía el interior $(q_{int}^{total})$ cuyo aporte involucra la ganancia/pérdida por convección y radiación, además del flujo de calor transmitido debido a la incidencia de la radiación solar; el signo en los resultados del flujo de calor indica si el sistema gana (+) o pierde (-) energía.

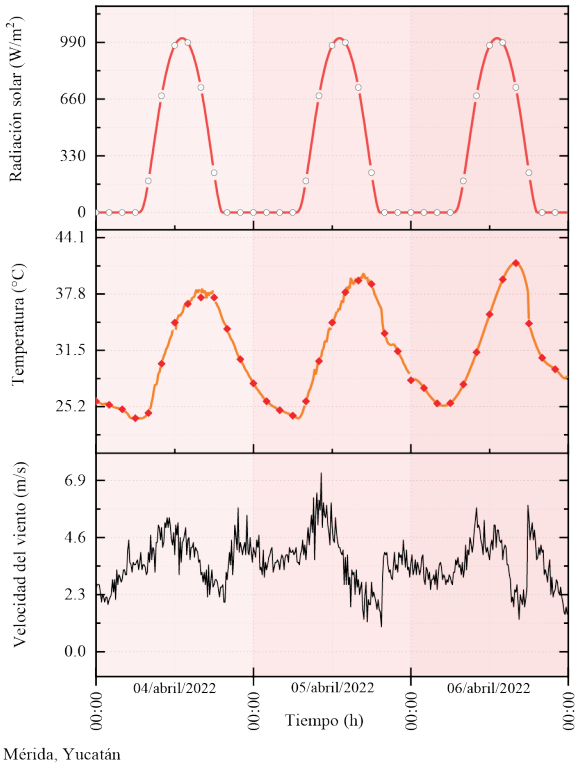



Figura 3. Variación de la velocidad del viento, radiación solar y temperatura exterior del 04 al 06 de abril 2022.

### 4.2. *Evaluación térmica*

En las Figuras 4-7 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio, flujo de calor por convección + radiación y el flujo de calor total para las tres configuraciones en diferentes orientaciones; asimismo se muestra el comportamiento de la radiación solar orientada, con el fin de mostrar el efecto que provoca la orientación sobre el desempeño térmico de la ventana.

En las orientaciones norte y sur, el comportamiento de la $T_{s,int}^{ave}$ de las configuraciones de vidrios múltiples es muy similar, incluso en algunas horas cuando la radiación solar incrementa, la temperatura de la configuración DPW se mantiene por debajo de la TPW; por otro lado, sí existe una diferencia entre estas configuraciones y la configuración de referencia, SPW, en especial en los horarios en los que la temperatura exterior tiende a incrementar, generalmente a partir del mediodía. La temperatura máxima en las orientaciones norte y sur se alcanza a las 14:40h. Por otra parte, en la orientación este se alcanza a las 11:00h en los vidrios múltiples y a las 14:40h en la SPW, mientras en el oeste se registra a las 16:00h el 06 de abril. De acuerdo con la información presentada en Tabla 2 la temperatura máxima de las tres configuraciones se presenta en la orientación oeste: 37.8, 37.7 y 39.0°C en la SPW, DPW y TPW, respectivamente. El aumento en la temperatura de la ventana se debe a la transferencia de energía entre el ambiente interior y exterior, además de la energía que absorben los vidrios a causa de la radiación solar incidente; en el oeste de las 12:00 a las 18:00h la radiación solar y la temperatura ambiente aumentan. No obstante, en las otras orientaciones la TPW reduce la temperatura de la ventana, especialmente en el norte, debido a que la radiación solar máxima es menor a 250 W/m$^2$, por lo tanto, no hay un efecto significativo en la transferencia de calor.

Tabla 2. Valores máximos de temperatura en la superficie interna del vidrio en contacto con el ambiente interior, $T_{s,int}^{ave}$.

| Configuración | $T_{s,int}^{ave}$, °C | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Norte | Sur | Este | Oeste |
| SPW | 35.3 | 36.0 | 35.3 | 37.8 |
| DPW | 31.9 | 33.4 | 32.0 | 37.7 |
| TPW | 31.4 | 33.7 | 32.0 | 39.0 |

De acuerdo con las Figuras 4-7 (gráfica intermedia) se observa similitud entre los resultados de las configuraciones de vidrios múltiples, con excepción de las orientaciones este y oeste, en donde se puede apreciar que la incidencia de la radiación solar provoca un aumento en el flujo de calor por convección y radiación, $q_{int}^{conv+rad}$ a las 11:00 y 16:00h en el este y oeste, respectivamente. De acuerdo con la Tabla 3, en la orientación norte las configuraciones DPW y TPW tienen el mejor desempeño térmico debido a que reducen 33.6 y 39.2% la ganancia de energía por convección y radiación con respecto a la SPW. No obstante, en las otras orientaciones no se presenta una tendencia similar, en especial en la orientación oeste en donde los resultados de la TPW están 8.9 y 10.1% por encima de los obtenidos de las configuraciones SPW y DPW, respectivamente.

Tabla 3. Valores máximos del flujo de calor por convección y radiación, $q_{int}^{conv+rad}$.

| Configuración | $q_{int}^{conv+rad}$, W/m$^2$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Norte | Sur | Este | Oeste |
| SPW | 81.2 | 86.4 | 81.3 | 101.8 |
| DPW | 53.9 | 65.7 | 54.0 | 100.4 |
| TPW | 49.4 | 68.1 | 54.7 | 111.7 |

De las tres variables analizadas, es en el flujo de calor total $(q_{int}^{total})$ en donde se presentan las diferencias más sobresalientes a favor de los vidrios múltiples, en específico para la TPW. Estos resultados se deben a dos factores: el aumento de (1) la resistencia térmica y (2) la disminución en la transmitancia $(\tau^*)$ del sistema. De acuerdo con la Tabla 4, la TPW en la orientación norte reduce hasta 16.1 y 37.8% el flujo de calor total con respecto a las configuraciones DPW y SPW. Mientras en las otras orientaciones lo reduce entre 30-33%. Por su parte, la configuración DPW reduce el flujo de calor total entre 18-26%.

 ISSN en trámite

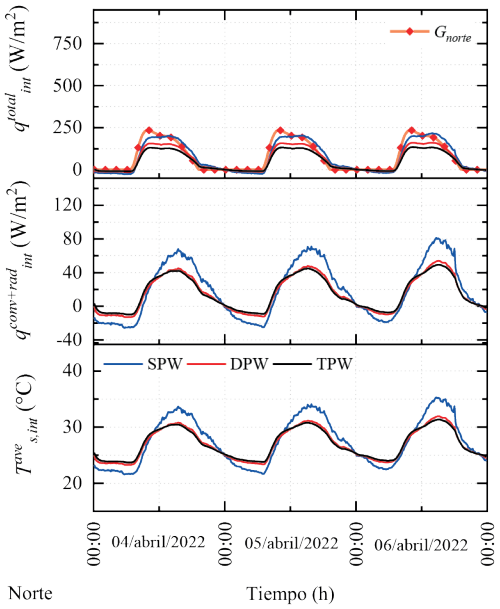



Figura 4. Comportamiento térmico de la SPW, DPW y TPW en la orientación norte.

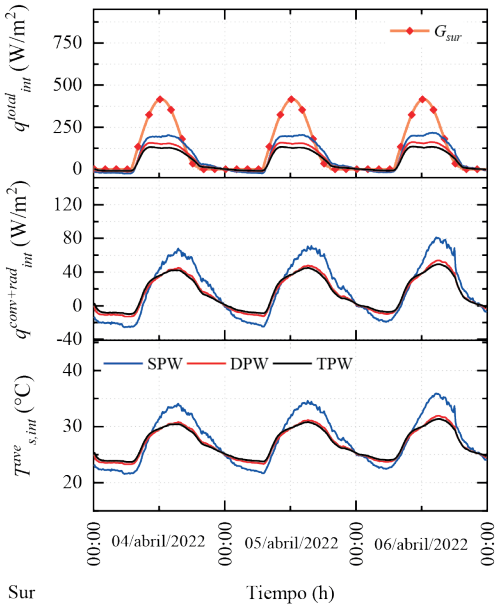



Figura 5. Comportamiento térmico de la SPW, DPW y TPW en la orientación sur.

Tabla 4. Valores máximos del flujo de calor total hacía el interior, $\boldsymbol{q_{int}}$.

| Configuración | $\boldsymbol{q_{int}}$, W/m$^2$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Norte | Sur | Este | Oeste |
| SPW | 217.11 | 368.66 | 341.43 | 603.81 |
| DPW | 161.01 | 292.87 | 280.56 | 492.34 |
| TPW | 135.02 | 246.37 | 236.24 | 416.49 |

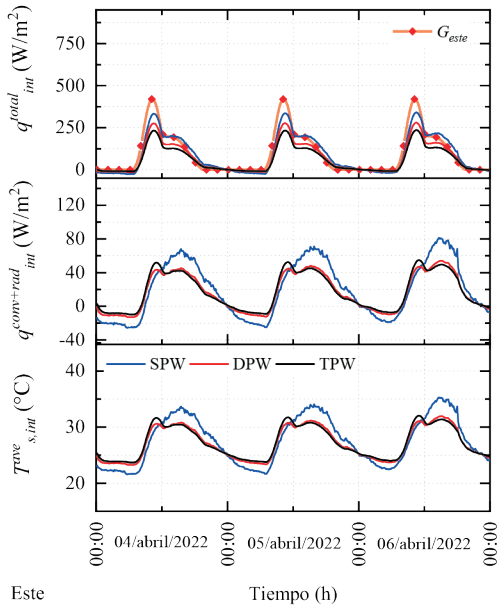



Figura 6. Comportamiento térmico de la SPW, DPW y TPW en la orientación este.

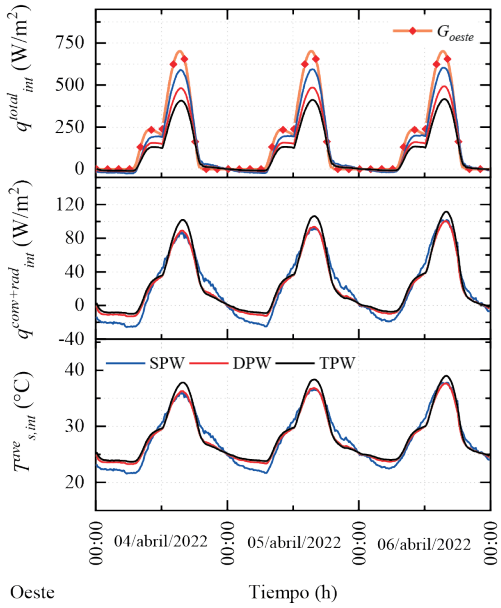



Figura 7. Comportamiento térmico de la SPW, DPW y TPW en la orientación oeste.

Al integrar los resultados del flujo de calor total hacía el interior en el tiempo, se deduce lo siguiente: en todas las orientaciones la configuración TPW requiere una menor cantidad de energía para mantener condiciones de confort térmico (ver Tabla 5). En las orientaciones norte y sur, la radiación solar varía en función de la estación del año, esto causa un equilibrio natural que favorece el desempeño térmico de la ventana; en los meses que la radiación solar incrementa la temperatura exterior disminuye y viceversa. En las orientaciones este y oeste, especialmente en la oeste, se presentan altos valores de radiación solar; no

 ISSN en trámite

obstante, las múltiples capas de vidrio disminuyen la transmitancia del sistema, por lo tanto, el flujo de calor que atraviesa la ventana es menor, debido a esto, la configuración TPW requiere 32.6% menos energía que el vidrio simple para mantener la temperatura interior en 25°C. Mientras la DPW requiere 16% más que el vidrio triple.

Tabla 5. Energía requerida para mantener condiciones de confort térmico.

| Día | Orientación | $\int_{t_{inicial}}^{t_{final}} \lvert q(t) \rvert dt, (\mathbf{kWhm^{-2}})$ | | |
|---|---|---|---|---|
| | | SPW | DPW | TPW |
| 06/abril | Norte | 2.04 | 1.53 | 1.28 |
| | Sur | 2.78 | 2.16 | 1.81 |
| | Este | 2.36 | 1.81 | 1.51 |
| | Oeste | 3.74 | 2.98 | 2.52 |

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el efecto del número de vidrios y la orientación sobre el desempeño térmico de una ventana de vidrio simple, doble y triple bajo condiciones del día más cálido en Mérida, Yucatán. Con base en los resultados de la modelación numérica de la transferencia de calor conjugada en dos dimensiones y en estado transitorio se concluye lo siguiente:

- El incremento de la radiación solar y la temperatura exterior provoca que la temperatura de la ventana y la ganancia de energía por convección y radiación se eleve incluso cuando se utiliza la configuración TPW.

- En términos de temperatura y flujo de calor por convección y radiación la configuración DPW tuvo el mejor desempeño térmico en todas las orientaciones, especialmente en el oeste, en donde además de estar por debajo de los resultados de la configuración de vidrio simple, se mantuvo 1.3°C y 11.3 W/m$^2$ (≈10%) por debajo de los resultados obtenidos con la configuración TPW.

- Los bajos niveles de radiación solar en la orientación norte no producen un cambio significativo sobre la temperatura de la ventana y el flujo de calor total, en especial cuando se utiliza la configuración TPW; en esta orientación la TPW reduce el flujo de calor hacía el interior 16 y 38% con respecto a las configuraciones DPW y SPW.

- En todas las orientaciones la configuración TPW requiere una menor cantidad de energía para mantener la temperatura interior en 25°C: 1.28, 1.81, 1.51 y 2.52 kWhm$^{-2}$, hasta 16.3 y 37.3% por debajo de la energía requerida con las configuraciones DPW y SPW, respectivamente.

## REFERENCIAS

[1] Alwetaishi M., Impact of glazing to wall ratio in various climatic regions: A case study. Journal of King Saud University – Engineering Sciences, Vol. 31, Págs. 6 – 18, 2019.

[2] Arıcı M., Karabay H., Kan M., Flow and heat transfer in double, triple and quadruple pane windows. Energy and Buildings, Vol. 86, Págs. 394-402, 2015.

[3] González-Julián E., Xamán J., Nelson O. M., Chávez Y., Zavala-Guillén I., Simá E., Annual thermal evaluation of a double pane window using glazing available in the Mexican market. Applied Thermal Engineering, Vol. 143, Págs. 100 – 111, 2018.

[4] Heydari A., Esmaeil S. S., Gharib M. R., Effects of different window configurations on energy consumption in building: Optimization and economic analysis. Journal of Building Engineering, Vol. 35, 2020.

[5] Djamel Z., Noureddine Z., The impact of window configuration on the overall building energy consumption under specific climate conditions. Energy Procedia, Vol. 115, Págs. 162 – 172, 2017.

[6] Kahsay Meseret T., Bitsuamlak Girma T., Tariku Fitsum, Effect of window configurations on its convective heat transfer rate. Building and Environment, Vol. 182, 2020

[7] Kaasaleinen T., Mäkinen A., Lahtinen T., Moisio M., Winha J., Architectural window design and energy efficiency: Impacts on heating, cooling and lighting needs in Finnish climates. Journal of Building Engineering, Vol. 27, Págs., 2020.

[8] Amaral A. R., Rodrigues E., Rodrigues Gaspar A., Gomes Á., A thermal performance parametric study of window type, orientation, size and shadowing effect. Sustainable Cities and Society, Vol. 26, Págs. 456 – 465, 2016.

[9] Arıcı M., Tükel Mert, Yildiz Cagatay, Li Dong, Karabay Hasan, Is the thermal transmittance or air filled inclined multi-glazing windows similar to that of vertical ones? Energy & Buildings, Vol. 229, 2020.

[10] Rodriguez-Ake, A., Xamán, J., Hernández-López, I., Sauceda, D., Carranza-Chávez, F. J., Zavala-Guillén, I., Numerical study and thermal evaluation of a triple glass window under Mexican warm climate conditions. Energy, Vol. 239, 2022.

[11] Aguilar J. O., Xamán J., Álvarez G., Hernández-Pérez I., López-Mata C., Thermal performance of a double pane window using glazing available on the Mexican market. Renewable Energy, Vol. 81, Págs. 785 – 794, 2015.

[12] Swinbank, W. C. Long-wave radiation from clear skies. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 89(381), 339-348, 1963.

[13] (ASHRAE) – American Society of Heating. Refrigeration and air conditioning engineers. Handbook of fundamentals; 2001.

[14] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Septiembre 2022. https://www.gob.mx/conagua

 ISSN en trámite

# Prototipado virtual y co-simulación ADAMS-MATLAB de un cobot UR10 para la implementación de una estrategia de control de posición basada en PID

**Rubén Ganiz Mero Jorge Dionisio Fierro Rojas**

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Pue. México, C.P. 72570.
(e-mail: ruben.ganizmero@viep.com.mx, jorge.fierrorojas@viep.com.mx).

Resumen: En este trabajo se presenta el proceso de prototipado virtual para implementar una estrategia de control de posición de un cobot UR10 mediante co-simulación ADAMS y MATLAB. Para esto, se diseña el modelo CAD del cobot UR10; el cual, se exporta a ADAMS, en donde se integran todos los elementos que permiten realizar el análisis y simulación por medio de la herramienta ADAMS/Controls. Esta última se encarga de establecer la comunicación con MATLAB/Simulink considerando el conjunto de entradas y salidas correspondientes a cada articulación. Posteriormente, el controlador PID se implementa en MATLAB/Simulink para controlar la posición deseada de cada articulación, donde las ganancias del controlador son establecidas mediante sintonía manual. Así, la co-simulación permite obtener resultados expresados en términos de distintos parámetros de desempeño en el dominio del tiempo, los cuales se muestran en forma gráfica. El método de prototipado virtual resulta especialmente conveniente para el análisis de robots manipuladores cuando no se precisa desarrollar el modelo dinámico del sistema físico.

*Keywords:* Prototipado virtual, Co-simulación, ADAMS, MATLAB, PID, Cobot UR10, Control de posición de robots.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el uso de robots industriales en tareas de ensamble tradicionalmente, se requiere la delimitación del espacio de trabajo con cercas protectoras, esto para disminuir el riesgo de accidentes debido a los impactos de la estructura mecánica de los robots con los operadores humanos (Bi et al., 2021). En contraste, los robots colaborativos (cobots) están diseñados precisamente para tal interacción (Makrini et al., 2017). Además, a diferencia de los robots industriales tradicionales, los cobots combinan la destreza, flexibilidad y habilidad para solucionar problemas de los humanos, así como la fuerza, resistencia y precisión de los robots (Bauer et al., 2008).

Los cobots, indudablemente, son parte de la tecnología de la Industria 4.0, ya que figuran como uno de los agentes principales en la realización de tareas de la llamada manufactura inteligente (Kusiak, 2018). Recientemente, algunas de las principales compañías fabricantes de robots han desarrollado y puesto a la venta cobots para diversas aplicaciones industriales (Sherwani et al., 2020). Como es de suponerse, además de los costos elevados, la arquitectura cerrada de los cobots comerciales impide la validación de estrategias de control, con lo cual se limitan las posibilidades del estudio y desarrollo de estrategias de control de posición y seguimiento de trayectorias.

### *1.1 Cobots*

La robótica colaborativa aparece de la necesidad del ser humano de interaccionar con robots en el sector industrial, debido a que la sociedad y sus exigencias aumentan cada vez más, siendo necesario optimizar los recursos disponibles, disminuyendo tiempos y costes de producción (Zakharyan, 2018). Los cobots ofrecen una gran variedad de ventajas respecto a los robots industriales tradicionales de las cuales destacan:

- Complementan las capacidades del hombre y permiten la automatización de los pasos de producción que anteriormente se realizaban de forma manual (Vagaš et al., 2020).
- Las tareas de los robots colaborativos se pueden adaptar de forma flexible. Además, los robots colaborativos pueden utilizarse con flexibilidad de posicionamiento y con unos requisitos de espacio reducidos (Zakharyan, 2018).
- El robot puede operar a velocidades normales cuando ningún ser humano entre en la zona de trabajo del cobot. Si una persona entra en el área de trabajo, entonces detecta su presencia, en ese momento el robot ralentiza su marcha y restringe el movimiento para evitar cualquier peligro de posible contacto (Oosterwyck, 2018).
- Sencillez a la hora de instalarlos y programarlos, muchos de ellos ofrecen métodos por los que los usuarios de estos robots no requieren de tener estudios superiores o de saber métodos convencionales de programación (Zakharyan, 2018).

 ISSN en trámite

Se han observado varias características y aspectos de los cobots que les permiten ofrecer lo mejor para las circunstancias industriales actuales. Las tareas de proceso que realizan trabajos de selección y colocación, manipulaciones conjuntas y tareas relacionadas con la inspección han sido características significativas para los cobots. Además de estos trabajos y características, el rendimiento del ensamblaje, las operaciones de acabado de superficies, los trabajos de soldadura, etc., son algunas de las áreas más posibles de las aplicaciones de cobot en el escenario de la situación industrial actual (Vojić, 2020).

Como se mencionó anteriormente, parte importante de las funciones de un robot colaborativo es poder realizar una tarea de manera secuencial dentro de su espacio de trabajo, donde en ocasiones tiene que evitar obstáculos, los cuales son detectados por medio de una red de sensores que dotan al cobot con la capacidad de detectar si algún objeto o humano se encuentra dentro de su área de trabajo, tal y como se trata en (Lee et al., 2021) en donde se propone un esquema de control para evitar obstáculos en tiempo real para un manipulador de 6 grados de libertad que utiliza una cámara Kinect V2 RGB-D para rastrear obstáculos, incluidos humanos y objetos en el entorno de trabajo donde los resultados obtenidos son probados en un cobot TM5 700. De igual manera, el autor (Oosterwyck, 2018) implementa un control de velocidad en lazo cerrado en un cobot UR10 midiendo la distancia en tiempo real por medio de una cámara Kinect 3D, logrando con esto una interacción segura entre el operador humano y el cobot, haciendo que este último logre reducir la velocidad cuando se detecte la presencia del operador dentro del área de trabajo del cobot.

Partiendo de las premisas anteriores se puede decir entonces que la implementación de un robot colaborativo es una opción inteligente para las empresas que buscan aumentar la productividad y la eficiencia en las operaciones. Los cobots son fáciles de incorporar al sistema existente y no requieren actualizaciones de infraestructura permanentes o costosas. Los robots colaborativos, que trabajan junto a operadores humanos, hacen que los trabajadores existentes sean más productivos, y facilitan el funcionamiento sin problemas de las instalaciones para satisfacer los aumentos de la demanda a corto plazo (Vojić, 2020).

### *1.2 Prototipado virtual*

El prototipado virtual es el diseño y generación de un producto con suficientes características claves que permiten su evaluación frente a los requerimientos propios de su aplicación. La denominación *virtual* indica que el producto aún no es desarrollado físicamente; sin embargo, existe una representación visual que permite realizar observaciones sobre aspectos constructivos, análisis de movimientos relativos y absolutos (Montoya et al., 2018). El principal objetivo que se busca es que el prototipo virtual posea el mismo comportamiento que el modelo físico; no obstante, éste se encuentra dentro de un ambiente virtual generado por computadora.

Una manera de poder realizar las pruebas necesarias que implican la validación de estrategias de control, planificación de trayectorias, pruebas mecánicas y los diversos estudios que se realizan en un robot colaborativo es la implementación del prototipado virtual, el cual permite probar continuamente los diseños, verificar los requisitos y encontrar errores antes en el proceso de desarrollo, lo que implica mayor facilidad y menor coste para su corrección (Montoya et al., 2018).

### *1.3 Co-simulación ADAMS-MATLAB*

La co-simulación es el proceso dentro del cual se establece la conexión entre diferentes software, de tal manera que el modelo de un sistema de control que es construido en un software pueda tomar los resultados de sus cálculos como señales de entrada del sistema al modelo de la planta construido en otro software. Esta instrucción incluye la fuerza, el par y otras señales típicas. El último modelo puede generar la respuesta relevante, como desplazamiento, velocidad, aceleración, etc. (Hu et al., 2015).

ADAMS (por sus siglas en inglés, Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) es uno de los software más utilizados para el modelado, análisis y simulación del movimiento de sistemas mecánicos complejos. Esto debido a que ofrece diversos beneficios tales como rendimiento, seguridad y comodidad, buena visibilidad y buenos resultados en tiempo real, en comparación con los resultados del modelo físico tal y como se menciona en (Ratiu et al., 2018) en donde se presentan una serie de pasos para realizar el modelado de un robot ABB IRB 1600-6/1.2 en ADAMS, con la finalidad de implementar un análisis cinemático del robot y obtener parámetros tales como posición, velocidad y aceleración angular. MATLAB/Simulink por su parte, es utilizado para desarrollar el sistema de control en lazo cerrado con el cual, durante el proceso de cálculo, se intercambian datos entre el prototipo virtual y el programa de control, donde ADAMS resuelve la ecuación del sistema mecánico mientras que MATLAB resuelve la ecuación del sistema de control.

En la literatura existen diversos trabajos en donde se utiliza la co-simulación ADAMS-MATLAB para la implementación de estrategias de control de posición basada en PID en sistemas de 1 grado de libertad (gdl) (Hu et al., 2015), 2 gdl planar (Ángel et al., 2016) y en sistemas de 3 gdl, como se trata en (Montoya et al., 2018) para un manipulador paralelo tipo Delta. Otra aplicación relevante, en conjunto con el control de posición dentro del estudio de la co-simulación, es el seguimiento de trayectoria tal y como se realiza en (Pérez, 2015) para un robot Gryphon de 5 gdl, (Cheraghpour et al., 2011) para el prototipado virtual del robot Staubli TX40 de 6 gdl y en (Sudharsan et al., 2016) para un robot antropomórfico de 8 gdl.

Sin embargo, en los trabajos anteriores solamente se estudian robots industriales, por lo que el objetivo principal de este trabajo es el diseño de un prototipo virtual de un cobot con el cual, mediante la co-simulación (Figura 1), se pueda contar con un entorno virtual para la evaluación de diferentes esquemas de control automático que permita la obtención de distintos

 ISSN en trámite

parámetros de desempeño en el dominio del tiempo y también, dentro del mismo entorno validar el diseño mecánico del cobot. Además, este trabajo servirá como antecedente para el estudio de la interacción humano-robot debido a que se cuenta con los elementos suficientes dentro del entorno virtual para poder llevar a cabo tal estudio.

Figura 1. Integración de ADAMS-MATLAB en co-simulación.

El presente artículo está estructurado de la siguiente manera. En la sección 2 se realiza una descripción de las características físicas del prototipado virtual del cobot. La sección 3 está dedicada a la co-simulación ADAMS-MATLAB, en donde se muestra el proceso de diseño del sistema de control en lazo cerrado, integrando en ADAMS las variables de estado y en MATLAB/Simulink la implementación de la estrategia de control basada en PID. Los resultados de la co-simulación son presentados dentro de la sección 4 de manera gráfica. Por último, en la sección 5 se concluye el trabajo.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO VIRTUAL

El modelo diseñado está basado en el cobot UR10 de la empresa Universal Robots (Universal-Robots, 2022). Se seleccionó este modelo en particular por dos razones principales:

- El fabricante es una empresa líder y pionera en la robótica colaborativa y de acuerdo con un reporte de (BIS-Research, 2020), la empresa ha mantenido su posición de líder del mercado con una cuota global del 60% del mercado de cobots alcanzando un volumen de ventas de cobots mayor que todos los competidores.
- Es el más vendido de toda la gama de sus modelos UR de acuerdo con (Universal-Robots, 2022).

El cobot UR10 es un robot antropomórfico de 6 grados de libertad que consta de una base, hombro, codo, muñeca 1, muñeca 2 y muñeca 3. Cuenta con un alcance de 1.30 m y su estructura física está compuesta de aluminio, acero y plástico. En la Tabla 1 se muestran los distintos parámetros físicos en los cuales se basó para realizar el prototipo virtual del cobot dentro del software CAD SolidWorks y se encuentran proporcionados por (Universal-Robots, 2022).

(a) Modelo creado en SolidWorks. (b) Cobot UR10.

Figura 2. Prototipado virtual del cobot UR10.

Tabla 1. Parámetros físicos del cobot UR10.

| Eslabón | Longitud [m] | Masa [kg] | Centro de masa [m] | Par máximo [Nm] |
|---|---|---|---|---|
| Base | 0.1273 | 7.1 | [0.021,0.0, 0.027] | 330 |
| Hombro | 0.612 | 12.7 | [0.38, 0.0, 0.158] | 330 |
| Codo | 0.5723 | 4.27 | [0.24,0.0, 0.068] | 150 |
| Muñeca 1 | 0.16394 | 2 | [0.0,0.007, 0.018] | 56 |
| Muñeca 2 | 0.1157 | 2 | [0.0,0.007, 0.018] | 56 |
| Muñeca 3 | 0.0922 | 0.365 | [0.0, 0.0, -0.026] | 56 |

El diseño CAD de cada eslabón del robot fue elaborado de manera individual dentro del software SolidWorks, donde además se definieron los parámetros inerciales especificados en la Tabla 1. Una vez culminado este proceso, se realiza el ensamble de las piezas por medio de las herramientas de relaciones de posición. Aparte de la estructura mecánica del cobot, el diseño incluye un par de mesas que emulan las estaciones de disposición de material y ensamble. Para exportar el modelo al software ADAMS se hace uso del complemento *SolidWorks Motion,* el cual, permite hacer un análisis del movimiento correcto de las articulaciones y, a su vez, convertir el modelo a un formato definido para ADAMS tal y como se muestra en la Figura 3.

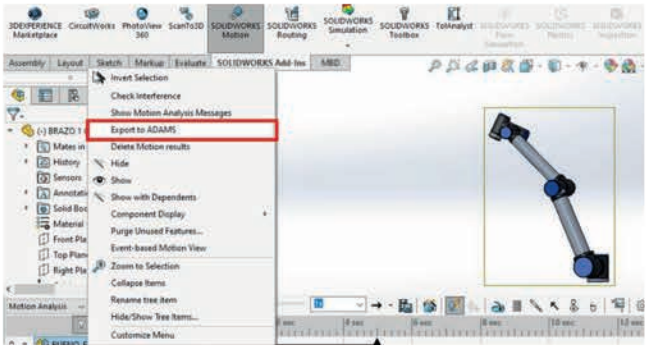



Figura 3. Complemento *SolidWorks Motion* para exportar el modelo a ADAMS.

 ISSN en trámite

## 3. CO-SIMULACIÓN ADAMS-MATLAB

Para poder ejecutar la co-simulación entre ADAMS y MATLAB es necesario realizar el procedimiento que se describe en la Figura 4. Este permite establecer un formato aceptable de las entradas y salidas para cada programa y mediante esto habilitar la comunicación y el intercambio de datos entre ambos.

Figura 4. Procedimiento para ejecutar la co-simulación ADAMS-MATLAB.

### *3.1 Preparación del entorno de ADAMS*

En la figura 5, se muestra el prototipo virtual del cobot en ADAMS, el cual se obtuvo del apartado anterior. Para poder controlar el prototipo virtual, es necesario que, como parte del diseño del entorno virtual, se añada a cada una de las articulaciones los distintos elementos que brinda ADAMS para lograr el objetivo de mover al robot. Uno de los elementos más importantes son las *joints* debido a que permiten el movimiento en las articulaciones del robot y, además, mediante estas mismas se obtiene la posición y velocidad para cada articulación. Otro de los elementos que se requiere insertar en cada articulación son las *Sforce*, básicamente estos elementos representan el par aplicado en las articulaciones, es decir, las entradas del robot.

Una vez que se tienen las variables de entrada del cobot, es necesario crear las variables de estado $q$ y $\dot{q}$ para cada articulación las cuales representan las salidas del cobot. En la Figura 6 se muestran estos elementos.

### *3.2 Configuración de las entradas y salidas del robot*

Dentro de esta etapa, es necesario habilitar el complemento *ADAMS/Controls* el cual permite a ADAMS integrar el modelo del robot dentro de un bloque con sus correspondientes entradas y salidas para poder trabajar con él dentro de Simulink. En la Figura 7 (a) se muestra el bloque que contiene al prototipo virtual *ADAMS/Controls* mientras que en la Figura 7 (b) se observa la estructura interna del bloque, donde se logra visualizar los diferentes parámetros del cobot que integra ADAMS dentro del mismo tales como tamaño de paso y el tipo de comunicación de la simulación, en este caso discreta. También, se tienen las entradas y salidas que se asignaron para cada articulación.

### *3.3 Preparación del entorno de MATLAB*

Al tener el bloque dentro del entorno de MATLAB/Simulink, el modelo del robot ya se encuentra adecuado para poder realizar la implementación del control de posición y además poder obtener los resultados correspondientes de la simulación de movimiento como un sistema definido en MATLAB. Para ello se realiza el diseño del diagrama de bloques en lazo cerrado correspondiente, insertando en la entrada de cada articulación un control PID que será realimentado por la posición y velocidad de las mismas tal y como se observa en la Figura 8. La estructura del control PID implementada en cada articulación se muestra en la Figura 9. Las ganancias para cada controlador fueron sintonizadas de manera manual y para cada articulación se utilizaron distintos valores debido a los parámetros físicos de cada eslabón.

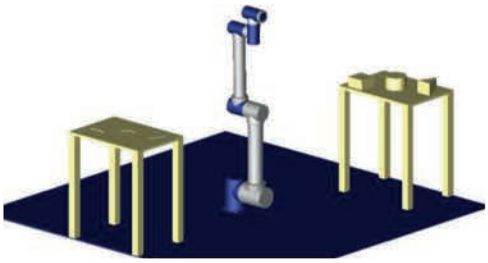


Figura 5. Prototipo virtual del cobot UR10 dentro de ADAMS.

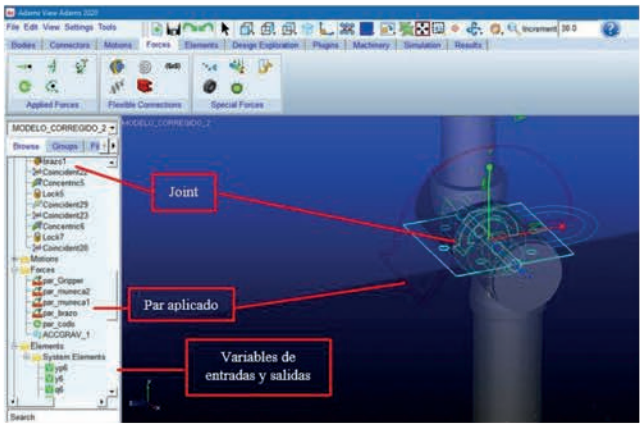
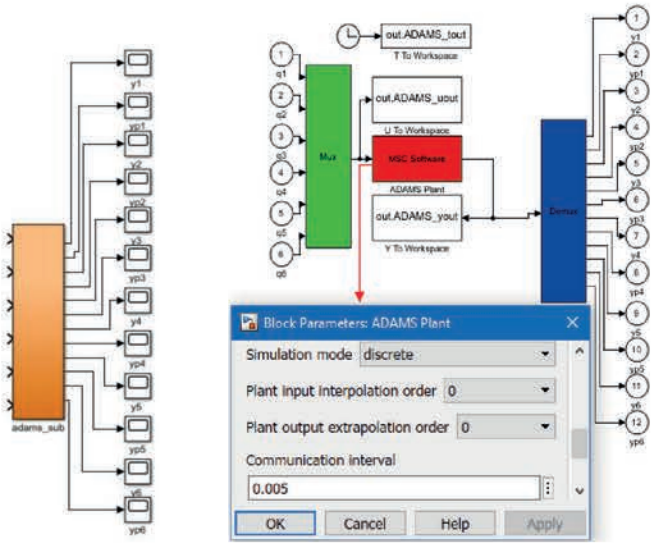



Figura 6. Asignación de elementos para las articulaciones del cobot.




(a) Bloque del cobot. (b) Estructura interna del bloque.

Figura 7. Bloque que contiene el modelo del cobot en Simulink.

 ISSN en trámite

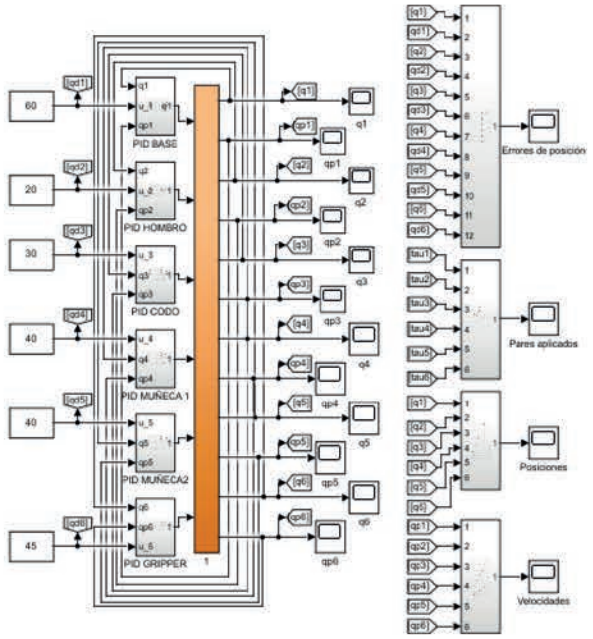



Figura 8. Diseño del sistema en Simulink.

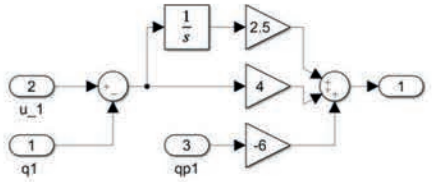



Figura 9. Estructura del control PID implementado en cada articulación.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figuras 10 y 11 muestran las gráficas de los resultados que se obtuvieron de las 6 articulaciones del cobot. Partiendo del análisis de las gráficas de posición de la Figura 10, se pueden observar parámetros de desempeño en el dominio del tiempo tales como sobreimpulsos, convergencia desde la posición inicial $q_0 = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ a la posición deseada $q_d = [60\ 20\ 30\ 40\ 40\ 45]^T$, la cual fue elegida de manera arbitraria. Por otro lado, en la gráfica de velocidad de la Figura 11 se puede ver cómo todos los valores de $\dot{q}$ tienden asintóticamente a cero, y de igual manera se observan los parámetros de desempeño en tiempo continuo anteriormente mencionados. En la Figura 12 se muestra el cambio en la configuración de las articulaciones que toma el cobot al llegar a la posición deseada $q_d = [60\ 20\ 30\ 40\ 40\ 45]^T$ mediante la implementación de la estrategia de control.

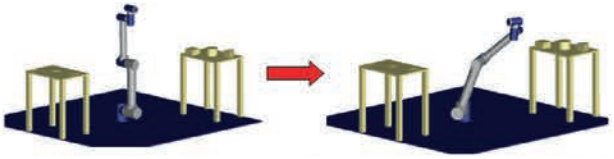


Figura 12. Cambio de pose con el control de posición del cobot.

En las gráficas de las Figuras 13 y 14 se tienen los errores de posición y par aplicado a cada una de las 6 articulaciones, en las cuales, de manera muy general, se puede apreciar en el caso del error de posición en cada una de ellas, cómo converge a cero en periodos de tiempo de aproximadamente 1 segundo; y de igual manera, en las gráficas de par aplicado se ve cómo solamente 2 articulaciones toman un valor constante para poder mantener la posición deseada, mientras que el valor de par aplicado para las otras 4 converge asintóticamente a cero.

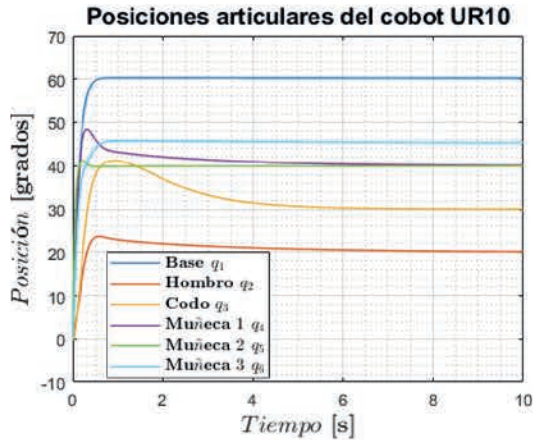



Figura 10. Posiciones articulares del cobot UR10.

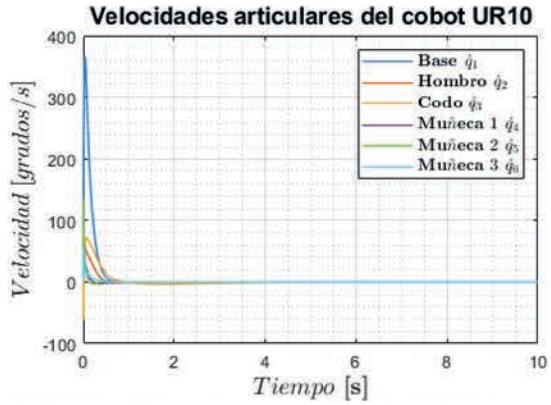



Figura 11. Velocidades articulares del cobot UR10.

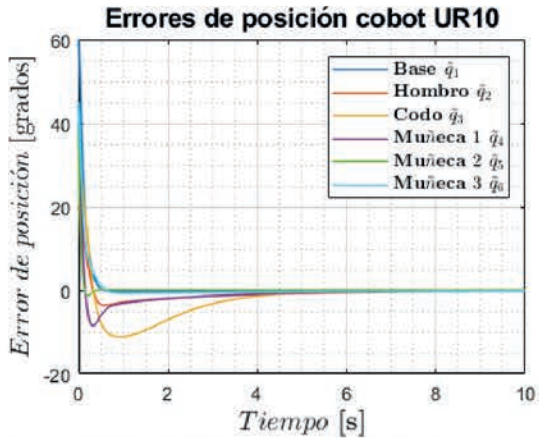



Figura 13. Errores de posición del cobot UR10.

 ISSN en trámite

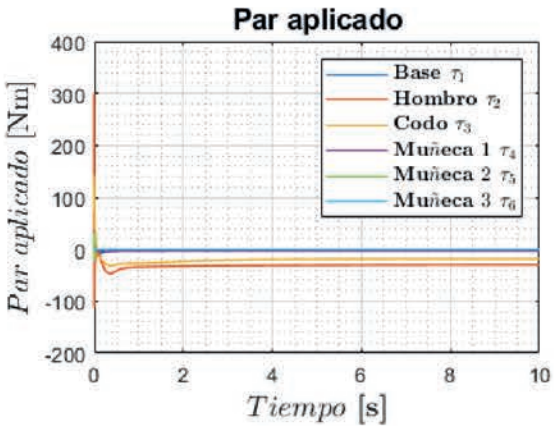



Figura 14. Par aplicado a las articulaciones del cobot UR10.

Con la finalidad de observar el desempeño del controlador PID, se realizó otra simulación aplicando una carga de 2 kg en el cobot y utilizando las mismas ganancias de la simulación anterior. La Figura 15 muestra al cobot con dicha carga colocada en el efector final simulando un objeto dentro de ADAMS.

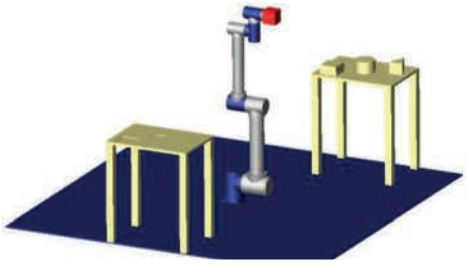


Figura 15. Carga aplicada al cobot UR10.

Las Figuras 16-19 muestran los resultados obtenidos en la simulación con carga aplicada al cobot, en donde se puede observar en la gráfica de posición de la Figura 16 que el tiempo de convergencia a la posición deseada es mayor al de la simulación anterior. De igual manera, en las velocidades articulares de la Figura 17 se puede visualizar una diferencia en las velocidades máximas de algunas articulaciones a comparación de las velocidades articulares del cobot sin carga. Por otro lado, los errores de posición son más grandes en algunos intervalos de tiempo para algunas articulaciones, especialmente para el codo y la muñeca 1. Asimismo, se destaca que en la muñeca 2 se tiene un error de posición de 0.691 grados a diferencia del error que se tiene en la simulación anterior para la misma articulación de 0.041 grados. Finalmente, en la Figura 19 se observan los pares aplicados en cada una de las articulaciones, los cuales, a comparación de los pares máximos aplicados en la simulación sin carga, solamente se tiene diferencia de 1 Nm en el par máximo aplicado al codo, mientras que las demás mantienen el mismo valor. La comparación de los pares máximos obtenidos se puede visualizar en la Tabla 2, en la cual, se puede destacar que ninguno de ellos supera el par máximo nominal de las articulaciones del cobot UR10 mostrados en la Tabla 1.

Tabla 2. Pares máximos obtenidos del cobot UR10 con carga y sin carga.

| Eslabón | Par máximo sin carga [Nm] | Par máximo con carga [Nm] |
|---|---|---|
| Base | 180 | 180 |
| Hombro | 300 | 300 |
| Codo | 142.917 | 143.998 |
| Muñeca 1 | 34 | 34 |
| Muñeca 2 | 31.77 | 31.77 |
| Muñeca 3 | 1.125 | 1.125 |

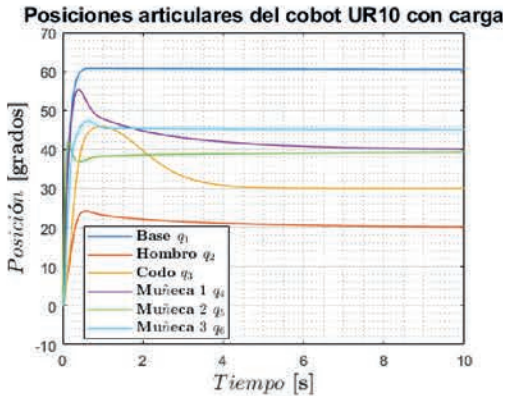



Figura 16. Posiciones articulares del cobot UR10 con carga.

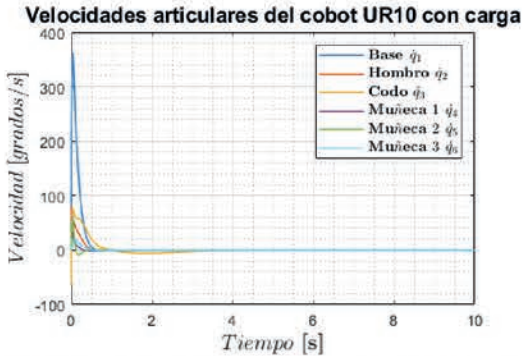



Figura 17. Velocidades articulares del cobot UR10 con carga.

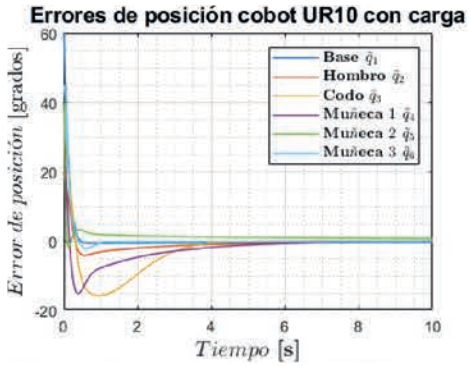



Figura 18. Errores de posición del cobot UR10 con carga.

 ISSN en trámite

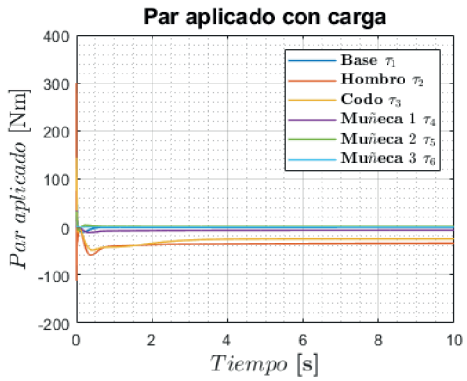



Figura 19. Par aplicado a las articulaciones del cobot UR10 con carga.

## 5. CONCLUSIONES

El prototipado virtual permite reflejar fielmente el desempeño del cobot en lazo cerrado con el ahorro de recursos materiales que conlleva evitar la fabricación de un prototipo tangible. Este método se ha usado en estudios recientes con la intención de analizar la manipulación y el control de brazos robóticos sin la necesidad de crear las complejas ecuaciones dinámicas. Por otra parte, la co-simulación es una herramienta que permite la evaluación de los sistemas mecánicos facilitando el procedimiento de validación de resultados, con lo cual, se puede establecer un estudio y comparación del comportamiento del sistema físico, el sistema teórico y el prototipo virtual. Finalmente, de forma general, se logró la validación de la estrategia de control de posición implementada mediante la obtención de los parámetros de desempeño del prototipo virtual del cobot UR10 por medio de la co-simulación ADAMS-MATLAB.

## REFERENCIAS

Ángel, L., Pérez, M. P., Díaz, Q.C., and Mendoza, C. (2012). ADAMS/MATLAB co-simulation: dynamic systems analysis and control tool. *Applied Mechanics and Materials*, 232, pp. 527-531.

Bauer, A., Wollherr, D. and Buss, M. (2008). Human-robot collaboration: A survey. *International Journal of Humanoid Robotics*, 5, pp. 47–66.

Bi, Z. M., Luo, C., Miao, Z., Zhang, B., Zhang, W. J., and Wang,L. (2021). Safety assurance mechanisms of collaborative robotic systems in manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67, pp. 102022.

BIS-Research. (2020). Focus on Payload, Application Sales Channel, Component, and Industry – Analysis & Forecast, 2020-2025, tech. rep.

Cheraghpour, F., Vaezi, M., Jazeh, H. E. S., and Moosavian, S. A. A. (2011). Dynamic modeling and kinematic simulation of Stäubli© TX40 robot using MATLAB/ADAMS co-simulation. *IEEE International Conference on Mechatronics*, pp. 386-391.

Hu, Z., Xu, D., Liu, G., and Jia, C. (2015). Study on co-simulation technology based on ADAMS and MATLAB. *International Symposium on Material, Energy and Environment Engineering,* pp. 595-598.

Kusiak, A., (2018). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 56, pp. 508–517.

Lee, Y. H., Song, K. T. (2021). Real-time Obstacle Avoidance with a Virtual Torque Approach for a Robotic Tool in the End Effector. *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 8436-8442.

Makrini, E.I., Merckaert, K., Lefeber, D., and Vanderborght, B. (2017). Design of a collaborative architecture for human-robot assembly tasks. *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS),* 61, pp.1624-1629.

Montoya, C. A. M., López, M. J. H., and Londoño, G. A. H. (2018). Prototipado virtual y co-simulación aplicado a un manipulador paralelo tipo Delta de tres grados de libertad para estudios de comportamiento cinemático y cinético. *Scientia et Technica*, 23, pp. 175–186.

Oosterwyck, N. (2018). *Real Time Human-Robot Interactions and Speed Control of a Robotic Arm for Collaborative Operations*. [Tesis de Maestría, University of Antwerp]. ResearchGate.

Pérez, S. M. P. (2015). *Co-Simulación ADAMS/MATLAB para el control de posición del robot Gryphon*. [Tesis de Maestría, Universidad Pontificia Bolivariana]. Repositorio Institucional de la Universidad Pontificia Bolivariana. URL: https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/2099

Ratiu, M., Rus, A., and Balas, M. L. (2018). Modeling in ADAMS of a 6R industrial robot. *MATEC Web of Conferences*, 184, pp. 02006.

Sherwani, F., Asad, M. M., and Ibrahim, B. S. K. K. (2020). Collaborative robots and industrial revolution 4.0 (ir 4.0). *International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST)*, pp. 1-5.

Sudharsan, J., Karunamoorthy, L. (2016). Path planning and co-simulation control of 8 DOF anthropomorphic robotic arm. *International journal of simulation modelling*, 15(2), pp. 302-312.

Universal Robots. (2021, 14 Noviembre). Robot UR10. URL: https://www.universal-robots.com/es/productos/robot-ur10/

Vagaš, M., Galajdová, A., and Šimšík, D. (2020). Techniques for Secure Automated Operation with Cobots Participation. *International Carpathian Control Conference (ICCC),* pp. 1-4.

Vojić, S. (2020). Applications of collaborative industrial robots. *Machines. Technologies. Materials.,* 14(3), pp. 96-99.

Zakharyan, E. (2018). *Desarrollo de aplicaciones mediante robots colaborativos basadas en interfaces naturales hombre-máquina.* [Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica de Valencia. URL: http://hdl.handle.net/10251/109336

 ISSN en trámite

# Underactuated Robotic Finger Mechanism for Cylindrical Grasping Using Flexible Links

**Espinosa-Garcia F. J.*, Arias-Montiel M.**, Lugo-González E.**, Ceccarelli M.*****

**Postgraduate Division, Technological University of the Mixteca, Huajuapan de León, Mexico 69000 (e-mail: fjeg_1234@hotmail.com).*
***Institute of Electronics and Mechatronics, Technological University of the Mixteca, Huajuapan de León, Mexico 69000 (email: mam@mixteco.utm.mx, elugog@mixteco.utm.mx)*
**** LARM 2, University of Rome Tor Vergata, Rome 00133, Italy (e-mail: marco.ceccarelli@uniroma2.it)*

Abstract: This paper proposes an underactuated design for a robotic finger that uses compliant links to improve adaptability during cylindrical grasping. We analyze two grasping models by simulation in the Solidworks environment to verify the feasibility of the mechanisms. First, we test the proposed mechanism with rigid links (ABS) using three cylindrical objects (aluminum) with different diameters. Next, we test the proposed mechanism with complaint links (TPU) under identical conditions for the second simulation. The maximum angular displacements, the final position of the robotic finger (flexion movement), and the contact forces were obtained using a Solidworks and Matlab environment. The results discuss the efficiency of the proposed mechanism for adaptability under different conditions and contact forces describe each mechanism's advantages and disadvantages.

*Keywords:* Robotic finger, underactuated mechanism, flexible links, grasping, adaptability.

## 1. INTRODUCTION

Robotic hand designs have become a research area with many applications, including assistive robotics, prosthesis, supervised manipulation, teleoperation, tele-interaction, entertainment, service robotics, and autonomous manipulation (Piazza et al., 2019). Despite having different approaches, all areas are focused on fulfilling aspects like natural movements, anthropomorphic appearance, prototypes with a weight like the human hand, interaction with different objects in different environments, and control simplicity. Designing a prototype with all these features is a complex task; for this reason, the current prototypes are designed to fulfil a specific task. For example, prototypes with a high manipulability level, for example (Andrychowicz et al., 2020), are often heavier than a human hand, and they present complex system to their control. For this reason, different alternatives are proposed to generate prototypes that meet most of the requirements of the human hand, considering grasping as the principal aim. Being the fingers the elements that present more contact during grasping, most of the research are focused on replicate their structure and movements (Espinosa, 2019). Based on (Ceccarelli, 2015), the fingers design can be divided in two types, complex and underactuated. The first ones are solutions with a reduced number of degrees of freedom (DOF) and they are totally actuated. The second one present simple kinematic structure and generally they are actuated by fewer actuators. These qualities have played a key role in the use of the underactuated mechanisms; consequently, they can be preferred over fully actuated ones in grasping devices. The prototypes developed under this approach can perform firm grasp (Gosselin et al., 2008; Wu et al., 2009; Wu et al., 2015) and present simple operation (Ceccarelli et al., 2017; Wang et al., 2011) and low cost (Yang et al., 2017; Espinosa et al., 2021).

In spite of the advantages presented by these solutions, they are limited during grasping by factors such as the surface and size of the object because they have a stiff structure. For example, there is a partially grasping if the object is not in the grasping range of the finger movement. In other case, the object is not able to be hold by the finger also, the movement is limited because in many cases the distal phalanx does not touch the surface of the objects. As a solution, the use of compliant joints has been proposed (Zhang et al., 2020; Garcia et al., 2018). These works present improvements in anthropomorphic design and adaptability. Mostly prototypes are actuated by a wire but compared to a motor they need extra components to transform rotative movement to lineal and they require to adjust periodically the cable tension.

With the aim to take the most of advantages of the Underacturation and compliant design, in this paper a new finger design which combine both strategies (rigid and flexible links) is presented. The behaviour of the proposed finger mechanisms is

 ISSN en trámite

characterized thought grasping simulations considering objects with different sizes with discussion of numerical results.

## 2. MECHANISM DESIGN

As shown in Fig. 1 the proposed mechanism for the finger is underactuated with 3 DOF, it has 11 links whereas *l3*, *l2* and *l1* are the proximal, medial, and distal phalanx respectively. The mechanism is designed to be flexible. Therefore, sub-mechanisms of the proximal and medial phalanx have two operation modes: approaching motion and contact. Referring to the proximal phalanx, mode 1 starts with the movement of link *a*, it transmits the movement through link *b1*. Mode 2 starts when the joint between links *e* and *d* touch the object, here the underacturation starts. At this point, the contact force causes a movement of the links *e* and *d* opposite to the movement of link *a* and mode 1 of the medial phalanx begins. This mode and mode 2 of the proximal phalanx are completed when the link *l1* touches the object. Mode 2 of the medial phalanx begins when the links *f* and *g* touch the object, the distal phalanx moves to the object until link *l2* touches the object. Finally, the finger has been adapted to the object's surface.
The length of the phalanx is predetermined according to the synthesis results reported in (Espinosa et al., 2021) as *l1* = 41.89mm, *l2* =27.01mm and *l3* = 17.00mm. To generate a mechanism capable of achieving adaptability during grasping the method reported in (Cheng et al., 2017) is used. The authors proposed equation (1) to evaluate the discrepancy angles for the proposed link lengths during the optimization process.

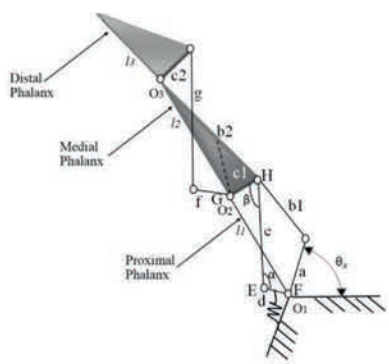



Fig. 1. Kinematic scheme of the underactuated finger with one input

$$\delta = (\alpha_0 - \alpha) - (\beta - \beta_0) \tag{1}$$

where $\alpha_0$ and $\beta_0$ are the initial angles with value of 90°, $\alpha$ is the angle between links *d* and *e*, $\beta$ is the angle between *c1* and *e*. Physically this equation represents the transmission angle produced during grasping. The relation among these angles can be described in the following expressions of the model in Fig. 1.

$$\alpha = \zeta - GEH, \tag{2}$$

$$\zeta = \sin^{-1}(c1 * \sin\beta / l_{EG}), \tag{3}$$

$$l_{EG} = \sqrt{l_1^2 + c1^2 - 2l_1 * c1 * \cos(\beta)}, \tag{4}$$

$$\phi = \cos^{-1}((l_4^2 + l_{EG}^2 - l_3^2)/2l_4 l_{EG}) \tag{5}$$

where $\zeta < GEF$ and $\phi < GEH$. These equations are used to find the values of the 4-bar cross mechanism. $\beta$ angles are proposed to find the values of each corresponding $\alpha$ angle, after the discrepancy of each relation is figured out and evaluated using the following fitness function:

$$min \sum_{i=1}^{n} (\delta_i - E(\delta))^2 / n \tag{6}$$

subject to:

$$\boldsymbol{a)\ \beta \in [0.7854, 2.19]\ rad}$$
$$\boldsymbol{b)\ c1, c2 \in [5, 25]\ mm}$$
$$\boldsymbol{c)\ e, g \in [30, 50]\ mm}$$

$E(\delta)$ can be expressed follows:

$$E(\delta) = \sum_{i=1}^{n} \delta_i / n \tag{7}$$

where *n* is the number of angles.

In order to solve the problem, a Differential Evolution (DE) algorithm can be conveniently implemented because their main advantages are the simplicity to apply and in most cases to find the global optimal (Fig. 2).

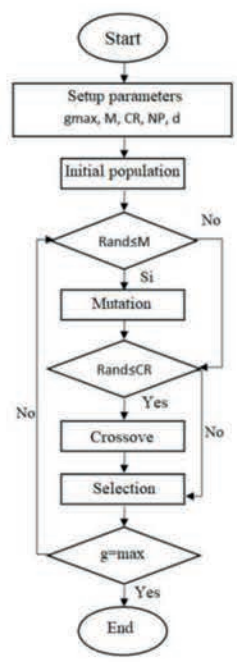



Fig. 2. Flowchart of the DE algorithm

 ISSN en trámite

Ten numerical experiments were carried out on a Legion Y540-15IRH laptop with Core i7 9th gen processor, 16 GB RAM. The parameters of the algorithm used are number population = 10, crossover probability = 0.5, mutation = 0.5, scale factor = 0.6 and maximum iteration = 50. The results after the optimization process are shown in Table 1, and the corresponding units of c1, c2, g, and e are mm. The error units are degrees.

**Table 1. Parameters obtained from optimization**

| Iter | c1 | c2 | g | e | Error |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12.35 | 15.517 | 33.133 | 48.850 | 0.5001 |
| 2 | 9.617 | 22.107 | 33.296 | 36.428 | 0.5026 |
| 3 | 8.010 | 10.500 | 36.001 | 40.020 | 0.4830 |
| 4 | 8.937 | 17.172 | 34.182 | 37.285 | 0.5017 |
| 5 | 16.85 | 18.005 | 37.703 | 36.728 | 0.4860 |
| 6 | 17.10 | 18.481 | 34.526 | 48.956 | 0.6026 |
| 7 | 14.61 | 19.296 | 39.909 | 48.321 | 0.6635 |
| 8 | 12.74 | 22.715 | 39.005 | 37.772 | 0.5753 |
| 9 | 18.95 | 20.805 | 37.904 | 42.073 | 0.7299 |
| 10 | 17.17 | 22.892 | 46.275 | 45.697 | 0.7814 |

Based on Table 1, the best combination values were found in iteration 3. The convergence of the best result evaluated in the fitness function is shown in Fig.3 and based on it; the final error is 0.4830 degrees. Also, the evolution of the variables during optimization process are shown in Fig. 4. The initial value for g is 47.62 mm and e is 46.38 mm and these values change after iteration 25 thus the value of both variables changes for g = 46.38 mm and e = 43.55 mm. On the other hand, the initial values of c1 and c2 are 10.80 mm, and 11.02 mm respectively. The final values for all variables are obtained in iteration 25 and in the following iterations the algorithm is not capable to find a best combination of values.

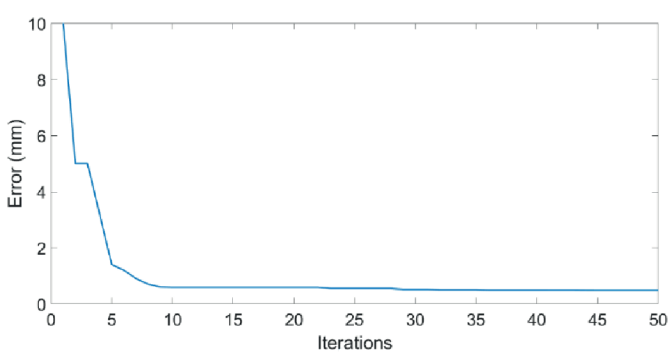



Fig. 3. Convergence of the best objective function vs number of evaluations

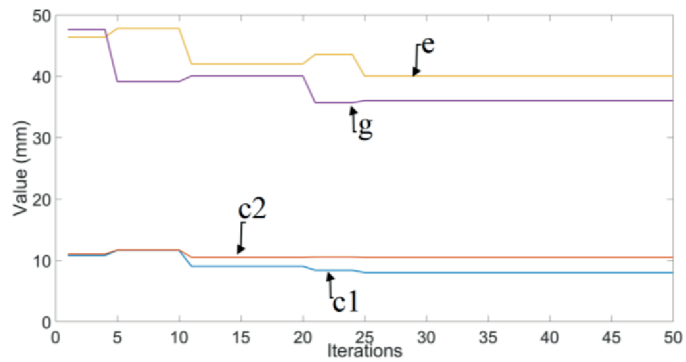



Fig. 4. Best value in each iteration

With the lengths obtained from the optimization procedure, the 4-bar cross mechanism was drawn in SolidWorks environment. The lengths of links *a*, *b1* and *b2* were obtained by mobility tests as 10, 42 and 29 mm, respectively.

## 3. CAD DESIGN AND NUMERICAL SIMULATION

The CAD model of the finger design from the optimization problem is shown in Fig. 5. The model has three phalanxes denoted by DP (distal phalanx), MP (middle phalanx), and PP (proximal phalanx). The width of each phalanx is w1 = 21.04mm, w2 = 17.6 mm, and w3 = 13.6mm, respectively. These values are in the range of a human finger. Furthermore, to achieve the maximum grasping level, three joints are considered, one by each phalanx.

To evaluate the performance of the finger, two simulations were carried out in a SolidWorks environment. The aim of the first modelling activity is to determine that there are no movement restrictions in the implemented mechanism and to identify if there is any problem with the links. In case of no problems during motion, the aim is to identify the maximum angular displacements of each phalanx. To drive the prototype, a motor is mounted on PP and the finger is placed on a platform made of wood with dimensions 100x100mm. The second part of the simulations is to contrast the contact forces applied in two cylindrical objects. Then, the simulation is carried out using the mechanism with rigid links made of ABS material. After that, the same tests are carried out, but in this case, the mechanism presents the phalanx as a flexible part. TPU is considered as the material for the flexible parts, and the rest of the links are rigid.

 ISSN en trámite

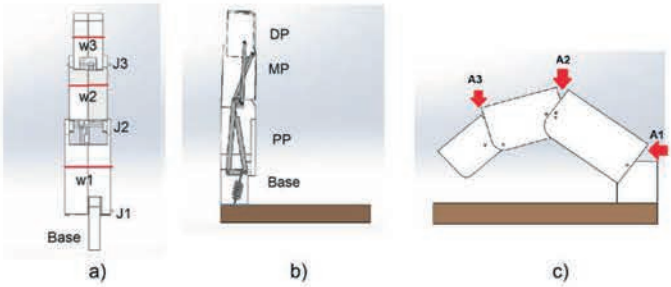



Fig. 5. A CAD model of the finger design: a) front view; b) initial position; c) final position

The model with all rigid links has an approximate weight of 14.91 grams, without considering the weight of the motor. The model with the flexible links presents a weight of 17.50 grams. The characteristics of the objects used for the test are shown in Table 2.
The finger model and the test object are placed on a wood base with dimensions of 100x100mm. The aim of these simulations is to measure the contact forces and obtain the ranges of motion for the phalanges after a total grasping.

**Table 2. Parameters for the object in grasping tests**

| Object | Material | Weight (gr) | Large (mm) | Diameter (mm) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Aluminium | 198.63 | 100 | 30 |
| 2 | Aluminium | 353.15 | 100 | 50 |

## 4. PERFORMANCE ANALYSIS VIA SIMULATION

Referring to the results of simulation 1, the prototype did not have mobility problems and the configuration is able to execute flexion/extension movements of each phalanx. From this simulation, the maximum angular displacements, and the final position of the robotic finger (flexion movement) were obtained. The final angular displacements between the phalanges are denotated by A1, A2, and A3 (Fig. 5c). The angular displacement of the PP is shown in Fig. 6 where one can appreciate a maximum angular displacement for A1 of 1.01 rad. On the other hand, the angular displacement of MP (A2) is 0.94 rad measured with respect to the final position of PP (see Fig.7). The angular displacement of the DP shows that the initial configuration is in 0 rad with respect to the MP. In Fig. 8, one can observe that DP achieves its maximum value in 4 s, which means that A3 = 0.48 rad.

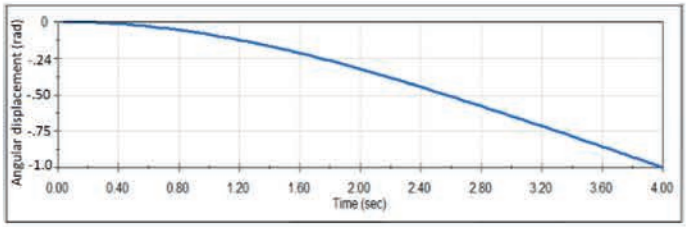



Fig. 6. Angular displacement of PP

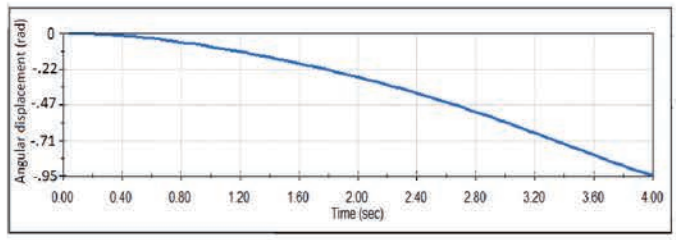



Fig. 7. Angular displacement of MP

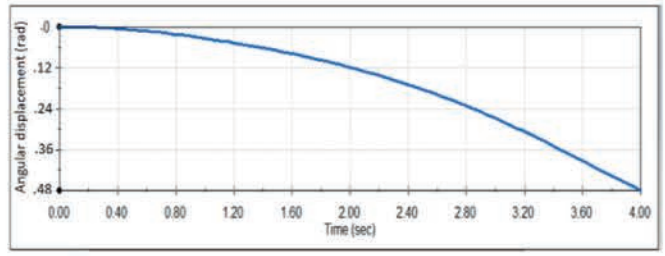



Fig. 8. Angular displacement of DP

From simulation 2 the adaptability results for grasping tests are shown in Fig. 9. For test 1, the PP presents an angular displacement of 1.01 rad, the MP of 0.942 rad, and the Dp of 0.436 rad. Test 2 shows the final configuration of the finger for grasping the object with diameter of 50 mm, the PP rotates 0.575 rad, the MP 0.558 rad and the DP 0.244 rad. In all cases, due to the mechanism configuration, just two phalanxes touch the object.

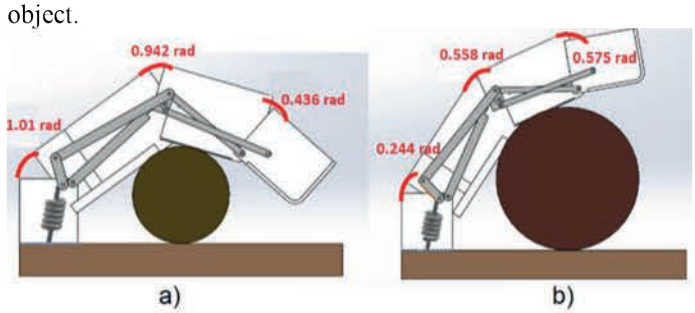



Fig. 9. Simulation 2: grasping. a) Test 1. b) Test 2

The results of the evaluation of the contact forces applied during grasping tests are shown in Table 3. For test 1 there is an increase of 11N in the PP and 16 N in the MP with the flexible feature. For test 2, there are an increase of 7N in the PP and 6N in the MP with the flexible links. Therefore, the TPU material will be chosen to make the physical prototype.

**Table 3. Forces tests results**

| Finger type | Test 1 | Test 2 |
|---|---|---|
| Rigid | PP = 6N<br>MP =10 N | PP = 4N<br>MP =8 N |
| Flexible | PP = 15N<br>MP =26 N | PP = 11N<br>MP =14 N |

 ISSN en trámite

## 4. CONCLUSION

The proposed underactuated mechanism design for the robotic finger has been presented and evaluated under two different considerations, with rigid links and flexible links. The results shows that the designed finger in both configurations can grasp cylindrical objects with different diameters. Under these conditions, the contact forces are calculated to demonstrate the advantages of the flexible materials in the proposed finger design with complaint links. In all tests, flexible links present higher contact forces during grasping.

## REFERENCES

Andrychowicz, O. M., Baker, B., Chociej, M., Jozefowicz, R., McGrew, B., Pachocki, J., ... & Zaremba, W. (2020). Learning dexterous in-hand manipulation. *The International Journal of Robotics Research*, *39*(1), pp. 3-20.

Ceccarelli, M. (2015). Finger mechanisms for robotic hands. In *Recent Advances in Mechanism Design for Robotics*, pp. 3-13.

Ceccarelli, M., & Zottola, M. (2017). Design and simulation of an underactuated finger mechanism for LARM Hand. *Robotica*, *35*(3), pp. 483-497.

Cheng, M., Jiang, L., Ni, F., Fan, S., Liu, Y., & Liu, H. (2017, July). Design of a highly integrated underactuated finger towards prosthetic hand. In *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM),* pp. 1035-1040.

Espinosa-García, F. J., Arias-Montiel, M., Ceccarelli, M., Carbone, G., & Lugo-González, E. (2019). Design and experimental characterization of a novel subactuated mechanism for robotic finger and movable palm. *Int. J. Mech. Control*, *20*(2), pp. 141-146.

Espinosa-Garcia, F. J., Tapia-Herrera, R., Lugo-González, E., & Arias-Montiel, M. (2021). Development of a robotic hand based on a palm with a metamorphic mechanism for extending the thumb's functionality. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *43*(8), pp. 1-16.

Garcia, L., Naves, M., & Brouwer, D. M. (2018, October). 3D-printed flexure-based finger joints for anthropomorphic hands. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1437-1442.

Gosselin, C., Pelletier, F., & Laliberte, T. (2008, May). An anthropomorphic underactuated robotic hand with 15 dofs and a single actuator. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 749-754.

Piazza, C., Grioli, G., Catalano, M. G., & Bicchi, A. J. A. R. O. C. (2019). A century of robotic hands. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, *2*, pp. 1-32.

Wang, L., DelPreto, J., Bhattacharyya, S., Weisz, J., & Allen, P. K. (2011, September). A highly-underactuated robotic hand with force and joint angle sensors. In *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1380-1385.

Wu, L., & Ceccarelli, M. (2009). A numerical simulation for design and operation of an underactuated finger mechanism for LARM hand. *Mechanics based design of structures and machines*, *37*(1), pp. 86-112.

Wu, L., de Andrade, M. J., Rome, R. S., Haines, C., Lima, M. D., Baughman, R. H., & Tadesse, Y. (2015, April). Nylon-muscle-actuated robotic finger. In *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2015*, vol. 9431, pp. 154-165.

Yang, Y., Chen, Y., Li, Y., Chen, M. Z., & Wei, Y. (2017). Bioinspired robotic fingers based on pneumatic actuator and 3D printing of smart material. *Soft robotics*, *4*(2), 147-162.

Zhang, Y., Zhan, Q., Li, R., & Bao, X. (2020). Design, Fabrication and Experiments of an Anthropomorphic Finger with Combined Compliant Joints. *Journal of Bionic Engineering*, *17*(6), pp. 1152-1162.

 ISSN en trámite

# Análisis comparativo en la medición de aceleración en chumacera.

**Miguel Ángel Rios Pérez*. Rey David Gama Flores***
**Miguel Angel Córdova Fajardo*. Arturo Luna Castro***

**Tecnológico Nacional de México Campus Lázaro Cárdenas, Michoacán, México, (e-mail: miguelangelriosperez@lcardenas.tecnm.mx)*

Resumen: A través de los años, la evolución de la industria ha permitido desarrollar máquinas más eficientes con el objetivo de mejorar sus procesos. Las vibraciones están presentes en casi todas estas máquinas, y la mayoría de las veces pueden causar daños que deben repararse. En esta situación, los instrumentos de medición de vibraciones se vuelven realmente relevantes. Mediante el uso de estos instrumentos, podemos medir los parámetros de vibración más importantes; aceleración, velocidad y desplazamiento. Esa información es necesaria para un análisis de vibraciones. En este trabajo se muestra el desarrollo de dos alternativas para la medición de la aceleración en un sistema vibratorio (chumacera), en un conjunto motor-flecha y encontramos que ambas alternativas pueden ser utilizadas con fines educativos.

*Palabras clave:* Vibraciones, instrumentos de medida, sistema vibratorio, aceleración, fines educativos.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la operación de máquinas rotativas con la finalidad de realizar trabajo, surge el fenómeno de vibraciones. La fuente de emisiones de vibraciones se ve relacionada con el rotor, el cual es el elemento mecánico que transfiere la energía por medio de movimiento. En condiciones reales, es frecuente la presencia de rotores en condiciones de desbalance (Lee, 1993). Es posible definir el concepto de vibración como, el movimiento periódico de la máquina o parte de sus elementos desde una posición de equilibrio (Scheffer & Girdhar, 2004).

En las industrias por lo general, las vibraciones mecánicas están presentes en prácticamente toda la maquinaria que tiene movimiento, la mayoría de las ocasiones rotativo. Con el objetivo de preservar en buenas condiciones todos los elementos de la maquinaria, anticipando a que se presente una falla de mayor magnitud, es preciso llevar a cabo un monitoreo mediante la adquisición de datos de las vibraciones que actúan en la máquina (Acosta Avecillas & Molina Jiménez, 2012 ). Llevar a cabo el análisis de los datos obtenidos a través del monitoreo de las vibraciones mecánicas, garantiza una mayor confiabilidad en el sistema.

En los programas de mantenimiento preventivo y predictivo, el monitoreo y análisis de vibraciones forma parte fundamental debido a que a través de estos se reducen los costos que produciría el parar la producción de la planta porque algún equipo principal tuvo un daño que necesita dejarlo fuera de servicio.

En general, para fines didácticos solamente se tratan las vibraciones mecánicas de manera teórica, cuando probablemente observar la onda de vibración de una maquinaria sería mucho más enriquecedor. Con el objetivo de monitorear las vibraciones se han desarrollado sistemas de adquisición de datos, en este articulo se presenta el desarrollo de dos alternativas para la medición de aceleración de un sistema vibratorio.

## 2. MARCO TEORICO

Para establecer el análisis de vibraciones, se establece un sistema de un objeto de masa m sujeta a un resorte con una rigidez k comportándose como un oscilador armónico. La ecuación de posición del sistema resorte-masa, para el caso de una dimensión, se define como:

$$x = Asin(\omega t) \qquad (1)$$

Donde $\omega$ es la frecuencia de oscilación en radianes por segundos.

Para la ecuación de movimiento del sistema m-k, aplicaremos la segunda ley de Newton para lo cual se establece:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \qquad (2)$$

$$x = Asin(\omega t) \qquad (3)$$

$$\dot{x} = A\omega cos(\omega t) \qquad (4)$$

$$\ddot{x} = -A\omega^2 sin(\omega t) \qquad (5)$$

Para la anterior ecuación diferencial ordinaria de segundo orden, su ecuación característica corresponde a:

$$-mA\omega^2 + kA = 0 \qquad (6)$$

 ISSN en trámite

Para cualquier amplitud $A$, observamos que:

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad (7)$$

La anterior ecuación corresponde a la frecuencia natural del sistema m-k, para lo cual es la frecuencia con la cual puede vibrar en ausencia de fuentes forzadas.

En lo referente al movimiento en un plano, la frecuencia natural se define:

$$\omega_{nz} = \sqrt{k_z/m} \quad (8)$$

$$\omega_{ny} = \sqrt{k_y/m} \quad (9)$$

Para sistemas m-k con la presencia de amortiguamiento C y se encuentren bajo la acción de una fuerza $f(t) = F_0 \sin(\omega t + \theta)$, la ecuación que describe su movimiento resulta en la ecuación diferencial lineal de segundo orden (Adams, 2000), como se escribe enseguida:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t + \theta) \quad (10)$$

La solución de la respuesta particular corresponde al estado estacionario, mientras que la solución de la homogénea abarca la presencia de los transitorios.

En este artículo se exponen dos alternativas para la medición de aceleración en una chumacera, la cual porta una flecha que se acopla al eje de un motor eléctrico tipo jaula de ardilla.

Las alternativas de solución se caracterizan por ser de programación abierta; esto nos permite modificar su algoritmo en cualquier momento para ajustarlo a alguna necesidad de medición diferente a la que fue programado inicialmente, en comparación de un analizador de vibraciones comercial, el cual solo es posible hacer uso de las funciones con las que cuenta el instrumento.

Ambas alternativas comparten el mismo tipo de programación, en este caso se trabajó en la plataforma de LabVIEW; esta nos facilita la programación en muchos aspectos ya que esta es demasiado intuitiva. LabVIEW es un software que proporciona un potente entorno de desarrollo gráfico para el diseño de aplicaciones de Ingeniería de adquisición de datos, análisis de medidas y presentación de datos gracias a un lenguaje de programación sin la complejidad de otras herramientas de desarrollo.

Fue creado por National Instruments en 1976 para funcionar sobre máquinas MAC, aunque actualmente está disponible para cualquier sistema operativo. Se trata de un entorno de desarrollo diseñado específicamente para acelerar la productividad de ingenieros y científicos. El lenguaje utilizado para programar en él se llama Lenguaje G, donde la G simboliza que es un lenguaje de tipo gráfico. Este lenguaje de programación gráfica facilita la recopilación de datos de instrumentos de laboratorio utilizando sistemas de adquisición de datos.

La programación en esta plataforma se divide en dos partes; la primera es donde se realiza toda la programación de los bloques de funciones, este lleva por nombre VI Block Diagram (VI Diagrama de bloque).

La segunda parte lleva por nombre VI Front Panel; en esta se puede realizar el diseño de una interfaz gráfica para la visualización de los datos que se adquieran.

Para poder visualizar la medición de aceleración se requiere de un sistema de adquisición de datos.

Las principales etapas de un sistema de adquisición de datos son las siguientes: etapa transductora, de acondicionamiento, de adquisición y etapa de registro y procesamiento de información. Los transductores son los encargados de medir los fenómenos físicos y proveer una señal eléctrica que pueda ser interpretada por un sistema de adquisición, de acuerdo a la relación entrada/salida que tenga el transductor (sensibilidad). Los transductores más comúnmente utilizados para la medición de vibraciones son los acelerómetros piezoeléctricos, además de los velocímetros sísmicos o electrodinámicos y los sensores de desplazamiento sin contacto. Algunos transductores requieren de un acondicionamiento especial, como suministro de voltaje, disminución de impedancia, aislamiento y amplificación.

La etapa de adquisición está básicamente constituida por elementos como conversores A/D (análogo/digital) y conversores D/A. Para la adquisición de señales dinámicas, como las de vibración y ruido, se recomienda utilizar tarjetas de adquisición de datos con alta resolución (mayor de 16 bits), bajo nivel de ruido y con una velocidad de muestreo por canal mayor de 100 kHz.

Es en la etapa de procesamiento donde se analizan, las señales vibratorias utilizando técnicas de procesamiento digital de señales. Para ello se puede hacer uso de diferentes lenguajes de programación que permitan implementarlas de manera eficiente y confiable (P., et al., 2006).

## 3. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO

**Alternativa 1.**

Como primera alternativa se realizó la medición de la aceleración a partir de la adquisición datos por medio de una tarjeta de Arduino y un acelerómetro MPU6050, esta es la alternativa de más bajo costo. En la tabla 1 se enlistan las características del acelerómetro y en la tabla 2 se enlistan las especificaciones de la placa Arduino a utilizar. Estos datos nos ayudaran a realizar la comparación con la alternativa que se presentara posteriormente.

 ISSN en trámite

| |
|---|
| Acelerómetro 3 ejes |
| Giroscopio 3 ejes |
| Protocolos de comunicación SPI – I2C |
| Voltaje de 3V – 5 V |
| Corriente de 3.5mA |
| Lectura de MPU6050 -32768 a +32768 |
| Aceleración de -2g a +2g |
| Velocidad angular -250°/s a +250°/s |

Tabla 1. Características generales del acelerómetro MPU6050.

| |
|---|
| Microcontrolador: ATMega328P. |
| Velocidad de reloj: 16 MHz. |
| Voltaje de trabajo: 5V. |
| Voltaje de entrada: 7,5 a 12 voltios. |
| Pinout: 14 pines digitales (6 PWM) y 6 pines analógicos. |
| 1 puerto serie por hardware. |
| Memoria: 32 KB Flash (0,5 para bootloader), 2KB RAM y 1KB Eeprom |

Tabla 2. Especificaciones generales de la tarjeta Arduino UNO.

El MPU6050 trabaja a un voltaje de 3V a 5V, se recomienda trabajar con 3V para evitar posibles fallas. La terminal VCC se conecta a los 5V que proporciona el Arduino. La terminal GND como su nombre lo dice se conecta a tierra.

Posteriormente las terminales SCL y SDA se conectan a las entradas analógicas del Arduino, en este caso son A5 y A4 respectivamente, estas entradas son las que se encargan de tomar las lecturas. Por último, la terminal INT se conecta en pin 2. El diagrama de conexión se muestra en la figura 1.

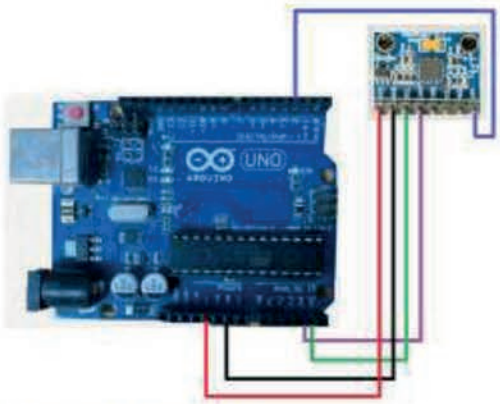



Figura 1. Diagrama de conexión.

Una vez que se han realizado las conexiones pertinentes, se procede a la programación en LabVIEW. Para poder trabajar Arduino con la plataforma de LabVIEW fue necesaria la instalación del complemento Linx Firmware Wizard.

Este complemento funciona como un módulo compilador de Arduino para LabVIEW que se descarga en la tarjeta permitiéndonos programar en LabVIEW y que la tarjeta Arduino pueda leer.

Para la visualización de la medición de aceleración, se diseñó una interfaz donde se muestra por medio de gráficas en los ejes x, y, z.

**Alternativa 2.**

Para la segunda alternativa se realizó la medición de la aceleración a partir de la adquisición datos por medio de una tarjeta de USB 6001 de National Instruments y un acelerómetro piezoeléctrico industrial de bajo costo, modelo 602D01 de PCB PIEZOTRONICS. Estos dos elementos son de mayor costo que los descritos en la primera alternativa, pero nos brindan de algunas ventajas con respecto a los mostrados en la primera alternativa. En la tabla 3 se enlistan las especificaciones más relevantes de la USB 6001 y en la tabla 4 se enlistan las especificaciones del acelerómetro.

| |
|---|
| Número de canales:<br>Diferencial: 4 Únicas: 8 |
| Resolución de 14 bits |
| Velocidad Máxima de Muestreo 20 kS/s |
| Rango de entrada ±10 V |
| Voltaje de funcionamiento ±10 V |
| Protección de sobrevoltaje<br>Energizado ±30 V<br>Desenergizado ±20 V |

Tabla 3. Especificaciones USB 6001.

| |
|---|
| Sensibilidad: (±10%)100 mV/g (10.2 mV/(m/s²)) |
| Rango de frecuencia: (±3dB)30 a 480000 cpm (0.5 a 8000 Hz) |
| Elemento sensor: Cerámica |
| Rango de medición: ±50 g (±490 m/s²) |
| Peso: 2.61 oz (74.0 gr) |
| Voltaje de excitación: 18 a 28 VDC |
| Bias (Voltaje): 8 a 12 VDC |
| Excitación de corriente constante: 2 a 20 mA |

Tabla 4. Características relevantes del acelerómetro 602D01.

La tarjeta USB 6001 cuenta con terminales de tipo tornillo, mientras el sensor acelerómetro presenta conexión tipo BNC. Para establecer comunicación con la tarjeta se deben adecuar a esta situación. Para solucionar esta cuestión se utilizó un adaptador de BNC a terminal de tornillo, el sensor tenía la peculiaridad de que su alimentación y su señal de salida se toman de la misma terminal; así que por medio de la terminal de tornillo se introduce la alimentación al sensor (misma que se explica a continuación) y de la misma terminal se conecta a un capacitor y una resistencia que nos servirán para eliminar el voltaje bias y

 ISSN en trámite

obtener la salida de voltaje (sensibilidad) mencionada en la tabla 4.

Es importante resaltar que, de acuerdo al manual del sensor, no se puede conectar el sensor directamente a la tarjeta, se necesita excitar el sensor con una fuente de voltaje que puede ir desde 18 a 28 VDC; para este caso se decantó por utilizar ya que se encuentra dentro del rango permitido por el sensor. Otra restricción del acelerómetro es que la excitación debe ser de corriente constante. Para lograr esto se utilizó el regulador de corriente LM334Z al cual le establecimos una configuración por medio de una resistencia. Se obtuvo una corriente de aproximadamente de 4 mA; esto es bastante aceptable ya que se encuentra dentro de los límites establecidos en la hoja de especificaciones del fabricante. Se diseño un circuito para realizar la tarea antes descrita, en la figura 2 se muestra este circuito cuyo diseño fue realizado a través del software Proteus.

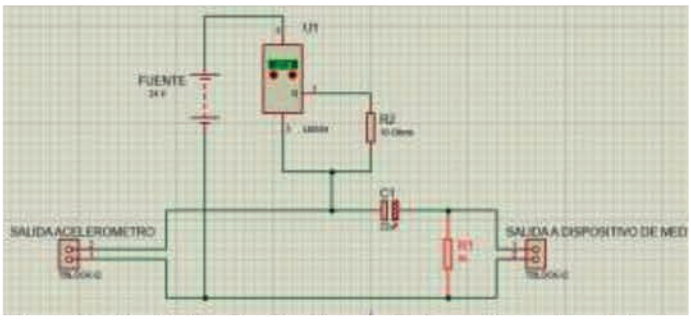



Figura 2. Diseño de circuito de acondicionamiento de señal.

Para llevar a cabo la prueba con ambas alternativas, se dispuso de un sistema vibratorio el cual se compone por un motor eléctrico trifásico tipo jaula de ardilla (1715 rpm) cuyo eje se acopla a una flecha de acero y esta a su vez reposa sobre dos chumaceras; el motor trabajara a 1715 rpm y sin carga. En la prueba realizada los sensores (acelerómetros) se montaron sobre la chumacera más cercana al motor eléctrico y se probaron ambas alternativas por separado. En la figura 3, se muestra el sistema vibratorio descrito.

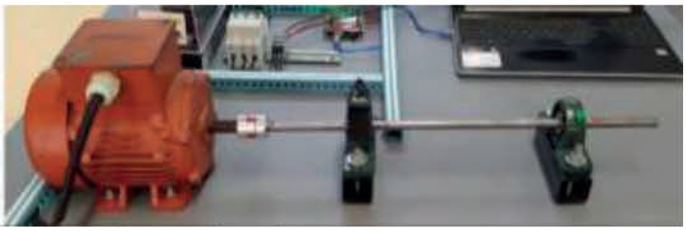


Figura 3. Sistema vibratorio.

## 4. RESULTADOS

Se recolectaron los datos de ambas alternativas probadas en el experimento, primeramente, se muestra en la tabla 5, así como en la figura 4, los valores de aceleración obtenidos por el sistema descrito en la alternativa 1. Es importante resaltar que este sistema nos arrojaba datos de aceleración en tres ejes (x, y, z) debido a que es triaxial. Para establecer la comparación entre las dos alternativas presentadas en este articulo solamente se tomarán en cuenta los valores de aceleración obtenidos en el eje x, debido a que el acelerómetro utilizado en el sistema de la alternativa 2 solamente nos arroja información de un solo eje, en este caso el eje x. Posteriormente, en la tabla 6 y la figura 4 se muestran los datos de aceleración obtenidos a través de la alternativa 2 por medio del acelerómetro 602D01.

| Tiempo | Aceleración en m/s² |
|---|---|
| 0 | -0.311933 |
| 0.001 | -0.555474 |
| 0.002 | 1.75816 |
| 0.003 | 1.51462 |
| 0.004 | -1.04256 |
| 0.005 | -0.677245 |
| 0.006 | 2.48878 |
| 0.007 | 1.27108 |
| 0.008 | -1.40787 |
| 0.009 | -0.799015 |
| 0.01 | 0.175148 |

Tabla 5. Datos recabados por acelerómetro MPU6050.

| Tiempo | Aceleración en m/s² |
|---|---|
| 0 | -0.795123 |
| 0.001 | -0.127538 |
| 0.002 | 0.4933492 |
| 0.003 | 1.5325537 |
| 0.004 | 2.42367 |
| 0.005 | -1.23425 |
| 0.006 | 1.95732 |
| 0.007 | 0.12753 |
| 0.008 | -2.25475 |
| 0.009 | 0.63843 |
| 0.01 | 0.24392 |

Tabla 6. Datos recabados por acelerómetro 602D01.

 ISSN en trámite

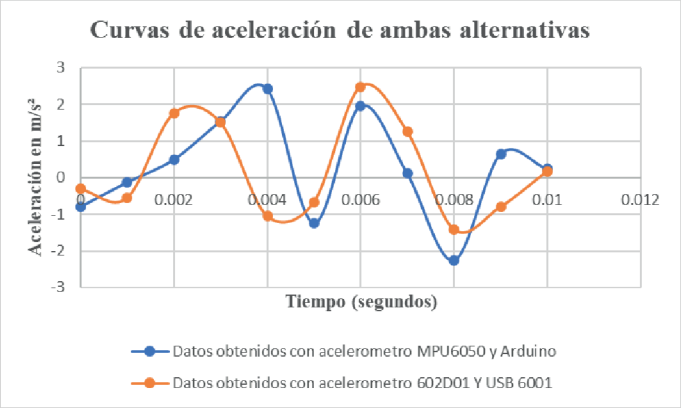



Figura 4. Curvas de aceleración obtenidas a partir de ambas alternativas.

Se observa que los datos de aceleración obtenidos a partir de cada alternativa son similares. Ambas alternativas debido a sus costos pueden ser aplicables en el ámbito del análisis de vibraciones con propósitos didácticos.

Tomando en cuenta (10), durante la experimentación, el motor giraba a 1715 rpm como se mencionó anteriormente, a partir de este hecho se establece una frecuencia teórica de la fuente forzada como (Jatakar, et al., 2022):

$$f = (2\pi n)/60 \qquad (11)$$

Donde $n$ es la velocidad del motor.

Usando (11), obtuvimos una frecuencia teórica de 29 Hz aproximadamente. Por otra parte, el valor de la amplitud $F_0$ es posible definir desde los datos experimentales, dicho tema quedara fuera del alcance del presente articulo para futuro trabajo.

## 5. CONCLUSIÓN

En diversas industrias es indispensable contar con equipos que realicen el monitoreo de la vibración como parte de un programa de mantenimiento. Mediante este trabajo se realizó una comparativa de dos alternativas para la medición de aceleración en una chumacera, donde la alternativa 1 es de menor costo que la alternativa 2, pero al realizar la prueba la alternativa 2 mostraba más fluidez en la lectura de datos. Con respecto a la alternativa 2, los valores de la alternativa 1 son cercanos. Si bien la alternativa 1 es mucho más económica que la 2, la alternativa 2 nos ofrece una mayor resolución, lo cual puede ser determinante en el grado de exactitud de las mediciones que se obtengan.

Como se ha mencionado cada alternativa presenta sus respectivas ventajas y desventajas una con respecto a la otra, donde a grandes rasgos podemos decir que la alternativa 2 es mejor, sin embargo para aplicaciones de fin didáctico ambas alternativas serian una gran opción.

## REFERENCIAS

Acosta Avecillas, D. S. & Molina Jiménez, J. K., 2012. *Adquisición de Vibraciones Mecánicas de un Motor en funcionamiento usando LabVIEW.*

Adams, M. L., 2000. *Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting.* s.l.:CRC Press.

Jatakar, K. H. y otros, 2022. Vibration monitoring system based on ADXL335 accelerometer and Arduino Mega2560 interface. *Journal of Algebraic Statistics,* 13(2), pp. 2291-2301.

Lee, C. W., 1993. *Vibration Analysis of Rotors.* s.l.:Springer Science & Business Media.

P., E. E., San Martin , C. & Solaligue M., R., 2006. Diseño e Implementación de un Analizador Virtual de Vibraciones Mecánicas. *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Tarapacá,* 14(1), pp. 7-15.

Scheffer, C. & Girdhar, P., 2004. *Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance.* s.l.:Elsevier.

 ISSN en trámite

# Análisis cinemático de posición discreto para robots y manipuladores paralelos tipo Delta

**J. Alexis Mayo-Álvarez *, Andrés Blanco-Ortega*, Arturo Abúndez-Pliego*, Jorge Colín-Ocampo *, Eladio Martínez-Rayón*,**

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490*
*(Tel: 777-362-7770; e-mail: andres.bo@cenidet.tecnm.mx) (Tel: 734-147-7238; e-mail: m20ce083@cenidet.tecnm.mx).*

**Resumen:** En este trabajo se presenta un análisis cinemático de posición para robots y manipuladores paralelos tipo Delta. Se formuló un modelo cinemático inverso y directo de posición para la orientación típica de los manipuladores tipo Delta, donde destaca el novedoso análisis inverso, en el cual se redujo la ecuación de lazo cerrado y en comparación con otros sistemas de ecuaciones existentes en la literatura; se obtuvo para los pares cinemáticos activos un breve sistema de ecuaciones con componentes lineales. Con lo cual, es posible reducir el error de redondeo del análisis y de análisis posteriores si se desea escalar el análisis cinemático a un orden mayor y/o utilizarlo para desarrollar el análisis dinámico.

***Palabras clave**:* Delta robot, robot paralelo, cinemática inversa, cinemática directa.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un manipulador o robot paralelo es un mecanismo que consta de dos plataformas; una fija y otra móvil unidas entre sí por dos o más cadenas cinemáticas. Debido a su compacta tipología, los manipuladores y robots paralelos cuentan con excelente rigidez por ello tienen una alta capacidad de carga y precisión. Por tal motivo, durante varios años se ha investigado de manera exhaustiva a los robots y manipuladores paralelos, originando resultados que se reflejan en el ámbito académico e industrial [1], destacando entre ellos el manipulador paralelo tipo Delta [2] el cual es el mecanismo de estudio en la presente investigación.

En la figura 1 es posible apreciar la configuración cinemática del robot Delta, el cual está compuesto de tres cadenas cinemáticas cerradas en configuración revoluta-esférico-esférico (RSS por sus siglas en inglés), siendo el par de revoluta el par activo del robot.

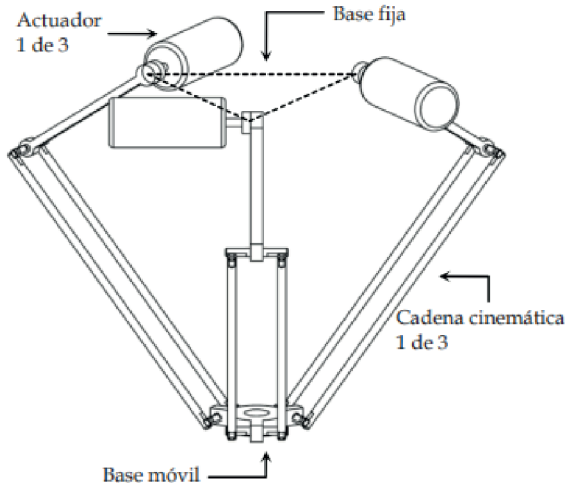



Fig. 1. Robot paralelo tipo Delta [3].

Para caracterizar a los robots o manipuladores paralelos, es necesario realizar el análisis de la cinemática directa y el de la cinemática inversa.
La cinemática directa determina los parámetros cinemáticos del actuador final del robot o manipulador paralelo una vez establecidos los pares cinemáticos que conforman las cadenas cinemáticas, mientras la cinemática inversa determina los parámetros de las cadenas cinemáticas que conforman los robots o manipuladores paralelos [4].
El análisis directo de posición determina las coordenadas en un sistema de referencia global *XYZ* del par cinemático que se antepone al actuador final en la cadena cinemática, para los manipuladores paralelo determina las coordenadas de los pares cinemáticos que une la base móvil con las cadenas cinemáticas que conforman el manipulador [5].
A continuación se presenta el desarrollo de un modelo cinemático de posición basado en [6] para un manipulador o robot paralelo tipo Delta en posición típica, es decir, en posición de los octantes negativos del eje Z; con altura negativa. Donde es de destacar el planteamiento de la cinemática inversa; el cual establece las ecuaciones de posición para los pares cinemáticos activos a partir de la componente Z de la cinemática directa, obteniendo ecuaciones de posición más breves que las obtenida en [6] y [7].

## 2. ANÁLISIS CINEMÁTICO DE POSICIÓN

### *2.1 Cinemática directa de posición.*

De manera generalizada, se puede establecer el análisis cinemático directo de posición para las tres cadenas cinemáticas, para obtener las coordenadas del par cinemático que antecede al actuador final, considerando la nomenclatura presentada en las figura 2 y 3 para este caso se determina las coordenadas del punto P en la base móvil considerado como el punto de ubicación del actuador final.

 ISSN en trámite

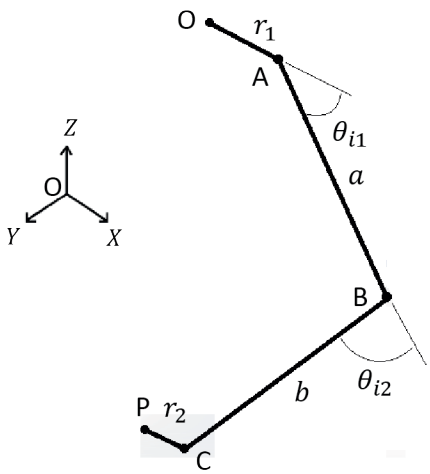



Fig. 2. Cadena cinemática *i* en vista isométrica.

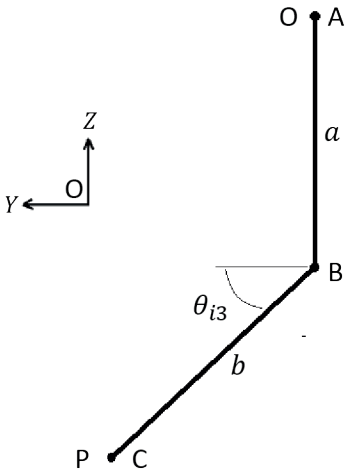



Fig. 3. Cadena cinemática *i* en vista frontal.

De la cadena cinemática mostrada en la figura 2 y 3 se establece la siguiente ecuación de lazo cerrado,

$$\overline{OA} + \overline{AB} + \overline{BC} = \overline{OP} + \overline{PC} \tag{1}$$

donde;

$$\overline{OA} = \begin{Bmatrix} r1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{2}$$

$$\overline{AB} = \begin{Bmatrix} a\,cos\theta_{i1} \\ 0 \\ -a\,sin\theta_{i1} \end{Bmatrix} \tag{3}$$

$$\overline{BC} = \begin{Bmatrix} b\,cos(\theta_{i1} + \theta_{i2})sin\theta_{i3} \\ b\,cos\theta_{i3} \\ -b\,sin(\theta_{i1} + \theta_{i2})sin\theta_{i3} \end{Bmatrix} \tag{4}$$

$$\overline{PC} = \begin{Bmatrix} r2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{5}$$

$$\overline{OP} = \begin{bmatrix} \cos\emptyset_i & \sin\emptyset_i & 0 \\ -\sin\emptyset_i & \cos\emptyset_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Px \\ Py \\ -Pz \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Px\,cos\emptyset_i + Py\,sin\emptyset_i \\ -Px\,sin\emptyset_i + Py\,cos\emptyset_i \\ -Pz \end{Bmatrix} \tag{6}$$

Donde $\emptyset_i$ indica la orientación de las cadenas cinemáticas en el eje X del sistema de referencia O en el cual $i = 1, 2, 3$, entonces;

$$\emptyset_1 = 0° \tag{7}$$
$$\emptyset_2 = 120° \tag{8}$$
$$\emptyset_3 = 240° \tag{9}$$

Para determina la posición del punto P vista desde O;

$$\overline{OP} = \overline{OA} + \overline{AB} + \overline{BC} - \overline{PC} \tag{10}$$

$$\begin{Bmatrix} Px \\ Py \\ -Pz \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} a\,cos\theta_{i1} \\ 0 \\ -a\,sin\theta_{i1} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} b\,cos(\theta_{i1} + \theta_{i2})sin\theta_{i3} \\ b\,cos\theta_{i3} \\ -b\,sin(\theta_{i1} + \theta_{i2})sin\theta_{i3} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} r2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{11}$$

*2.1 Cinemática inversa de posición.*

Para determina los valores de los ángulos $\theta_{i1}$, $\theta_{i2}$, $\theta_{i3}$ de las cadenas cinemáticas del robot es necesario determinar la cinemática inversa, para determinar $\theta_{i3}$ se reescribe la ecuación para el punto C visto desde A; de la cual se podrá obtener las coordenadas del punto C.

$$\overline{AB} + \overline{BC} = \overline{OP} + \overline{PC} - \overline{OA} \tag{12}$$

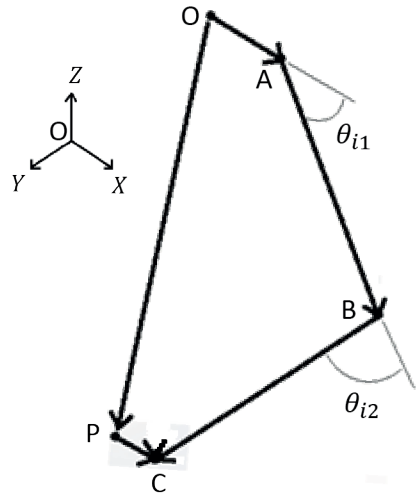



Fig. 4. Lazo cerrado de los vectores que conforman la cadena cinemática *i* en vista isométrica.

$$\begin{Bmatrix} Cx_i \\ Cy_i \\ -Cz_i \end{Bmatrix} = \overline{AB} + \overline{BC} \tag{13}$$

 ISSN en trámite

$$\begin{Bmatrix} Cx_i \\ Cy_i \\ -Cz_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a\,cos\theta_{i1} + b\cos(\theta_{i1}+\theta_{i2})sin\theta_{i3} \\ b\cos\theta_{i3} \\ -a\,sin\theta_{i1} - b\sin(\theta_{i1}+\theta_{i2})sin\theta_{i3} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

De igual manera

$$\begin{Bmatrix} Cx_i \\ Cy_i \\ -Cz_i \end{Bmatrix} = \overline{OP} + \overline{PC} - \overline{OA} \quad (15)$$

$$\begin{Bmatrix} Cx_i \\ Cy_i \\ -Cz_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\emptyset_i & \sin\emptyset_i & 0 \\ -\sin\emptyset_i & \cos\emptyset_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Px \\ Py \\ -Pz \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} r2 - r1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{Bmatrix} Cx_i \\ Cy_i \\ -Cz_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Px\,cos\emptyset_i + Py\,sin\emptyset_i + r2 - r1 \\ -Px\,sin\emptyset_i + Py\,cos\emptyset_i \\ -Pz \end{Bmatrix} \quad (17)$$

De donde se puede deducir que

$$b\cos\theta_{i3} = -Px\,sin\emptyset_i + Py\,cos\emptyset_i \quad (18)$$

y

$$\theta_{i3} = \text{acos}\left(\frac{-Px\,sin\emptyset_i + Py\,cos\emptyset_i}{b}\right) \quad (19)$$

Para el ángulo $\theta_{i2}$, se puede obtener de la siguiente ecuación de la geometría de los puntos A y C con los eslabones $a$ y $b$,

$$Cx_i^{\,2} + Cy_i^{\,2} + Cz_i^{\,2} = a^2 + b^2 + 2ab\,sin\theta_{i3}cos\theta_{i2} \quad (20)$$

donde

$$\theta_{i2} = \text{acos}\left(\frac{Cx_i^{\,2} + Cy_i^{\,2} + Cz_i^{\,2} - a^2 - b^2}{2ab\,sin\theta_{i3}}\right) \quad (21)$$

A diferencia de [6] donde para obtener $\theta_{i1}$ se utilizó la presente ecuación (20) utilizando las coordenadas del punto C, para la presente investigación se redujo la ecuación de lazo en función del punto C como se muestra en la figura 5,

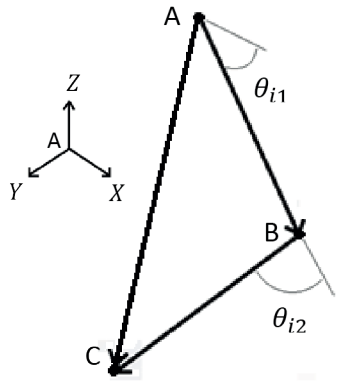



Fig. 5. Lazo reducido de los vectores que conforman la cadena cinemática *i* en vista isométrica.

$$\overline{AB} + \overline{BC} = \overline{AC} \quad (22)$$

igual a las ecuaciones (13) y (14).

Para obtener $\theta_{i1}$ se utilizó la componente en Z del punto C considerando que las bases móvil y fija siempre mantienen una posición perpendicular una respecto de la otra, de modo que,

$$-Pz = -C_{Z_1} = -C_{Z_2} = -C_{Z_3} \quad (23)$$

Lo cual puede apreciarse en las ecuaciones (11) y (14), siendo igual a la componente en Z de la cinemática directa debido a que los segmentos r1 y r2 tienen una posición neta en X y no proyectan componentes en Y y Z.

$$-Pz = -a\,sin\theta_{i1} - b\,sin(\theta_{i1}+\theta_{i2})sin\theta_{i3} \quad (24)$$

Si se sabe que

$$\sin(\theta_{i1}+\theta_{i2}) = sin\theta_{i1}cos\theta_{i2} + cos\theta_{i1}sin\theta_{i2} \quad (25)$$

Sustituyendo (25) en (24)

$$-Pz = -a\,sin\theta_{i1} - b\,sin\theta_{i1}cos\theta_{i2}sin\theta_{i3} - b\,cos\theta_{i1}sin\theta_{i2}sin\theta_{i3} \quad (26)$$

Si se sabe qué;

$$\cos\theta_{i1} = \left(\frac{1 - tan^2\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)}{1 + tan^2\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)}\right) \quad (27)$$

Y

$$\sin\theta_{i1} = \left(\frac{2\,tan\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)}{1 + tan^2\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)}\right) \quad (28)$$

Sustituyendo las ecuaciones (27) y (28) en (26) se tiene;

$$-Pz = -a\left(\frac{2\,tan\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)}{1 + tan^2\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)}\right) - b\left(\frac{2\,tan\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)}{1 + tan^2\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)}\right)cos\theta_{i2}sin\theta_{i3} - b\left(\frac{1 - tan^2\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)}{1 + tan^2\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)}\right)sin\theta_{i2}sin\theta_{i3} \quad (29)$$

Donde se puede despejar el factor común,

(30)

 ISSN en trámite

$$-Pz\left(1+tan^2\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)\right) = -a\left(2\,tan\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)\right) - b\left(2\,tan\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)\right)cos\theta_{i2}sin\theta_{i3} - b\left(1-tan^2\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)\right)sin\theta_{i2}sin\theta_{i3}$$

Tras realizar las multiplicaciones se obtiene;

$$\left(-Pz - Pz\,tan^2\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)\right) = -2a\left(tan\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)\right) - 2b\left(tan\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)\right)cos\theta_{i2}sin\theta_{i3} - b\,sin\theta_{i2}sin\theta_{i3} + b\left(tan^2\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)\right)sin\theta_{i2}sin\theta_{i3} \quad (31)$$

Igualando a cero se tiene,

$$0 = \left(tan^2\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)\right)(Pz + b\,sin\theta_{i2}sin\theta_{i3}) + \left(tan\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right)\right)(-2a - 2b\,cos\theta_{i2}sin\theta_{i3}) + (Pz - b\,sin\theta_{i2}sin\theta_{i3}) \quad (32)$$

Igual a

$$0 = A\,tan^2\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right) + B\,tan\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right) + C \quad (33)$$

Donde;

$$A = Pz + b\,sin\theta_{i2}sin\theta_{i3} \quad (34)$$

$$B = -2a - 2b\,cos\theta_{i2}sin\theta_{i3} \quad (35)$$

$$C = Pz - b\,sin\theta_{i2}sin\theta_{i3} \quad (36)$$

Con lo cual;

$$tan\left(\frac{\theta_{i1}}{2}\right) = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (37)$$

Entonces;

$$\theta_{i1} = 2 * \text{atan}\left(\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}\right) \quad (38)$$

Con lo cual se obtiene un sistema de ecuaciones con dos resultados.

## 3. EJEMPLO NUMÉRICO.

Para determinar la ecuación para la solución práctica de la ecuación 38 se realizó un el ejemplo numérico; donde se utilizó el siguiente dimensionamiento geométrico.

$$\text{r1} = 10\text{ cm}$$
$$\text{r2} = 5\text{ cm}$$
$$\text{a} = 25\text{ cm}$$
$$\text{b} = 30\text{ cm}$$

Para la solución de la cinemática directa se establecieron de manera arbitraria los valores de los ángulos, para la cadena cinemática 1 de la siguiente manera:

$$\theta_{11} = 50°$$
$$\theta_{12} = 80°$$
$$\theta_{13} = 75°$$

Con lo cual se obtuvieron los siguientes resultados; para la cinemática directa:

$$\begin{Bmatrix} \text{Px} \\ \text{Py} \\ -\text{Pz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2.4431\text{ cm} \\ 7.7645\text{ cm} \\ -41.3493\text{ cm} \end{Bmatrix}$$

Para la cinemática inversa se obtuvieron los siguientes resultados con dos soluciones para $\theta_{11}$:

$$\theta = \begin{bmatrix} 50.0023°, 42.9207° & 46.0502°, 44.6513° & 65.2075°, 30.4381° \\ 80.00° & 81.3519° & 76.2670° \\ 75.00° & 101.5331° & 93.3758° \end{bmatrix}$$

Para establecer los valores de la solución práctica para $\theta_{11}$ es necesario realizar un modelado estructural en el cual se visualicen los valores determinados en el ejemplo numérico.

## 4. MODELO ESTRUCTURAL-VIRTUAL PARA UN ROBOT O MANIPULADOR TIPO DELTA.

Se realizó un modelo virtual de la estructura del robot tipo delta en el *Solidworks*™ utilizando el mismo dimensionamiento geométrico y posición de la cadena cinemática 1 que el utilizado en el ejemplo numérico como se muestra en las figuras 6 y 7, para posteriormente realizar el modelado de las dos cadenas restantes; con las longitudes iguales a la cadena 1 y con la orientación determinada por el punto P establecido por la orientación de la cadena cinemática 1. Posteriormente se procedió a medir todos los ángulos de la cinemática inversa para las tres cadenas cinemáticas obteniendo los resultados mostrados en las figuras 8, 9 y 10.
Con lo cual fue posible determinar las coordenadas del punto P respecto al punto O es decir, cinemática directa;

$$\begin{Bmatrix} \text{Px} \\ \text{Py} \\ -\text{Pz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2.5816\text{ cm} \\ 7.7645\text{ cm} \\ -41.4648\text{ cm} \end{Bmatrix}$$

De las figuras 8, 9, y 10 es posible determinar los valores de la cinemática inversa para las tres cadenas, donde se observa que la matriz de la solución práctica de la cinemática inversa es;

ISSN en trámite

$$\theta = \begin{bmatrix} 50.00° & 45.1° & 65.52° \\ 80.00° & 81.1° & 75.86° \\ 75.00° & 101.77° & 93.37° \end{bmatrix}$$

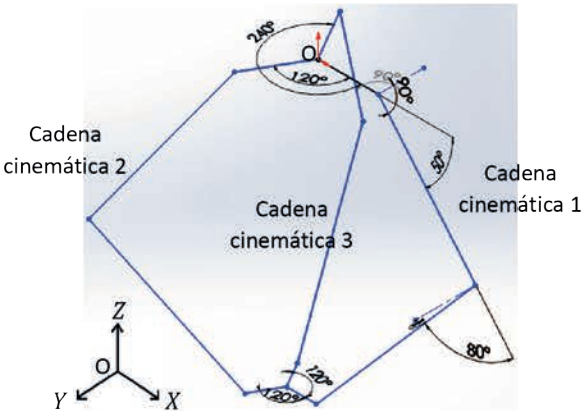



Fig. 6. Vista isométrica del modelo virtual.

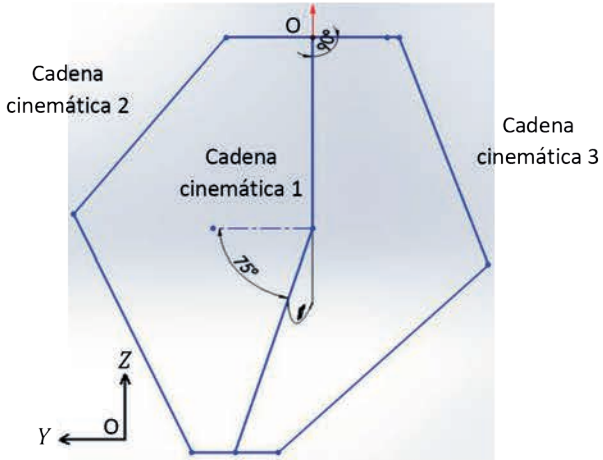



Fig. 7. Vista frontal del modelo virtual.

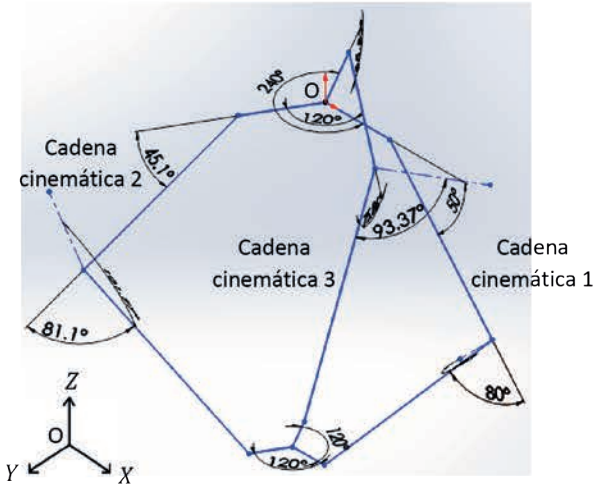



Fig. 8. Vista isométrica del modelo virtual con medidas.

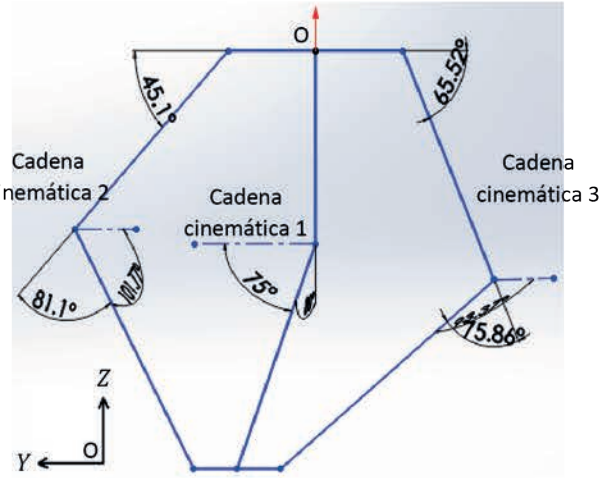



Fig. 9. Vista frontal del modelo virtual con medidas.

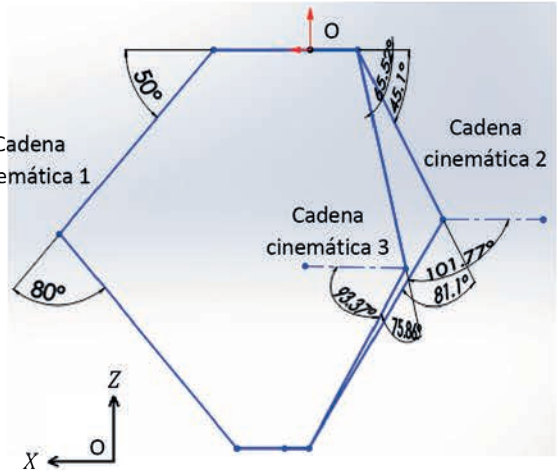



Fig. 10. Vista lateral del modelo virtual con medidas.

Al comparar la matriz obtenida en el análisis numérico con la matriz obtenida del modelo estructural virtual; es posible apreciar que se obtuvo un modelo cinemático funcional. También es apreciable que la ecuación para la solución práctica de la ecuación (38) quedaría escrita de la siguiente manera;

$$\theta_{(1,3)1} = 2 * \operatorname{atan}\left(\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}\right) \tag{39}$$

Para las cadenas cinemáticas 1 y 3, mientras que para la cadena cinemática número 2:

$$\theta_{21} = 2 * \operatorname{atan}\left(\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}\right) \tag{40}$$

Con lo cual se estable un sistema de ecuaciones funcional para determinar la cinemática inversa para robots y manipuladores paralelos tipo Delta.

 ISSN en trámite

## 5. CONCLUSIONES

En comparación con el modelo matemático de [6] en donde para $\theta_{i1}$ se tiene:

$$\theta_{i1} = 2 * \text{atan}\left(\frac{-B \ \pm\sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}\right)$$

Donde:

$$A = a + b\, sin\theta_{i3} \cos\theta_{i2} + bsin\theta_{i3} \sin\theta_{i2} + b\cos\theta_{i3} + \ C_x + C_y + C_z$$
$$B = 2(a - b\, sin\theta_{i3} sin\theta_{i2} + b\, sin\theta_{i3} cos\theta_{i2})$$
$$C = a + b\, sin\theta_{i3} \cos\theta_{i2} + bsin\theta_{i3} \sin\theta_{i2} + b\cos\theta_{i3}$$

Es posible apreciar que se obtuvo equivalencias más breves para las incógnitas A, B y C de las ecuaciones (39) y (40).

También al comparar el modelo matemático utilizado en [7] el cual plantea una orientación para el robot tipo Delta como se muestra en la figura 11 igual a la planteada en la presente investigación; se aprecia que para la ecuación del par activo se obtuvo la siguiente ecuación:

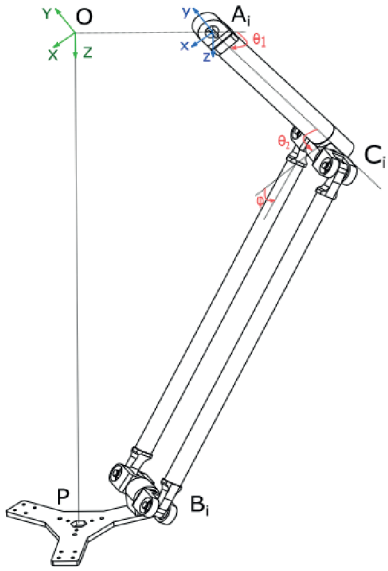



Fig. 11. Nomenclatura para las cadenas cinemáticas del robot tipo delta [7].

$$\theta_1 = 2 * tan^{-1}\, t$$

Donde:

$$t = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$a = (Q_x + l_1)^2 + Q_z^2 - (l_2 \sin\varphi)^2$$
$$b = -4l_1 Q_z$$
$$c = (Q_x - l_1)^2 + Q_z^2 - (l_2 \sin\varphi)^2$$

$$\varphi = cos^{-1}\left({Q_y}/{l_2}\right)$$

Siendo $\bar{Q}$ el vector que conecta el par pasivo con el par activo conectado al efector final, donde $Q_x, Q_y$ y $Q_z$ son las componentes del mismo vector y respectivamente iguales a $C_x$, $C_y$ y $C_z$ de la presente investigación.

Con el mismo dimensionamiento que el modelo estructural virtual se realizó un ejemplo numérico del modelo cinemático presentado en [7] para comparar los resultados del mismo con los obtenidos en la presente investigación, obteniendo los siguientes resultados para la ecuación del par cinemático activo:

$$\theta_{i1} = [-49.9999^\circ \quad -44.6569^\circ \quad -65.2073^\circ]$$

Donde se puede apreciar que el modelo matemático desarrollado en esta investigación es tan fiable como otros modelos presentados en la literatura. Como contribución de la presente investigación; destaca la brevedad y poca complejidad de las componentes de las ecuaciones (39) y (40), determinadas del replanteamiento de la cinemática inversa lo cual en teoría podría reducir el error de redondeo de análisis posteriores como los análisis cinemáticos de un orden mayor o el análisis dinámico y se podría obtener "ligeras" ecuaciones de control o simulación.

## REFERENCIAS

[1] Gallardo, J., Rodríguez, R., Pérez, L., Aguilar, C., 2013, "Análisis cinemático de un manipulador paralelo plano mediante la teoría de tornillos infinitesimales", Cientifica, vol. 17, núm. 4, pp. 159-169.

[2] Clavel, R., 1988, *"Delta: a Fast Robot with Parallel Geometry", Proceedings of the 18th Int. Symposium on Industrial Robot, Lausanne*, pp. 91-100.

[3] Sanchez, R., Gonzáles, J., Castillo, E., Balmaceda, A., 2015, "Análisis del desempeño cinetostático de un robot paralelo tipo Delta reconfigurable", Ingeniería Investigación y Tecnología, vol. 16, núm. 2, pp. 213-224.

[4] J.P. Merlet, *"Parallel Robots"*, (Second edition) Netherlands, Springer (2006).

[5] Ruiz, N., Blanco, A., Abúndez, Colin, J., Alcocer, W., 2019, *"Dynamic analysis and control of a three-revolute-prismatic-spherical parallel robot by algebraic parameters identification"*, International Journal of advanced robotic systems, pp. 1-12.

[6] Gudiño, J., Narrarro, H., Alcalá, J., Charre, S., 2017, "Diseño de un robot delta y su análisis cinemático", Revista de Aplicación Cientifica y Tecnica, vol. 3, núm. 8, pp. 13-23.

[7] Faraz, A., Mohammad, A., Mehdi, T., 2019, *"Kinematic and Dynamic Analysis of 3-DOF Delta Parallel Robot Based on the Screw Theory and Principle of Virtual Work"*, 5th *Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation, Iran University of Science and Technology*, Tehran, Iran.

 ISSN en trámite

# Estudio del efecto de la concentración de nanopartículas de óxido-metálicos sobre la transferencia de calor por convección natural en un nanofluido

**Thania Lima-Téllez*, I. Hernández-López*, J.F. Hinojosa***

**Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, CP 83000 (e-mail: **a220230038**@unison.mx).*

**Resumen:** Se presenta el estudio de la transferencia de calor por convección natural turbulenta en una cavidad con un nanofluido compuesto por un óxido metálico y agua pura. Se analiza el efecto del número de Rayleigh y de la concentración de nanopartículas. El modelo matemático del sistema bajo estudio se resolvió mediante la dinámica de fluidos computacionales a través del software Ansys Fluent. El modelo de simulación se verificó con datos experimentales de la literatura y se obtuvo buena concordancia. En los resultados obtenidos se observó que el uso de nanopartículas de $Al_2O_3$ incrementa hasta en 15% la transferencia de calor del sistema en comparación al agua pura. Adicionalmente se encontró que el uso de nanopartículas de CuO aumenta la transferencia de calor en 2 % con respecto al uso de $Al_2O_3$. Con relación al efecto de la concentración, se encontró que conforme ésta incrementa, el número de Nusselt disminuye. Finalmente, al incrementar el tamaño de la nanopartícula de 10 nm a 55 nm se incrementó 4 % la transferencia de calor en la cavidad.

*Palabras clave:* transferencia de calor convectiva, convección natural, nanofluidos, nanopartículas

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, científicos se encuentran trabajando en la mejora de las propiedades termofisicas de los fluidos convencionales, tales como el agua, el aceite o el glicol. La mejora de estos fluidos ayudaría a eficientar sistemas electromecánicos que requieren algún tipo de refrigeración, tal como son sistemas fotovoltaicos (PVT), colectores solares, equipos electrónicos e incluso para la refrigeración de motores y de edificaciones. Gracias al avance de la nanotecnología, se observó que la mejora de estos fluidos podría lograrse al agregar nanopartículas de algún elemento altamente conductivo al fluido convencional, a este nuevo fluido se le conoce como nanofluido. Un nanofluido puede estar conformado por nanopartículas metálicas (Ag, Au, Fe, Ti), oxido metálicas ($Al_2O_3$, $Fe_3O_4$, $SiO_2$, $SnO_2$) y no metálicas como los carbonos y carburos.

Choi et al. (1995) fue el primero en introducir el termino nanofluido para hacer referencia a una estrategia para eficientar los fluidos convencionales, ya que, al agregar las nanopartículas, incluso en concentraciones muy bajas, el fluido base mejora sus propiedades termofisicas, en particular la conductividad térmica la cual es sumamente importante cuando se habla de incrementar la transferencia de calor en un sistema.

Xuan y Li (2000) estudiaron de forma experimental el comportamiento de la conductividad térmica de un nanofluido compuesto por Cu-$H_2O$, los autores encontraron que la conductividad térmica de los nanofluidos incrementa notablemente cuando incrementa la concentración de nanopartículas, tendiendo que la relación de conductividad térmica varia de 1.24 a 1.78 para una concentración de 2.5 % a 7.5 %, respectivamente. Posteriormente Eastman et al. (2001) evaluaron el comportamiento de un nanofluido compuesto por Cu-etilenglicol, los resultados mostraron que la conductividad térmica del nanofluido aumento hasta en un 40 % cuando la concentración es de 0.3%.

De acuerdo con la literatura, la mejora de las propiedades termofísicas es indiscutible, es por eso, que diversos autores se encuentran trabajando en el estudio de la transferencia de calor por convección de nanofluidos, tal es el caso de Rashimi et al. (2011) quienes estudiaron numéricamente la transferencia de calor por convección natural en una cavidad calentada diferencialmente con nanofluidos ($Al_2O_3$-$H_2O$). El estudio lo realizaron empleando la dinámica de fluidos computacionales (CFD) bajo régimen de flujo laminar. Los autores realizaron simulaciones para diferentes concentraciones (0, 1% y 4%) para tres números de Rayleigh diferentes, correspondientes a tres temperaturas diferentes 310 K, 329 K, 345 K en la pared caliente y una temperatura constante de 285 K en la pared fría. De los resultados los autores obtuvieron que el número de Nusselt disminuye con el aumento de la fracción volumétrica de nanopartículas, concluyendo que esto es resultado de la baja velocidad del flujo en convección natural bajo un régimen laminar.

Heyhat et al. (2012) estudiaron de forma experimental la transferencia de calor por convección forzada en un tubo con nanofluidos compuestos por $Al_2O_3$-$H_2O$, los autores variaron la concentración de 0.1 % a 2 % en volumen y de los resultados obtuvieron que el coeficiente de transferencia de calor de los

 ISSN en trámite

nanofluidos aumenta en un 23 % cuando el volumen de concentración es 2 % con respecto al agua pura.

Hadi et al. (2016) estudiaron experimentalmente la transferencia de calor natural en una cavidad calentada diferencialmente llena de nanofluidos ($Al_2O_3$-$H_2O$) bajo régimen de flujo turbulento. Los autores estudiaron a detalle el efecto de variar la concentración de las nanopartículas en el coeficiente de transferencia de calor por convección natural. Los autores encontraron que al agregar nanopartículas al fluido base mejora el coeficiente de transferencia de calor hasta en un 15 % para 0.1%, sin embargo, un mayor aumento de la concentración deteriora el coeficiente de transferencia de calor por convección natural.

Más tarde Zeinali et al. (2020) continuaron con el estudio de la transferencia de calor por convección en nanofluidos con nanotubos de carbono (MWCNTs/$H_2O$) en una cavidad inclinada calentada diferencialmente, para el estudio variaron el ángulo de inclinación (0°, 45°, 90°) y estudiaron su efecto. Adicionalmente los autores variaron la concentración volumétrica (0.005, 0.05, 1%) de las nanopartículas y los autores encontraron que aumentar la concentración de MWCNTs tiene mayor impacto en la transferencia de calor que aumentar el número de Rayleigh. Además, observaron que la transferencia de calor por convección natural incremento al reducir el ángulo de inclinación de 90° a 0°, concluyendo que cambiar el ángulo de inclinación no tiene una influencia notable en el número de Nusselt para números de Rayleigh pequeños.

En años recientes diversos autores, se han encargado del estudio de las aplicaciones de los nanofluidos en sistemas de enfriamiento, tal es el caso de Hossain et al. (2022) quienes realizaron una revisión extensa de la aplicación de estos nuevos fluidos en sistemas PVT, donde concluyen que el uso de los nanofluidos mejora significativamente las eficiencias generales y las características de transferencia de calor en los sistemas.

De acuerdo con la literatura los nanofluidos demostraron ser de gran utilidad para incrementar la transferencia de calor en un sistema, sin embargo, en convección natural se observa que para altas concentraciones el coeficiente de transferencia de calor disminuye, es por eso por lo que es importante seguir estudiando este fenómeno, así como probar distintos nanofluidos e incluso variar el tamaño de las nanopartículas.

## 2. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

La Figura 1 muestra el modelo físico de una cavidad cuadrada llena de un nanofluido compuesto de nanopartículas de elementos óxidos metálicos con una base en agua. Las paredes verticales de la cavidad se encuentran a diferentes temperaturas siendo $T_H > T_L$, mientras, que las paredes horizontales están aisladas.

El modelo considera transferencia de calor por convección natural bajo régimen de flujo turbulento, considerando un Rayleigh en un intervalo de $3.49\times 10^8$ a $1.05\times 10^9$.

### 2.1 Modelo de matemático de una cavidad con nanofluidos

Para modelar la transferencia de calor por convección natural en una cavidad con nanofluidos se empleó la dinámica de fluidos computacionales mediante el software de CFD ANSYS Fluent.

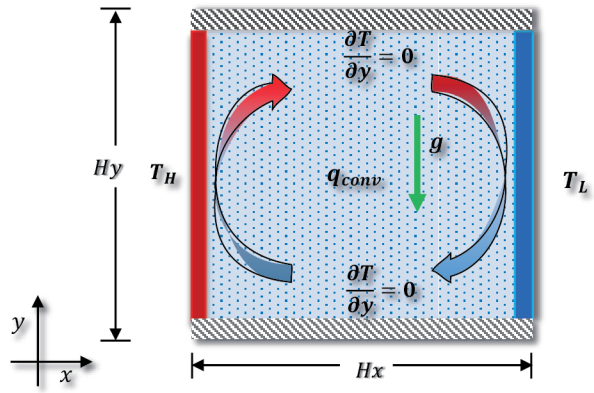



Figura 1. Modelo físico de una cavidad cuadrada con nanofluidos.

Las ecuaciones gobernantes del modelo matemático se encuentran representadas por las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía, las cuales para un nanofluido se describen de la siguiente forma:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial\left(\rho_{nf} u_i\right)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

Ecuación de conservación de momentum:

$$\frac{\partial\left(\rho_{nf} u_i u_j\right)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{nf}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) - \rho_{nf}\overline{u_i' u_j'}\right] - \rho_{nf} g_i \beta\left(T - T_0\right) \tag{2}$$

Ecuación de conservación de energía:

$$\frac{\partial\left(\rho_{nf} u_i T\right)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\frac{k_{nf}}{C_{p_{nf}}}\frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho_{nf}\overline{u_i' T'}\right] \tag{3}$$

donde: $\rho_{nf}$, $Cp_{nf}$, $\mu_{nf}$, $k_{nf}$, son propiedades correspondientes al nanofluido. Para modelar el flujo turbulento se utilizó el modelo de turbulencia $k$-$\omega$, utilizando el esquema SIMPLEC para el acoplamiento presión-velocidad y se empleó el esquema Presto para la presión. Para la solución del modelo matemático en estado permanente se utilizó el método de Gauss-Seidel y el criterio de convergencia para todas las variables fue de $1\times 10^{-6}$. El diagrama de flujo de la solución numérica se puede observar en la Figura 2.

 ISSN en trámite

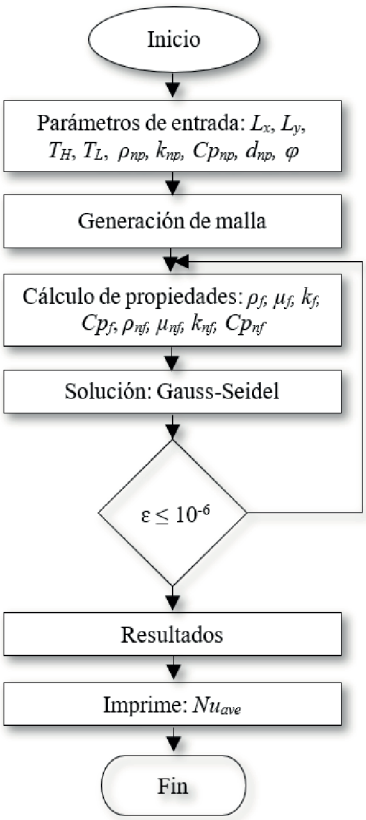



Figura 2. Diagrama de flujo de la solución numérica.

## 3. PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE NANOFLUIDOS ÓXIDOS METÁLICOS

Como se mencionó anteriormente el nanofluido está compuesto de un fluido base y nanopartículas de un elemento oxido metálico. Las propiedades del fluido base ($H_2O$), se obtienen de correlaciones reportadas en la literatura, estas correlaciones son válidas para un rango de temperatura baja de 274.15 K a 372.15 K. (Nasef et al. 2019).

$$\rho_f = a + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 \tag{4}$$

$$\mu_f = \exp\left[-a - \left(\frac{a_1}{T}\right) + \left(\frac{a_2}{T}\right)^2\right] * 10^{-3} \tag{5}$$

$$k_f = a + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 \tag{6}$$

$$Cp_f = a + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 \tag{7}$$

Tabla 1. Coeficientes para las Ecuaciones 4-7

| $i$ | $Pf$ (kg/m$^3$) | $\mu f$ (Kg/m. s) | $kf$ (W/m K) | $Cpf$ (J/kg K) |
|---|---|---|---|---|
| 0 | -1043.853 | -1.6 | -1.240 | 31844.511 |
| 1 | 22.84 | 1150 | $1.260\times10^{-2}$ | -326.966 |
| 2 | $-9.437\times10^{-2}$ | 690 | $-2.738\times10^{-5}$ | 1.453 |
| 3 | $1.730\times10^{-4}$ | --- | $1.980\times10^{-8}$ | $-2881\times10^{-3}$ |
| 4 | $-1.223\times10^{-7}$ | --- | ---- | $2.154\times10^{-6}$ |

Por otro lado, las propiedades del nanofluido se calculan en función de la temperatura y la concentración de volumen de las nanopartículas.
La densidad del nanofluido es determinado como:

$$\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_{np} \tag{8}$$

Donde $\varphi$ es la concentración de volumen de nanopartículas en el fluido base, mientras que $\rho_{np}$ y $\rho_f$ son las densidades de las nanopartículas y el agua, respectivamente.

La viscosidad del nanofluido se determina como:

$$\mu_{nf} = (1+2.5\varphi)\mu_f \qquad \varphi < 0.05 \tag{9}$$
$$\mu_{nf} = (1+2.5\varphi+6.5\varphi^2)\mu_f \qquad 0.05 < \varphi < 0.1$$

Donde $\mu_f$ es la viscosidad del fluido base (agua).

El calor específico del nanofluido es un promedio del fluido base y las nanopartículas:

$$Cp_{nf} = \frac{(1-\varphi)\rho_f Cp_f + \varphi\rho_{np} Cp_{np}}{\rho_{nf}} \tag{10}$$

Donde $Cp_f$, y $Cp_{np}$ son el calor específico del fluido y de las nanopartículas, respectivamente.

Existen diferentes modelos para estimar la conductividad térmica efectiva de los nanofluidos, algunos son más complicados que otros. La complejidad de estos modelos depende de los factores que consideran. Sin embargo, la mayoría de ellos consideran los efectos de la concentración de nanopartículas, las conductividades térmicas del fluido base y de las nanopartículas, así como la forma de estas, (Khanjari et al 2016). Para el caso de nanopartículas óxido-metálicas se tiene el modelo dinámico de la conductividad térmica (Ecuación 11), en el cual se considera el efecto estático y el efecto del movimiento aleatorio de las nanopartículas, a este efecto se le conoce como “micro-mezcla”.

$$k_{nf} = k_{static} + k_{brownian} \tag{11}$$

$$k_{static} = k_f \frac{(k_{np}+2k_f) - 2\varphi(k_f - k_{np})}{(k_{np}+2k_f) + \varphi(k_f - k_{np})} \tag{12}$$

$$k_{brownian} = A_1\sqrt{T}\,(A_2 T + A_3) \tag{13}$$

donde:

 ISSN en trámite

$$A_1 = 5*10^4 \beta\varphi\rho_f Cp_f \sqrt{\frac{K_B}{d_{np}\rho_{np}}}$$

$$A_2 = \frac{-2.8217*10^{-2}\varphi + 3.917*10^{-3}}{273}$$

$$A_3 = 3.0669*10^2\varphi - 3.91123*10^{-3}$$

$$\beta_{Al_2O_3} = 8.4407(100\varphi)^{-1.07304}$$

Con la finalidad de que estas correlaciones sean validadas, se calcularon las propiedades termofísicas para el nanofluido compuesto por $Al_2O_3$-$H_2O$. En la Tabla 3 se observan las propiedades termofísicas para las nanopartículas de $Al_2O_3$ y CuO.

Tabla 3. Propiedades termofísicas para las nanopartículas de $Al_2O_3$ (Ho et al. 2010).

| Propiedad | $Al_2O_3$ | $CuO$ |
|---|---|---|
| $\rho_{np}$ (kg/m$^3$) | 3950 | 6400 |
| $k_{np}$ (W/m K) | 40 | 76.5 |
| $Cp_{np}$ (J/kg K) | 765 | 535.6 |

En la Tabla 4 se observa la validación de las propiedades termofísicas del nanofluido compuesto de $Al_2O_3$, se observa que los datos son muy similares a los proporcionados por Khanjari et al. 2016, ya que la diferencia máxima encontrada fue de 1.8 %.
Considerando que el modelo matemático se resolverá en el software Ansys Fluent y este no cuenta con las propiedades para modelar nanofluidos, fue necesario crear subrutinas en lenguaje de programación C y agregarlas como funciones de usuario (UDF) al software.

Tabla 4. Validación de las correlaciones para las propiedades termofísicas del nanofluido compuesto por óxidos metálicos.

| $\phi$ (%) | P. estudio $\rho f$ (kg/m$^3$) | P. estudio $kf$ (W/m K) | P. estudio $Cpf$ (J/kg K) | P. estudio $\mu f$ (Kg/m. s) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1020 (0.1 %) | 0.687 (1.2 %) | 4050 (0.08 %) | 6.77E-04 (0.3%) |
| 2 | 1050 (0.1 %) | 0.700 (1.4 %) | 3924 (0.08 %) | 6.93E-04 (0.1%) |
| 3 | 1080 (0.1 %) | 0.716 (1.4 %) | 3806 (0.08 %) | 7.10E-04 (0.2 %) |
| 4 | 1109 (0.1 %) | 0.730 (1.8 %) | 3694 (0.07 %) | 7.26E-04 (0.1 %) |
| 5 | 1139 (0.1 %) | 0.757 (0.5 %) | 3587 (0.07 %) | 7.54E-04 (1.2 %) |

*Los valores en ( ) corresponden a la diferencia porcentual.

## 4. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Para verificar el modelo de solución se replicaron los resultados presentados por Hadi et al. 2016, quienes resolvieron de forma experimental la transferencia de calor en una cavidad calentada diferencialmente llena de nanofluidos compuestos por nanopartículas de alúmina y agua pura ($Al_2O_3$-$H_2O$), las nanopartículas tienen 30 nm de diámetro. En la Figura 3 se observan los resultados del Nusselt promedio contra el número de Rayleigh para la cavidad con únicamente agua. Los resultados se compararon con la predicción matemática del Nusselt promedio de Cioni et al. 1996 y Berkovsky 1977, observándose que los datos numéricos se encuentran entre los datos de ambos resultados teóricos, mientras que con respecto a la comparación experimental los datos son muy similares.

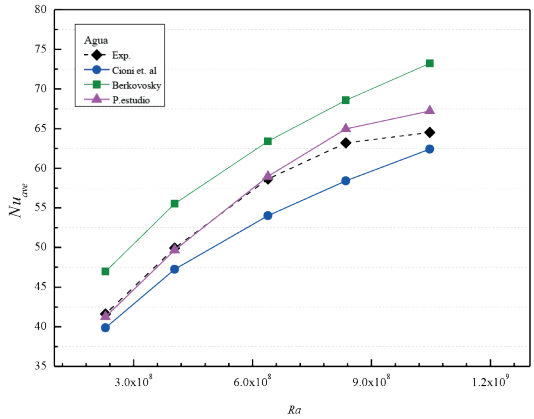



Figura 3. Validación y verificación del número de $Nusselt_{ave}$ para la cavidad con agua pura.

En la Figura 4 se observa el comportamiento del número de Nusselt promedio para la cavidad con nanofluidos $Al_2O_3$-$H_2O$, con una concetraciòn de 0.1% en peso, se observa que los resultados obtenidos del presente estudio son muy similares a los datos experimentales reportados en la literatura, ademas se observa que al agregar nanoparticulas al agua pura se incrementa el nùmero de Nusselt considerablemente.

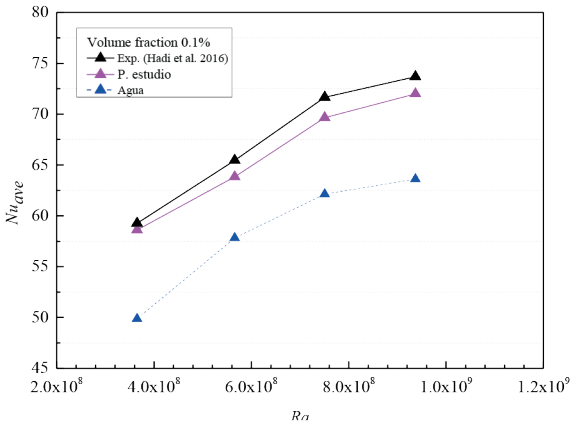



Figura 4. Validación del número de $Nusselt_{ave}$ para la cavidad con nanofluido $Al_2O_3$ –$H_2O$ al 0.1%

Adicionalmente en la Tabla 5 se presenta la comparación cuantitativa de emplear un nanofluido y agua pura en la transferencia de calor por convección natural, para diferentes números de Rayleigh y dos concentraciones. En la Tabla 5 se

 ISSN en trámite

observa que el nanofluido con una concentración del 0.1% obtuvo el número de Nusselt más alto para todos los números de Rayleigh, siendo 15.23 % mejor que el agua pura.

Tabla 5. Comparación cuantitativa del número de Nusselt para $Al_2O_3$- $H_2O$ y $H_2O$

| *Ra* | $Nu_{ave}$ $Al_2O_3$ $\varphi = 0.1\%$ | *Ra* | $Nu_{ave}$ $Al_2O_3$ $\varphi = 0.2\%$ |
|---|---|---|---|
| 3.65E+08 | 58.61 (15.23 %) | 3.61E+08 | 56.18 (11.32 %) |
| 5.66E+08 | 63.82 (9.39 %) | 5.69E+08 | 63.89 (9.05 %) |
| 7.51E+08 | 69.64 (10.79 %) | 7.23E+08 | 68.67 (9.99 %) |
| 9.37E+08 | 71.99 (11.63 %) | 9.10E+08 | 71.35 (11.05 %) |

*Los valores en ( ) corresponden a la diferencia porcentual.

## 4. RESULTADOS

Se realizo un estudio numérico de la transferencia de calor por convección natural en una cavidad llena de nanofluidos compuestos por nanopartículas óxido metálicas (CuO y $Al_2O_3$) con una base en agua pura ($H_2O$), esto para diferentes números de Rayleigh, adicionalmente, se estudio el efecto de variar la concentración del nanofluido, así como el tamaño de la nanopartícula. En la Figura 5 se presenta el comportamiento del número de Nusselt con respecto al Rayleigh para para dos tipos de nanofluidos CuO-$H_2O$ y $Al_2O_3$-$H_2O$, así como su respectiva comparación con el agua pura, en ambos nanofluidos se consideraron nanopartículas de 30 nm de diámetro y una concentración de 0.1 %. En la Figura 5 se observa como ambos nanofluidos mejoran la transferencia de calor por convección, sin embargo, el nanofluido compuesto por CuO presenta mejor comportamiento que el nanofluido compuesto de $Al_2O_3$.

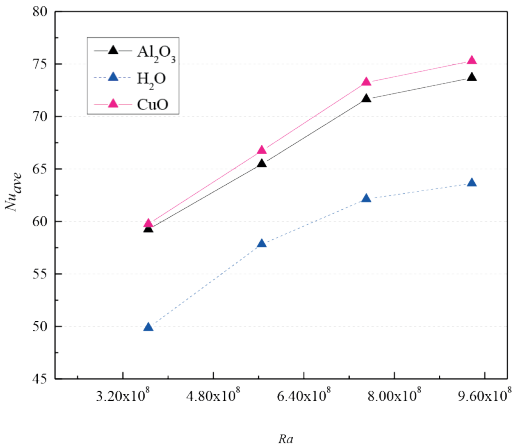



Figura 5. Comparación del número de $Nusselt_{ave}$ para la cavidad con nanofluidos Óxido-metálicos al 0.1%.

De manera cuantitativa en la Tabla 6 se observa que para todos los números de Rayleigh el nanofluido CuO-$H_2O$ es mejor que el nanofluido $Al_2O_3$-$H_2O$, teniendo una mejora de la transferencia de calor en la cavidad del 2.22 %, esta mejora se atribuye a las propiedades termofísicas de las nanopartículas de CuO, particularmente a su conductividad térmica.

Tabla 6. Comparación cuantitativa del número de $Nusselt_{ave}$ para la cavidad con nanofluidos Óxido-metálicos.

| Ra | $Nu_{ave}$ $Al_2O_3$ $\varphi = 0.1$ % | $Nu_{ave}$ CuO $\varphi = 0.1$ % | Dif. % |
|---|---|---|---|
| 3.65E+08 | 59.25 | 59.76 | 0.85 |
| 5.66E+08 | 65.46 | 66.73 | 1.95 |
| 7.51E+08 | 71.66 | 73.24 | 2.22 |
| 9.37E+08 | 73.68 | 75.29 | 2.18 |

En la Figura 6 se observa la comparación del número de Nusselt para diferentes concentraciones para el nanofluido compuesto de nanopartículas de CuO con 30 nm de diámetro. Se observa que conforme incremental el Rayleigh el número de Nusselt incrementa. Sin embargo, al aumentar la concentración de 0.1% a 1.0 %, la transferencia de calor disminuye, por lo tanto, el número de Nusselt decrece 1.8 %. Este comportamiento es originado debido al incremento de la viscosidad originado por el aumento de la concentración adicionado con las bajas velocidades que se presentan en convección natural.

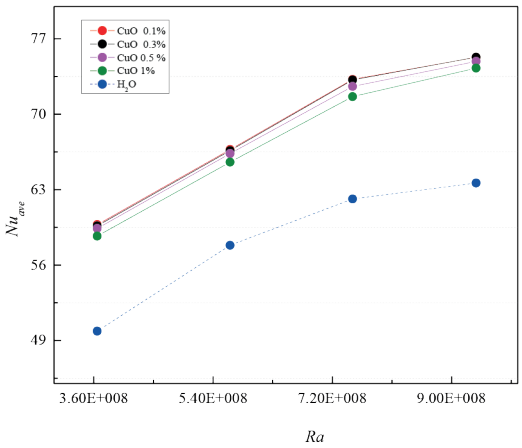



Figura 6. Variación de la concentración de nanopartículas de CuO en el fluido base.

En la Figura 7. Se presenta el comportamiento del número del Nusselt con respecto al incremento del tamaño de la nanopartícula de CuO. En la Figura 7 se observa que conforme incrementa el tamaño de la nanopartícula de 10 nm a 50 nm el número de Nusselt aumenta, esto debido a que al incrementar el diámetro de la nanopartícula se incrementa el área de contacto de transferencia de calor, ocasionando así un incremento en la conductividad térmica del nanofluido y por consecuencia un incremento en la transferencia de calor por convección en la

 ISSN en trámite

cavidad, adicionalmente, se observa un comportamiento hiperbólico con tendencia asintótica.

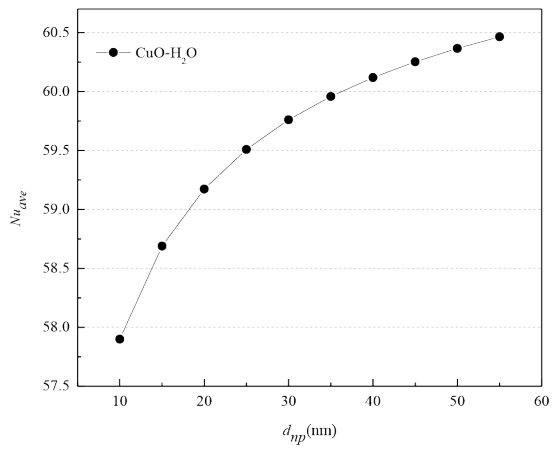



Figura 7. Comportamiento del Número de Nusselt con respecto al incremento del tamaño de la nanopartícula.

## 5. CONCLUSIONES

Se analizó la transferencia de calor por convección natural en nanofluidos óxido-metálicos contenidos en una cavidad calentada diferencialmente. Para el estudio se estudiaron dos tipos de nanofluidos CuO-$H_2O$ y $Al_2O_3$-$H_2O$, adicionalmente se probaron diferentes concentraciones, así como diferentes tamaños de nanopartículas. Con base en los resultados se puede concluir lo siguiente:

- El implementar nanofluidos para incrementar la transferencia de calor en un sistema, es recomendable, ya que se encontró que el nanofluido puede mejorar hasta en 15 % la transferencia de calor por convección natural con respecto a solo utilizar fluidos convencionales como es el agua pura.
- De la comparación de los nanofluidos CuO-$H_2O$ y $Al_2O_3$-$H_2O$, se encontró que, el nanofluido compuesto por nanopartículas de CuO es hasta 2% mejor que el nanofluido compuesto de $Al_2O_3$, esto debido a sus propiedades termofísicas, particularmente a la alta conductividad térmica de las nanopartículas de CuO.
- Se analizó el efecto de variar la concentración de las nanopartículas (30 nm) de CuO en el fluido base de 0.1% a 1%, encontrado que, conforme se incrementa la concentración, la transferencia de calor por convección natural decrece, observándose en la disminución del número adimensional Nusselt, esto puede atribuirse a las bajas velocidades que se presentan en convección natural, por otro lado, el incrementar el tamaño de la nanopartícula mejora la transferencia de calor por convección natural en el nanofluido, esto se atribuye al incremento de la conductividad térmica.

Como conclusión general, se puede afirmar que los nanofluidos tienen potencial para ser empleados como sustitutos en sistemas que utilicen fluidos convencionales para mejorar la transferencia de calor.

## NOMENCLATURA

| | |
|---|---|
| $k_B$ | Constante de Boltzmann [J/K] |
| $d_{np}$ | Tamaño de la nanopartícula [nm] |
| $T$ | Temperatura [K] |
| $Al_2O_3$ | Óxido de aluminio |
| CuO | Óxido de cobre |
| $Nu_{ave}$ | Nusselt promedio |
| $Ra$ | Número de Rayleigh |

## REFERENCIAS

1. Lee S, Choi SUS, Li S, Eastman JA (1999) Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. ASME J Heat Transf 121:280–289
2. Rashimi W., Ismail M., Khalid M., Faridah., CFD studies on natural convection heat transfer of Al2O3-water nanofluids. Heat Mass Transfer (2011) 47:1301–1310
3. M.M. Heyhat, F. Kowsary, A.M. Rashidi, S. Alem Varzane Esfehani, A. Amrollahi, Experimental investigation of turbulent flow and convective heat transfer characteristics of alumina water nanofluids in fully developed flowregime, Int. Commun. Heat Mass Transfer.39(2012)1272–1278,
4. Hadi G., Mohsen S., Petrus J. Experimental investigation on cavity flow natural convection of Al2O3-Water nanofluids. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2016, 316-324.
5. Zeinali S., Samadzadeh A., Hashim I. An experimental investigation on natural convection of non-covalently functionalized MWCNTs nanofluids: Effects of aspect ratio and inclination angle. International Communications in Heat and Mass Transfer 111 (2020) 104473
6. Hossain F., Rezwanul Md., Bhuiyan A., A review on recent advancements of the usage of nano fluid in hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar systems. Renewable Energy. 2022, 114-131.
7. Nasef H.., Nada S., Hassan H., Integrative passive and active cooling system using PCM and nanofluid for thermal regulation of concentrated photovoltaic solar cells. Energy Conversión and Management 2019:199, 112065.
8. Khanjari Y, Pourfayaz F, Kasaeian AB. Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system. Energy Convers. Manag 2016: 123: 263–278.
9. S. Cioni, S. Ciliberto, J. Sommeria, Experimental study of high-Rayleigh-number convection in mercury and water, Dyn. Atmos. Oceans 24 (1996) 117–127.
10. B. Berkovsky, V. Polevikov, Numerical Study of Problems on High-intensive FreeConvection, Proceedings of International Turbulent Buoyant Convection Seminar 1977.
11. Xuan Y, Li Q (2000) Heat transfer enhancement of nanofluids. Int J Heat Fluid Flow 21:58–64
12. Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thompson LJ (2001) Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nano-fluids containing copper nano-particles.

 ISSN en trámite

# Controlador Robusto GPI para un Actuador Elástico en Serie

**N.C. Ruiz-Hidalgo*, A. Blanco-Ortega*, A. Magadán-Salazar*, M. Román-Sedeño**, A. Martínez Mata*, M. A. García-Velarde***

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Av. Palmira SN, 62490 México (Tel: (01)777-362-7770; e-mail: andres.bo@cenidet.tecnm.mx).*
***Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cuautla, Libramiento Cuautla-Oaxaca S/N Juan Morales, 62745 (e- moises.roman@cuautla.tecnm.mx)*

**Abstract:** En el diseño de sistemas robóticos como exoesqueletos, órtesis y prótesis un componente importante es el sistema de actuación. Los actuadores generalmente tienen un comportamiento rígido, que en muchas ocasiones no es conveniente para ciertas aplicaciones. El actuador elástico en serie (AES) es una opción que ayuda a reducir las fuerzas de reacción para los sistemas de transmisión acoplados al motor, permitiendo un efecto de filtro pasa bajas para cargas de impacto. Por lo que, son una opción viable en varias aplicaciones de sistemas robóticos. En este artículo se propone un controlador GPI robusto para el seguimiento de trayectorias ante perturbaciones variables. Se presentan resultados de simulación, con un prototipo virtual en el entorno de MSC Adams y en co-simulación con Matlab Simulink, que muestran el desempeño del controlador para el seguimiento de trayectorias ante perturbaciones.

*Keywords:* Actuador elástico en serie, GPI control, MSC ADAMS.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de sistemas robóticos se tienen dos tendencias fundamentales de investigación, la tecnología de sensores y de actuadores (Tiboni et al., 2022). Los actuadores más comunes en aplicaciones robóticas transmiten fuerza mecánica a partir de energía neumática, hidráulica o eléctrica. Las características más comunes para la selección de actuadores en aplicaciones de robótica involucran aspectos como: densidad de fuerza, impedancia mecánica, ancho de banda de fuerza, rango dinámico, entre otras (Leal et al., 2016).

En aplicaciones como en el caminado con un exoesqueleto o una prótesis, se presentan impactos cuando la estructura rígida del exoesqueleto choca con la superficie, lo cual se vuelve más incómodo para el usuario si se tiene un actuador rígido. También, en la manipulación de sistemas robóticos (para extremidades superiores o inferiores) o exoesqueletos no se debe entorpecer el movimiento del usuario para mejorar la comodidad y la seguridad, por lo que, las juntas activas deben poder retroceder. En la solución de estos problemas se ha dado origen a diferentes sistemas de actuación, por ejemplo, actuadores elásticos en serie (AES), actuadores de rigidez variable (VSA), actuadores elásticos en paralelo (PEA) y actuadores elásticos en serie magnetorreológicos (MRSEA).

A mediados de la década de 1990, Pratt y Williamson propusieron el concepto de Actuador Elástico en Serie (AES) (Pratt y Williamson, 1995) con el objetivo de ofrecer un sistema de accionamiento para la transmisión de fuerzas y movimientos en aplicaciones de robótica humanoide y vehículos de exploración. El principio de funcionamiento estaba basado en un ensamble motor-reductor conectado en serie con un elemento elástico pasivo (representado por un resorte) que a su vez se acopla con la carga a accionar. Esta configuración básica se presenta en la Figura 1.

Fig. 1. Actuador elástico en serie (AES)

Los AES tienen la característica de tener un control preciso de la fuerza a la salida obtenido en función de la deformación del resorte en serie; evitando así el uso de sensores costosos como celdas de carga que además no son tolerantes ante determinadas fuerzas de impacto, mejorando la interacción humano-robot.

Los actuadores elásticos en serie (SEA) tienen varias ventajas mecánicas sobre los actuadores convencionales rígidos y sin retroceso, por ejemplo, menor inercia reflejada en la salida, mayor tolerancia a impactos, medición de fuerza de bajo costo, almacenamiento de energía, seguridad, etc. (Sariyildiz et al., 2017).

El control de fuerza en los AES está basado en el registro de la deformación del resorte en serie a partir de la ley de Hooke. Por lo que es un reto el sistema de control en un AES para

 ISSN en trámite

lograr el objetivo en las aplicaciones de sistemas robóticos. Por ejemplo, se han implementado estrategias de control en el uso de AES en aplicaciones de la marcha, como un controlador PID con separación de integral (Dong et al., 2022), un control de retroalimentación con conmutación basado en la ecuación de Riccati de propagación hacia adelante (FPRE) (Aguirre y Yu, 2021) y un controlador basado en planitud diferencial (Vázquez et al., 2019). Se implementó un controlador de movimiento de rechazo de perturbaciones activo unificado para los problemas de control de fuerza y posición mediante el uso de un observador de perturbaciones y planitud diferencial (Sariyildiz et al., 2017). En sistemas robóticos y órtesis de extremidades superiores o inferiores, para mejorar la interacción humano-robot con un AES, se han implementado diversos esquemas de control, desde controladores clásicos como el control PID (Casas et al., 2019) (Chen et al., 2019) hasta la implementación de controladores robustos, como el controlador LQR (Linear–quadratic regulator) sintonizado con PSO (Particle Swarm Optimization) (Ibrahim et al., 2022).

El controlador Proporcional Integral Generalizado (GPI) es una técnica para el diseño de controladores lineales que pueden rechazar diferentes tipos de perturbaciones de tipo polinomial, tales como: constantes, rampas, cuadráticas, etc. (Sira et al., 2008). Se introdujo el control GPI, dentro del contexto del control predictivo de sistemas diferencialmente planos (Flies et al., 2002).

El controlador GPI evita el uso explícito de los observadores de estado recurriendo a las reconstrucciones estructurales del estado sobre la base de integraciones iteradas de entradas y salidas. Para los sistemas dinámicos, se ignoran las condiciones iniciales y las perturbaciones desconocidas al agregar una combinación lineal adecuada de integrales iteradas del error de seguimiento de la salida (Sira et al., 2008).

La propiedad de planitud diferencial planteada en (Flies et al., 1995), (Sira et al., 2004), permite realizar la planeación y el seguimiento de trayectorias a partir de la definición de una salida plana del sistema a partir de su matriz de controlabilidad. Un sistema lineal es diferencialmente plano si todos los estados y entradas del sistema pueden ser expresadas a partir de las derivadas sucesivas de la salida plana (Sira et al., 2017). La planitud diferencial (planitud) es propiedad de algunos sistemas dinámicos controlados que permite trivializar las tareas de planificación de trayectoria, sin resolver ecuaciones diferenciales, mientras que simplifica el problema de diseño del controlador de retroalimentación a la de un conjunto de sistemas lineales invariantes en el tiempo desacoplados (Sira et al., 2008).

Las simulaciones realizadas para este trabajo representan parte del desarrollo subsiguiente en el estudio del modelado y control del AES. El primer acercamiento al modelo descrito en este trabajo fue presentado en (Lara et al., 2017) para simulaciones con trayectorias y perturbaciones armónicas.

## 2. ACTUADOR ELÁSTICO EN SERIE

### *2.1 Descripción del sistema*

En la Figura 2 se muestra el prototipo virtual del actuador elástico en serie. Este actuador está conformado por un servomotor con una transmisión de engranes acoplada a la salida con un tornillo de avance rápido. Una tuerca se desplaza en dirección longitudinal sobre el tornillo en función del sentido de giro del motor. A su vez, la tuerca está acoplada a través de resortes a un ensamble que representa el extremo móvil del actuador que estará en contacto con la carga a mover.

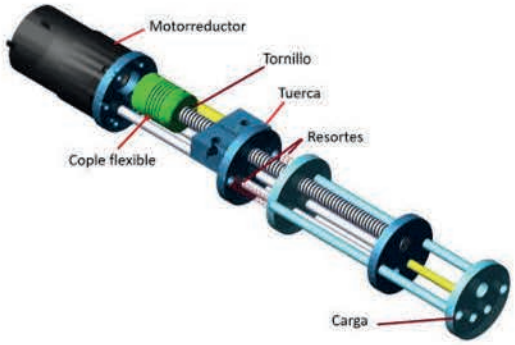



Fig. 2. Prototipo virtual del actuador Elástico en Serie

### *2.2 Modelo matemático*

El modelo matemático que rige la dinámica del sistema es obtenido al considerar el sistema de masas mostrado en la Figura 3. Donde dos masas $m_1$ y $m_2$ están acopladas por un resorte de rigidez $k$; $x_i$ y $x_0$ denotan las posiciones para cada masa, respectivamente. Se considera amortiguamiento viscoso $b_1$ y $b_2$. El modelo dinámico considera también las perturbaciones $d_1$ y $d_2$ con el fin de representar la dinámica no modelada, efectos no-lineales de fricción seca, fuerzas externas, etc. Una fuerza $F_i$ actuando sobre la masa representa la fuerza de entrada transmitida por el motor a través del sistema de transmisión. La fuerza de salida aplicada a la carga está denotada por $F_o$.

Aplicando la segunda ley de Newton, se obtienen las ecuaciones que gobiernan la dinámica del sistema.

$$m_1\ddot{x}_i = F_i + kx_0 - kx_i - b_1\dot{x}_i + d_1 \quad (1)$$

$$m_2\ddot{x}_0 = kx_i - kx_0 - b_2\dot{x}_0 + d_2 \quad (2)$$

Representando las ecuaciones (1) y (2) en variables de estado:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3)$$

 ISSN en trámite

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\\ \dot{x}_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ -\frac{k}{m_1} & -\frac{b_1}{m_1} & \frac{k}{m_1} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ \frac{k}{m_2} & 0 & -\frac{k}{m_2} & -\frac{b_2}{m_2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\\ x_4\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \frac{1}{m_1}\\ 0\\ 0\end{bmatrix}u+\begin{bmatrix}0\\ \frac{d_1}{m_1}\\ 0\\ \frac{d_2}{m_2}\end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde $x_1 = x_i$, $x_2 = \dot{x}_i$, $x_3 = x_0$, $x_4 = \dot{x}_0$ y $F_i = u$. Mientras que $A$ representa la matriz dinámica, $B$ es la matriz de control, $x$ es el vector de estados y $u$ es el vector de entradas del sistema.

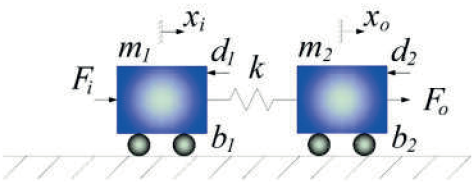



Fig. 3. Diagrama esquemático del actuador elástico en serie

## 3. CONTROLADOR GPI ROBUSTO

El controlador utiliza la propiedad de planitud diferencial de la dinámica del sistema con el objetivo de realizar un seguimiento de trayectorias. De acuerdo con esta propiedad, un sistema es diferencialmente plano si su representación en espacio de estados es controlable. La matriz de controlabilidad $C_o$ del sistema se obtiene a partir de.

$$C_o = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & A^3B \end{bmatrix} \quad (5)$$

La controlabilidad de un sistema se comprueba siempre que la dimensión de la matriz de controlabilidad sea igual a su rango. Determinando (5) resulta que el rango de $C_o$=4, por lo que, el sistema es controlable y a su vez, diferencialmente plano.

La salida plana $F$ del sistema se obtiene de la última fila en la inversa de la matriz de controlabilidad $C_o$. Lo cual se expresa como:

$$F = \begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} C_o^{-1}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\\ x_4\end{bmatrix} = \frac{1}{k} m_1 m_2 x_3 \quad (6)$$

De acuerdo con (Sira et al., 2008), la salida plana se expresa únicamente a partir de la variable de estado determinada, por lo cual, la salida plana se reduce a:

$$x_3 = y_F \quad (7)$$

A partir de la salida plana, las variables de estado y la entrada de control se expresan en términos de $u$ y sus derivadas sucesivas:

$$x_1 = \frac{m_2}{k}\ddot{y}_F + \frac{b_2}{k}\dot{y}_F + y_F \quad (8)$$

$$x_2 = \frac{m_2}{k}\dddot{y}_F + \frac{b_2}{k}\ddot{y}_F + \dot{y}_F \quad (9)$$

$$x_4 = \dot{y}_F \quad (10)$$

$$\begin{aligned} u = {} & \frac{m_1 m_2}{k} y_F^{IV} + \ldots \\ & \frac{1}{k}\left(b_1 m_2 + b_2 m_1\right)\dddot{y}_F + \ldots \\ & \left(m_1 + m_2 + \frac{1}{k} b_1 b_2\right)\ddot{y}_F + \ldots \\ & \left(b_1 + b_2\right)\dot{y}_F \end{aligned} \quad (11)$$

El sistema puede ser representado como un sistema de cuarto orden dado por:

$$\begin{aligned} y_F^{IV} = {} & \tfrac{k}{m_1 m_2} u - \left(\tfrac{b_2}{m_2} + \tfrac{b_1}{m_1}\right)\dddot{y}_F - \ldots \\ & \left(\tfrac{k}{m_1} + \tfrac{k}{m_2} + \tfrac{b_1 b_2}{m_1 m_2}\right)\ddot{y}_F - \left(\tfrac{k b_1}{m_1 m_2} + \tfrac{k b_2}{m_1 m_2}\right)\dot{y}_F \end{aligned} \quad (12)$$

Para el control GPI robusto, basado en planitud diferencial, para el seguimiento de trayectorias se considera como un modelo simplificado perturbado de la forma:

$$y_F^{IV}(t) = v(t) + \xi(t) \quad (13)$$

Dónde:

$$v(t) = \tfrac{k}{m_1 m_2} u(t) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \xi(t) = {} & -\left(\tfrac{b_2}{m_2} + \tfrac{b_1}{m_1}\right)\dddot{y}_F - \left(\tfrac{k}{m_1} + \tfrac{k}{m_2} + \tfrac{b_1 b_2}{m_1 m_2}\right)\ddot{y}_F - \ldots \\ & \left(\tfrac{k b_1}{m_1 m_2} + \tfrac{k b_2}{m_1 m_2}\right)\dot{y}_F + h.o.t. \end{aligned} \quad (15)$$

h.o.t. Términos de Alto Orden son perturbaciones no modeladas y que pueden presentarse en el sistema.

Para el diseño del controlador GPI robusto se considera que la perturbación es suave, acotada y que puede ser aproximada por una función polinomial dependiente del tiempo de grado 4, y puede representarse como:

$$\xi(t) = a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (16)$$

El controlador GPI robusto propuesto para compensar la perturbación de grado 4 está dado por:

$$\begin{aligned} v(t) = {} & y_F^{IV*}(t) - k_{11}\left(\hat{\dddot{y}}_F - \dddot{y}_F^*\right) - \ldots \\ & k_{10}\left(\hat{\ddot{y}}_F - \ddot{y}_F^*\right) - k_9\left(\hat{\dot{y}}_F - \dot{y}_F^*\right) - \ldots \\ & k_8\left(y_F - y_F^*\right) - k_7\int\left(y_F - y_F^*\right) - \ldots \\ & k_6\int^{(2)}\left(y_F - y_F^*\right) - k_5\int^{(3)}\left(y_F - y_F^*\right) - \ldots \\ & k_4\int^{(4)}\left(y_F - y_F^*\right) - k_3\int^{(5)}\left(y_F - y_F^*\right) - \ldots \\ & k_2\int^{(6)}\left(y_F - y_F^*\right) - k_1\int^{(7)} y_F - k_0\int^{(8)}\left(y_F - y_F^*\right) \end{aligned} \quad (17)$$

Donde $y_F^*$ es la trayectoria de referencia de la posición deseada.

 ISSN en trámite

Del sistema no perturbado se tiene:

$$y_F^{IV*}(t) = v^*(t) \tag{18}$$
$$\dddot{y}_F = \int v,\ \ddot{y}_F = \dddot{y}_F + \ddot{y}_{F0}$$
$$\ddot{y}_F = \int^{(2)} v,\ \dot{y}_F = \ddot{y}_F + \dddot{y}_{F0}t + \ddot{y}_{F0}$$
$$\dot{y}_F = \int^{(3)} v,\ y_F = \dot{y}_F + \ddot{y}_{F0}t^2 + \dddot{y}_{F0}t + \dot{y}_{F0}$$

Al considerar el error como $e = y_F - y_F^*$ y derivar, se obtiene el polinomio característico *p(s)* del sistema en lazo cerrado:

$$p(s) = s^{12} + k_{11}s^{11} + k_{10}s^{10} + k_9 s^9 + k_8 s^8 + k_7 s^7 + k_6 s^6 + k_5 s^5 + k_4 s^4 + k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_0 \tag{19}$$

Se propuso un polinomio de Hurwitz de doceavo grado para determinar las ganancias del controlador:

$$\left(s^2 + 2\varsigma\omega_n s + \omega_n^2\right)^6 = 0 \tag{20}$$

Mediante la asignación de polos, se definen los valores de $\varsigma = 7$ y $\omega_n = 60$.

## 4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El modelo matemático del SEA y el controlador GPI robusto basado en la propiedad de planitud diferencial fue expresado en un diagrama de bloques de *Simulink – Matlab*, ver Figura 4. Los parámetros de simulación del SEA se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1. Parámetros de simulación del AES**

| Parámetro | Valor | Unidades |
|---|---|---|
| $m_1$ | 0.042 | kg |
| $m_2$ | 0.328 | kg |
| $b_1$ | 2 | Ns/m |
| $b_2$ | 2 | Ns/m |
| $k$ | 3960 | N/m |

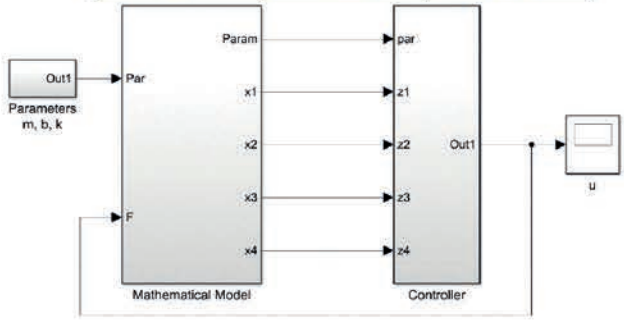



Fig. 4. Diagrama de bloques de simulación del SEA y del controlador GPI robusto en Matlab-Simulink®

La trayectoria de referencia deseada está dada por:

$$x_{3d} = y_F^* = x_0^* = 0.008\sin(31.41t) \tag{21}$$

Para mostrar el desempeño del controlador, se realizaron simulaciones con el prototipo virtual bajo el ambiente MSC Adams view® en co-simulación con Simulink-Matlab®, ver Figura 5. En la Figura 6 se muestra el prototipo virtual del SEA bajo el ambiente del software MSC Adams View. La fuerza de control y las perturbaciones están indicadas mediante flechas. La fuerza de control se aplica a la tuerca del tornillo.

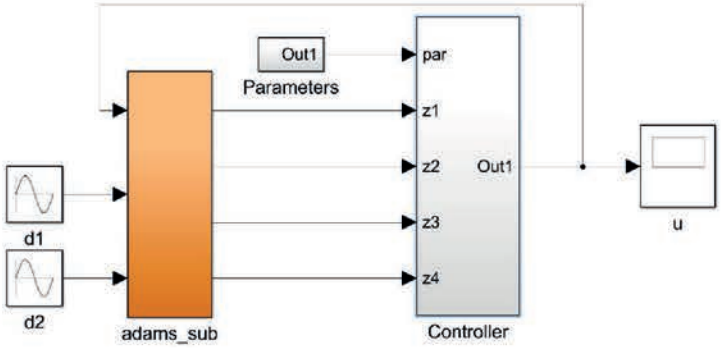



Fig. 5. Diagrama de bloques de la co-simulación entre MSC Adams® y Matlab-Simulink®

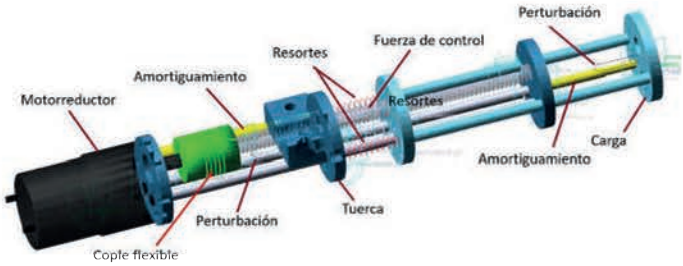



Fig. 6. Prototipo virtual del SEA bajo el ambiente de MSC Adams View®

A continuación, se presentan los resultados de simulación obtenidos con el modelo matemático y el prototipo virtual con la implementación del controlador GPI robusto.

La Figura 7 muestra los resultados en lazo cerrado del modelo matemático del SEA (4) con el controlador GPI robusto (17) para el seguimiento de la trayectoria deseada (21). En esta simulación se consideran las perturbaciones iguales a cero ($d_1 = d_2 = 0$) y la entrada de control se limita a valores entre [-10, 10] N. Por lo cual, no puede tomar valores fuera de este intervalo.

Se puede observar en la Figura 7 como el desplazamiento de $m_2$ sigue desde el inicio a la trayectoria de referencia deseada. En la Figura 8 se muestra la señal de control GPI robusto requerida para el seguimiento de la trayectoria de referencia deseada.

 ISSN en trámite

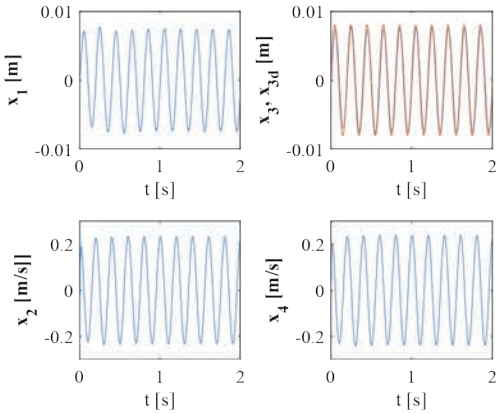



Fig. 7. Respuesta del SEA sin perturbación y con seguimiento de trayectoria

En la Figura 9 se muestra los resultados de simulación en lazo cerrado utilizando el prototipo virtual del SEA bajo el ambiente de MSC Adams y en co-simulación con el controlador implementado en Simulink-Matlab. Se puede observar que se presenta una respuesta similar a la obtenida con el modelo matemático, Figura 7 y 8. En esta simulación también se acoto el controlador de [-10, 10] N.

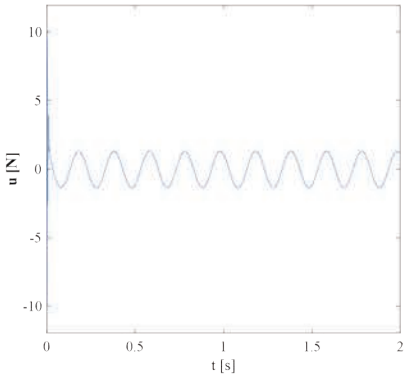



Fig. 8. Fuerza de entrada del control

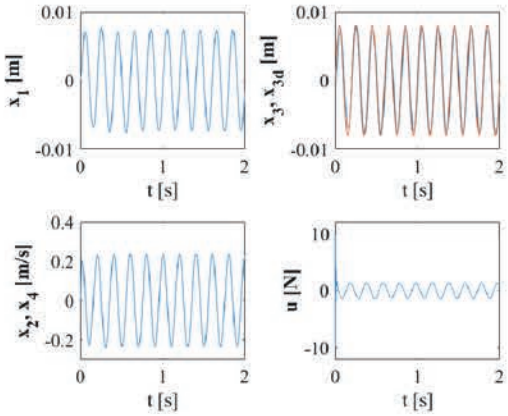



Fig. 9. Prototipo virtual del SEA bajo el ambiente de MSC Adams View®

En la Figura 10 se muestra la respuesta en lazo cerrado del SEA considerando solo una perturbación actuando en la masa 1 dada por la función mostrada en la Tabla 2. La perturbación representa un 15% del valor máximo de la fuerza de control obtenida en estado estable del seguimiento de la trayectoria deseada (1.31N).

**Tabla 2. Parámetros de simulación del AES**

| Masa | Perturbación | % respecto a *u* máximo |
|---|---|---|
| $m_1$ | $d_1(t) = 0.2\sin(30t)$ | 15 |
| $m_2$ | $d_2(t) = 0.5\sin\left(20t + \frac{\pi}{2}\right)$ | 38 |

Se puede observar que la perturbación no afecta el seguimiento de la trayectoria de referencia deseada, y de manera similar el esfuerzo de control no presenta un incremento considerable para el seguimiento de la trayectoria deseada.

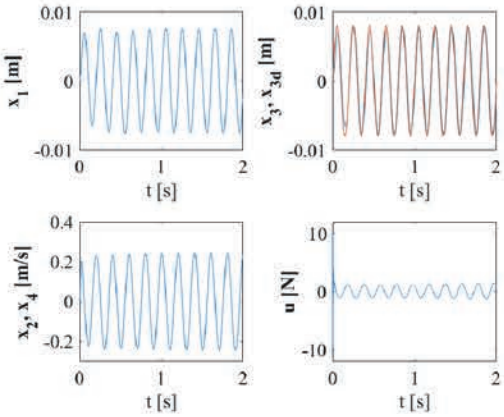



Fig. 10. Respuesta del SEA con perturbación $d_1$, utilizando el prototipo virtual

En la Figura 11 se muestra la respuesta del SEA considerando dos perturbaciones actuando en las dos masas, ver Figura 2 y Tabla 2. En esta simulación, la perturbación actuando en la masa 2, representa un 38% del valor máximo de la fuerza de control obtenida en estado estable (1.31N).

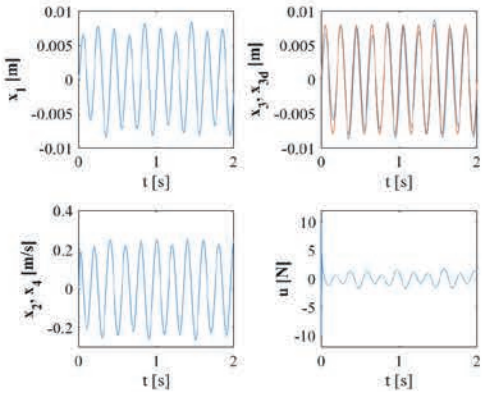



Fig. 11. Respuesta del SEA con perturbaciones $d_1$ y $d_2$, utilizando el prototipo virtual

 ISSN en trámite

Finalmente, en la Figura 12 se muestra la respuesta del SEA al implementar el control GPI robusto basado en planitud diferencial, sin limitar el esfuerzo de control. Se puede apreciar que se tiene un mejor desempeño en el seguimiento de la trayectoria deseada, sin embargo, se requiere un esfuerzo de control mayor (300-600N), en este caso, el controlador no está limitado y puede tomar cualquier valor. Lo que resultaría en un motor de mayor potencia.

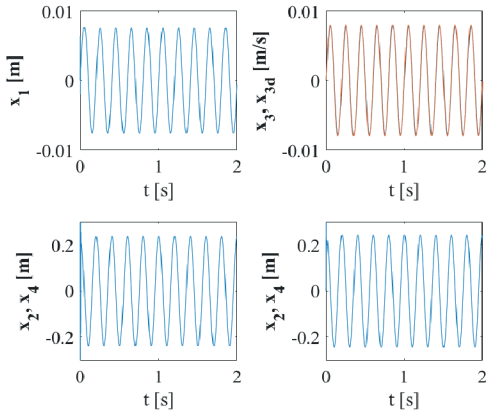



Fig. 12. Respuesta del SEA con perturbaciones $d_1$ y $d_2$, utilizando el prototipo virtual

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados de simulación muestran que el controlador GPI robusto basado en la propiedad de planitud diferencial, del modelo dinámico del AES, puede ofrecer un seguimiento adecuado del actuador ante perturbaciones externas desconocidas pero acotadas. De las simulaciones obtenidas, se puede observar que el esfuerzo de control no aumenta significativamente (18 %) cuando se presentan perturbaciones en ambas masas (Tabla 2). La ventaja de este controlador que solo requiere mediciones de la salida.

## REFERENCIAS

Aguirre-Ollinger G. and Yu H., Lower-Limb Exoskeleton With Variable-Structure Series Elastic Actuators: Phase-Synchronized Force Control for Gait Asymmetry Correction, in IEEE Transactions on Robotics, vol. 37, no. 3, pp. 763-779, June 2021, doi: 10.1109/TRO.2020.3034017.

Casas R., Chen T., Lum P.S., Comparison of Two Series Elastic Actuator Designs Incorporated into a Shoulder Exoskeleton. IEEE Int Conf Rehabil Robot. 2019 Jun; 2019:317-322. doi: 10.1109/ICORR.2019.8779448. PMID: 31374649; PMCID: PMC7521626.

Chen T., Casas R. and Lum P. S., An Elbow Exoskeleton for Upper Limb Rehabilitation With Series Elastic Actuator and Cable-Driven Differential, in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 35, no. 6, pp. 1464-1474, Dec. 2019, doi: 10.1109/TRO.2019.2930915.

Dong Y., Ai Q., Liu H., Meng W. and Cheng W., Design and Control of a SEA Driven Knee Exoskeleton for Walking Assistance, 2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2022, pp. 1243-1248, doi: 10.1109/AIM52237.2022.9863380.

Lara-Barrios C. M., Blanco A., Abúndez A., González B. y Á. Puic M., Modelado y simulación de un actuador elástico en serie, en Memorias del XXIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 2017, pp. 1–6.

Leal Junior A. G., de Andrade R. M., y Filho A. B., Series Elastic Actuator: Design, Analysis and Comparison, en *Recent Advances in Robotic Systems*, InTech, 2016.

Fliess M., Lévine J., Martin P. y Rouchon P., Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples, *Int. J. Control*, vol. 61, núm. 6, pp. 1327–1361, jun. 1995.

Fliess M., Marquez R., Delaleau E. and Sira-Ramírez H., Correcteurs Proportionnels-Intègraux Généralisés, *ESAIM: Control, Optimization and Calculus of Variations*, Vol. 7, No. 2, pp. 23-41, 2002

Ibrahim Habiba A., Hassan Ammar Hossam, Shalaby Raafat., Modeling and Control of a Novel Design of Series Elastic Actuator for Upper Limb Rehabilitation. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. Vol. 9, No. 1, 2022, pp. 85-93. doi: 10.18280/mmep.090111.

Pratt G. A. y Williamson M. M., Series elastic actuators, en Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots, 1995, vol. 1, pp. 399–406.

Sariyildiz E., Chen G. and Yu, H., A Unified Robust Motion Controller Design for Series Elastic Actuators, in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 5, pp. 2229-2240, Oct. 2017, doi: 10.1109/TMECH.2017.2719682.

Sira-Ramírez H. y Agrawal S. K., Differentially Flat Systems. New York: Taylor & Francis, 2004.

Sira-Ramírez H., Luviano-Juárez A., Ramírez-Neria M. y Zurita-Bustamante E. W., Appendix A - Differential Flatness, en Active Disturbance Rejection Control of Dynamic Systems, H. Sira-Ramírez, A. Luviano-Juárez, M. Ramírez-Neria, y E. W. Zurita-Bustamante, Eds. Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 285–297

Sira-Ramírez H., Beltrán-Carbajal F., Blanco-Ortega A., A Generalized Proportional Integral Output Feedback Controller for the Robust Perturbation Rejection in a Mechanical System, *e-STA, Sciences et Technologies de l'Automatique*. Vol. 5, No. 4, pp. 24-32, 2008.

Tiboni M., Borboni A., Vérité F., Bregoli C., Amici C., Sensors and Actuation Technologies in Exoskeletons: A Review. *Sensors* (Basel). 2022 Jan 24;22(3):884. doi: 10.3390/s22030884. PMID: 35161629.

Vázquez-Sánchez L., Blanco-Ortega A., Lara-Barrios C. M., Abúndez-Pliego A., Colín-Ocampo J., Alcocer-Rosado W., Modeling and Simulation of a Series Elastic Actuator Under Gait Cycle Conditions. *Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada,* Vol. 2, Núm. 2. 2019.

 ISSN en trámite

# Desarrollo de un mecanismo optomecánico para la medición de desplazamiento lineal mediante pérdida de intensidad por curvatura

**Luis Enrique Guillen Ruiz** ∗, Jorge Luis Camas-Anzueto ∗, Carlos Alberto Hernández Gutiérrez∗,
Madain Perez Patricio,
∗, Gilberto Anzueto-Sánchez ∗∗,
Alejandro Martínez-Rios ∗∗
∗ Tecnológico Nacional de México, Campus Tuxtla Gutiérrez. Carretera Panamericana Km. 1080. C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (México).
∗∗ Centro de Investigaciones en Óptica, Loma del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre, C.P. 37150, León, Guanajuato (México).
Corresponding author: imcguillen@live.com.mx

Abstract: Se presenta el diseño y experimentación de un mecanismo transductor que permite sensar desplazamientos lineales y caracterizarlo mediante pérdida de intensidad por curvatura. El desplazamiento que es aplicado se transmite a una fibra óptica multimodo que es curvada mediante una cremallera con una base que tiene unas guías y unos sujetadores para sostener la fibra óptica. Se tiene con una potencia máxima inicial que cuando ocurre el desplazamiento lineal la fibra ótica se curva, generando perdidas potencia por irradiación debido al principio de macrocurvatura. En un rango de 0 a 60 mm tanto para apertura como para cierre y con una resolución de 5 mm, se obtuvieron la sensibilidad (apertura=7.999 nW/mm; cierre=8.096 nW/mm), el coeficiente de determinación ($R^2$ mayores a 0.96), la desviación estándar, el error relativo y la histéresis. Finalmente se muestra una tabla comparativa en la que se muestra sensores de desplazamiento que utilicen el principio de pérdida de intensidad por curvatura y se exponen los alcances relacionados con el mecanismo transductor.

*Keywords:* Fibra óptica, Macrocurvatura, Multimodo, Pérdida de Potencia, Mecanismo Trasductor

## 1. INTRODUCCIÓN

La fibra óptica ha sido relevante en los últimos años en los sistemas de transmisión mediante el uso de ondas de luz para transmitir y recibir información. Aprovechando las características de la fibra óptica se está utilizando como un elemento sensor, porque, al ser sometida a perturbaciones ambientales, la señal óptica sufre cambios significativos, los cuales sirven para desarrollar sensores con diversas aplicaciones de detección como deformación, esfuerzo, temperatura, vibración, desplazamiento, etc.

De acuerdo con los principios de trabajo que utilizan los sensores de fibra óptica se clasifican en los que se basan en la modulación de intensidad (potencia de luz), modulación de fase (interferometría), por cambios en la polarización y cambio de longitud de onda (Rajan, 2014). De la clasificación realizada, los sensores con el principio de trabajo de modulación de intensidad son los más accesibles de realizar, porque se requiere que la fibra óptica se curve lo suficiente para permitir que haya una perdida en la señal óptica.

Se han realizado sensores de modulación de intensidad con aplicaciones para la inclinación (Chen *et al.*, 2019), nivel de agua (Zhang *et al.*, 2018) y desplazamiento (Teng *et al.*, 2019; Ghaffar *et al.*, 2019a; Ghaffar *et al.*, 2019b; Ghaffar *et al.*, 2020a; Ghaffar *et al.*, 2020b; Zheng, Xiao and Zhu, 2020; Cheng *et al.*, 2020). Se observa que el radio de curvatura en los sensores de fibra óptica es muy importante para que se realicen las mediciones de los parámetros requeridos. Para ello se utilizan configuraciones de fibra óptica o mecanismos transductores que permiten relacionar el parámetro a medir con respecto a la pérdida de potencia obtenida debido al radio de curvatura.

El radio de curvatura es la flexión mínima que debe tener la fibra óptica para que se produzcan pérdidas por atenuación. Como la fibra óptica está hecha de vidrio si esta se curva demasiado se romperá. Por lo que es importante realizar un diseño adecuado que permita aprovechar el radio de curvatura para realizar la medición necesaria sin llegar a romper la fibra óptica.

En este trabajo se muestra el desarrollo de un mecanismo transductor optomecánico que mide el desplazamiento lineal. Este consta de dos partes: la parte mecánica y la parte óptica. Ambas partes son conectadas mediante dos engranes que tienen una relación de 2:3. Se tiene la finalidad de realizar un sensor con aplicación al Monitoreo de Salud Estructural

 ISSN en trámite

(MSE), particularmente en la medición de las trabes de los tableros de los puentes de concreto. Como los tableros de los puentes pueden acercarse o alejarse, se realizó una prueba de histéresis para verificar que el mecanismo tuviera mediciones confiables en ambas direcciones de desplazamiento.

## 2. MATERIALES Y METODOS

### *2.1 Principio de pérdida de intensidad por curvatura*

La fibra óptica está diseñada para transportar datos o señales en una posición recta desde el emisor al receptor. Sin embargo, en la práctica, esto es muy improbable, porque la instalación de la fibra se tiene que adaptar al lugar donde se pondrá y adecuarla a los obstáculos que se presentan. A este tipo de pérdidas que generan perdida de potencia de la intensidad de la señal se conoce como pérdidas por macrocurvatura (Khare, 2004).

Esto ocurre cuando el haz de luz se propaga dentro de la fibra curvada con un radio R (Fig. 1). Se observa que la distribución de intensidad se atenúa conforme la energía se acerca al revestimiento, porque el haz debe ir con una velocidad mayor en la parte exterior con respecto a la parte interior. Esto provoca que la energía se tienda a irradiar por la parte exterior, perdiendo intensidad. Además, conforme la fibra óptica se componga de más modos mayor será la tendencia de irradiar energía cuando se tenga una curvatura, esto es debido a que se tendrá una menor concentración del haz en el núcleo (Martín Pereda, 2004)

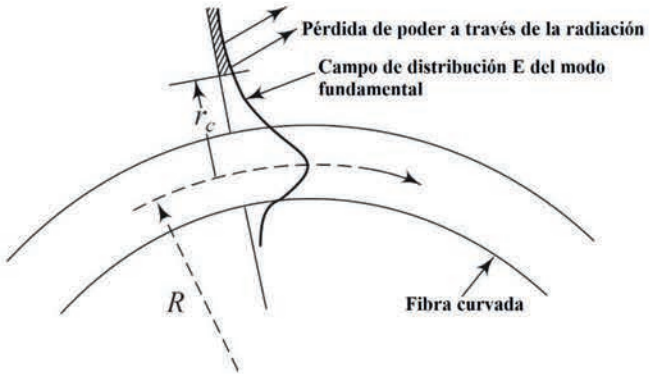



*Fig. 1. Principio de funcionamiento de pérdida de intensidad por macrocurvatura*

El coeficiente de pérdidas cuando la fibra se curva esta dado por (Cabezas & Pinto, 2014):

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = e^{-\alpha_R L} \qquad (1)$$

Donde $P_{out}$ y $P_{in}$ son las potencias de salida y entrada, respectivamente, L es la longitud de la fibra óptica y $\alpha_R$ es coeficiente de atenuación por la curvatura de la fibra, el cual está definido de la siguiente manera:

$$\alpha_R = C_1 e^{-C_2 R} \qquad (2)$$

Donde $C_1$ y $C_2$ son constantes independientes y que se calculan experimentalmente del radio de curvatura R. El coeficiente de atenuación tiene su mayor valor en el radio crítico $R_c$, el cual se define como:

$$R_c = \frac{3n_1^2\lambda}{\pi(n_1^2-n_2^2)^{3/2}} = \frac{3n_2\lambda}{4\pi(NA)^3} \qquad (3)$$

Donde λ es la longitud de onda $n_1$ y $n_2$ son los índices de refracción del núcleo y del revestimiento, respectivamente y NA es la apertura numérica de la fibra óptica. Observando que entre mayor sea los índices de refracción del núcleo y del revestimiento, el radio crítico de curvatura será pequeño.

### *2.2 Diseño del mecanismo*

El diseño del sensor de desplazamiento se muestra en la Fig. 2 y consta de un mecanismo transductor que conecta dos cremalleras con una relación de 2:3 mediante un soporte con un tren de piñones colocados en la parte frontal del mecanismo. En la parte posterior se observa unos sujetadores y unas guías para la fibra óptica que están montadas sobre unas bases que permiten la curvatura de la fibra óptica para generar la pérdida de intensidad. Además, se añadieron dos resortes que conectan los sujetadores con los soportes de fibra óptica. Estos resortes permiten el regreso a su posición inicial de la fibra óptica. Cuando el mecanismo está en reposo se tiene una abertura de 6 cm en la parte frontal, las guías de la fibra óptica se encuentran alineadas y la fibra óptica está en posición recta. En esta posición se tiene una potencia máxima porque no hay pérdidas debido a curvatura. El tamaño de la abertura es estimado de acuerdo a la normativa N PRY CAR 6 01 005/01 de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes, la cual indica la longitud de apoyo mínima que deben tener los tableros de los puentes de concreto.

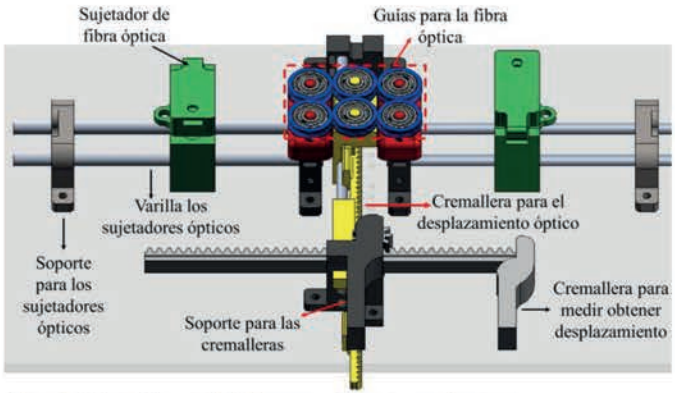



*Fig. 2. Vista frontal del mecanismo transductor*

ISSN en trámite

En la Fig. 3 se observa la parte lateral del mecanismo transductor con el tren de piñón con relación de 2:3, que se logra mediante un engrane de 10 dientes y el otro engrane de 15 dientes. La aplicación para lo cual fue diseñado el mecanismo no requiere un constante movimiento a grandes velocidades con un desgaste continuo y como el tren de engranes y las cremalleras realizan una relación de reducción de desplazamiento y no de velocidad, se utilizan pocos dientes para que haya mayor torque. La cremallera de la parte frontal transmite el desplazamiento lineal a movimiento de curvatura a través de la cremallera posterior con las guías para la fibra óptica. Conforme aumenta el desplazamiento de apertura/cierre, la curvatura se va incrementando y ocasiona una mayor pérdida de potencia. El mecanismo está diseñado para que la curvatura se genere tanto con el movimiento de abertura como el de cierre de la cremallera posterior.

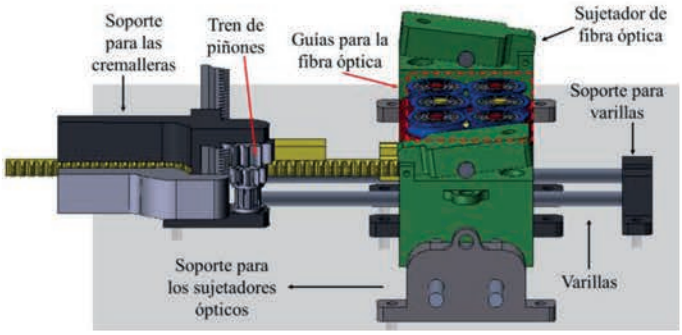



*Fig. 3. Vista lateral del mecanismo transductor*

*2.3 Arreglo experimental*

Se utilizó una fuente de luz blanca luz DH-mini que tenía una bombilla de halógeno con un rango aproximado de ~400-1600 nm y un periodo de estabilidad de 6 minutos. Esta fuente bombeó luz a través de una fibra óptica multimodo de 50 µm de diámetro de núcleo, 125 µm de diámetro de revestimiento y 242 µm de recubrimiento de protección. Esta fibra óptica pasa por el mecanismo y se conecta a un sensor fotodiodo Thorlabs S150C para finalmente conectarse a un medidor de potencia Thorlabs PM100D.

El principio de funcionamiento es el siguiente: Cuando el mecanismo se encuentra en posición inicial se registra una potencia máxima de ~35 nW. Esta potencia disminuirá conforme la fibra óptica se empiece a curvar. Al aplicar un desplazamiento a la cremallera de la parte frontal para que avance hacia la derecha o izquierda como se indica en la Fig. 4, este desplazamiento se transducirá a curvatura por medio del tren de piñones que conecta a la cremallera posterior donde se encuentra la fibra óptica posicionada entre las guías y los sujetadores de fibra óptica. Estos movimientos se representan en la Fig. 4 con las flechas y líneas punteadas de color verde para el cierre del mecanismo y con las flechas y líneas punteadas de color rojo para la apertura del mecanismo.

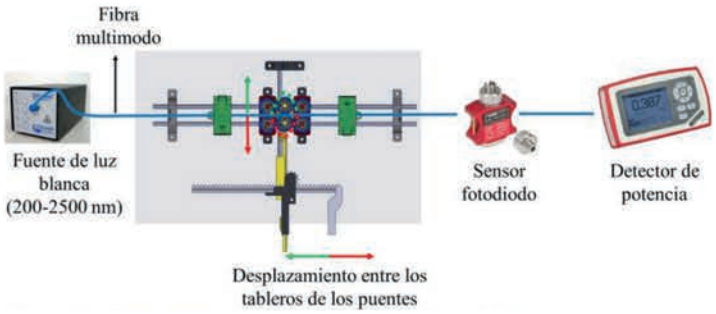



*Fig. 4. Principio de funcionamiento del mecanismo transductor*

EL mecanismo transductor con todos los elementos para su funcionamiento se observa en la Fig. 5. Se realizaron cinco mediciones para conocer la sensibilidad, el coeficiente de determinación, la histéresis, la desviación estándar y el Error relativo del mecanismo.

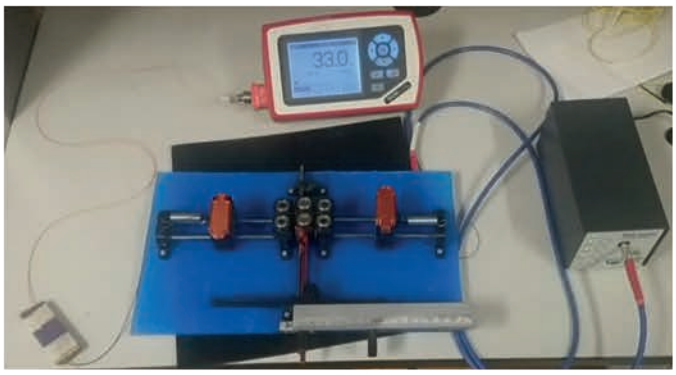


*Fig. 5. Mecanismo transductor en operación*

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Las mediciones se realizaron con el mecanismo en posición inicial (6 cm). A partir de esta posición se consideraron los desplazamientos de cierre y de apertura. Este desplazamiento fue de 6 cm con intervalos de 0.5 cm. La relación entre el desplazamiento y la perdida de potencia generado se muestra en las Fig. 6 y Fig. 7 con muestras aleatorias.

De acuerdo con Corona (2019) la sensibilidad en un sensor es la entrada mínima requerida para provocar una salida detectable (Corona Ramirez, Abarca Jiménez and Mares Carreño, 2019). En nuestro mecanismo la variable de entrada es el desplazamiento medido en cm, lo que provoca en la variable de salida una pérdida de potencia medida en nW. La

 ISSN en trámite

aplicación en el MSE implica que se debe tener una alta sensibilidad para detectar los desplazamientos mínimos en cm y que el mecanismo transductor permita curvar la fibra óptica para que se detecte la pérdida de potencia el medidor Thorlabs PM100D y permita desarrollar un sensor adecuado.

Se tienen sensibilidades y coeficientes de determinación similares en las mediciones de abertura y cierre, respectivamente. En ambos casos, el resultado del coeficiente de determinación ($R^2$) en todas las muestras reflejó un valor mayor a 0.96 lo que indica que el mecanismo representa eficientemente el comportamiento de pérdida de potencia con respecto al desplazamiento analizado. Se observa que las sensibilidades de las mediciones entre abertura y cierre son muy parecidas, como se aprecia en la Tabla 1. Se utilizan las cinco mediciones de sensibilidad de abertura y de cierre para calcular la desviación estándar total de todas las sensibilidades con 0.01602 nW/cm. El error relativo que hay entre las diez mediciones de sensibilidad de abertura y cierre fue de 1.99 %. Esto es debido a que el mecanismo se diseñó y construyó lo más simétrico posible, para que se tuviera pérdidas de intensidad por curvatura similares en las mediciones de apertura y de cierre. Logrando que el sensor tuviera congruencia en las mediciones.

La histéresis es la ligera diferencia de pérdida de potencia que ocurre cuando el mecanismo tiene un desplazamiento de su posición inicial a la final y viceversa. En el mecanismo existen dos histéresis, cuando se simula abertura y cuando se simula cierre. Se obtuvo restando los datos obtenidos de la posición inicial hasta la abertura/cierre final menos los datos obtenidos de abertura/cierre final hasta la posición inicial y se dividieron entre el rango de la variable de entrada (6 cm). Esto se muestra en la Fig. 8 con muestras aleatorias e indica que las mediciones de apertura con respecto a las de cierre tienen un patrón similar. Sin embargo, se nota que la primera región no es lineal, debido a que el desplazamiento no logra curvar la fibra óptica para que ocurran pérdidas de potencia significativas. Una solución sería cambiando la relación inicial por una que satisfaga esta condición.

Es importante que la fibra óptica se curve de manera simétrica en función del desplazamiento tanto en abertura como en cierre para que la pérdida de potencia que se registran en el mecanismo sea confiable y se caracterice de manera precisa. Estos datos se resumen en la Tabla 2, donde se comparan los cambios entre las medidas de apertura con respecto a cierre. Es relevante que los porcentajes de histéresis sean mínimos logrando porcentajes de hasta máximo 10 % de variación. Esto demuestra que el mecanismo curva la fibra óptica de manera simétrica, generando pérdidas de potencias congruentes para las medidas de apertura con respecto a las de cierre, asegurando que las mediciones realizadas son congruentes y confiables.

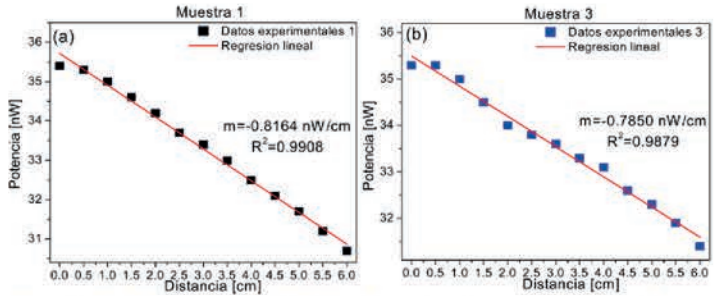



*Fig. 6. Gráficas de la pérdida de potencia en relación al desplazamiento (Apertura)*

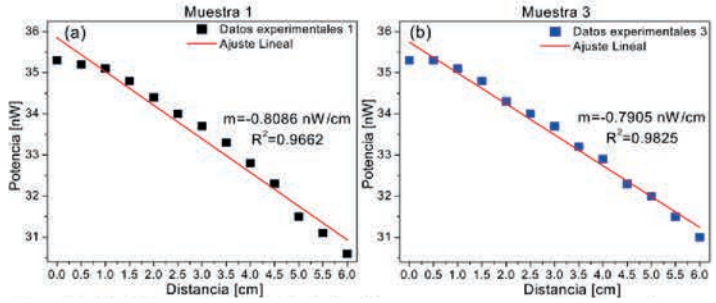



*Fig. 7. Gráficas de la pérdida de potencia en relación al desplazamiento (Cierre)*

**Tabla 1. Sensibilidad y Coeficiente de determinación el sensor de desplazamiento (Abertura y cierre)**

| Parámetros | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Muestra 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Abertura | | | | | |
| Sensibilidad (nW/cm) | -0.8086 | -0.7937 | -0.7905 | -0.7870 | -0.8197 |
| Coeficiente de determinación | 0.9662 | 0.9854 | 0.9825 | 0.9908 | 0.9866 |
| Cierre | | | | | |
| Sensibilidad (nW/cm) | -0.8164 | -0.7997 | -0.7850 | -0.8142 | -0.8329 |
| Coeficiente de determinación | 0.9908 | 0.9921 | 0.9879 | 0.9809 | 0.9842 |

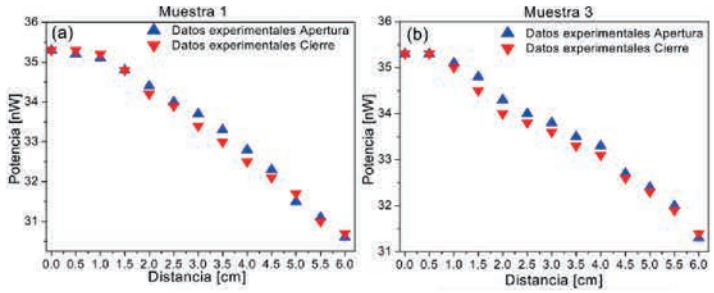



*Fig. 8. Gráficas de la Histéresis de las muestras obtenidas del mecanismo entre apertura y cierre*

 ISSN en trámite

**Tabla 2. Histéresis del mecanismo**

| Desplaza-miento | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Muestra 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 cm | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.66% |
| 0.5 cm | 0.5 % | 1.66 % | 0 | 0 | 1.66% |
| 1 cm | 1 % | 1.66 % | 3.33 % | 1.66 % | 1.66% |
| 1.5 cm | 10 % | 0 | 3.33 % | 5% | 8.33% |
| 2 cm | 2 % | 3.33 % | 5 % | 5% | 6.66 % |
| 2.5 cm | 2.5 % | 1.66 % | 6.66 % | 1.66 % | 5 % |
| 3 cm | 3 % | 5 % | 6.66 % | 1.66 % | 5 % |
| 3.5 cm | 3.5 % | 5 % | 1.66 % | 1.66 % | 6.66 % |
| 4 cm | 4 % | 5 % | 1.66 % | 1.66 % | 5 % |
| 4.5 cm | 4.5 % | 3.33 % | 3.33 % | 1.66 % | 3.33 % |
| 5 cm | 5 % | 3.33 % | 3.33 % | 1.66 % | 3.33 % |
| 5.5 cm | 5.5 % | 1.66 % | 1.66 % | 1.66 % | 1.66 % |
| 6 cm | 6 % | 1.66 % | 3.33 % | 1.66 % | 5 % |

En la Tabla 3 y Tabla 4 se resumen la desviación estándar y el error relativo de las mediciones de variación de potencia cuando el mecanismo tiene el movimiento de apertura y de cierre, respectivamente. De acuerdo con trabajos previos (Ghaffar, 2020a) se ha demostrado que para las muestras realizadas, la desviación estándar debe ser menor a 0.4 nW con un error relativo menor de 1.5%. Los valores de la desviación estándar y el porcentaje del error relativo se obtuvieron mediante las cinco muestras tanto de abertura y cierre. Las deviaciones estándares de las muestras tanto de abertura y cierre fueron menores a 0.39 nW. Mostrando que cumple con la condición mencionada. De igual manera, el error relativo con un porcentaje menor a 1.25% indica que también satisface la condición anterior.

**Tabla 3. Desviación estándar y Error relativo de las medidas obtenidas (Apertura)**

| Medida | Desviación estándar (nW) | Error relativo |
|---|---|---|
| 0 cm | 0.0000 | 0 |
| 0.5 cm | 0.0447 | 0.13 % |
| 1 cm | 0.0548 | 0.16 % |
| 1.5 cm | 0.0837 | 0.24 % |
| 2 cm | 0.1140 | 0.33 % |
| 2.5 cm | 0.1000 | 0.29 % |
| 3cm | 0.1140 | 0.34 % |
| 3.5 cm | 0.1483 | 0.45 % |
| 4 cm | 0.2345 | 0.71 % |
| 4.5 cm | 0.2510 | 0.78 % |
| 5 cm | 0.3912 | 1.23 % |
| 5.5 cm | 0.3701 | 1.18 % |
| 6 cm | 0.3082 | 1 % |

**Tabla 4. Desviación estándar y Error relativo de las medidas obtenidas (Cierre)**

| Medida | Desviación estándar (nW) | Error relativo |
|---|---|---|
| 0 cm | 0.0548 | 0.15 % |
| 0.5 cm | 0.0548 | 0.15 % |
| 1 cm | 0.1924 | 0.55 % |
| 1.5 cm | 0.2387 | 0.69 % |
| 2 cm | 0.1673 | 0.49 $ |
| 2.5 cm | 0.1789 | 0.53 % |
| 3cm | 0.1517 | 0.45 % |
| 3.5 cm | 0.1517 | 0.46 % |
| 4 cm | 0.3271 | 1.00 % |
| 4.5 cm | 0.2881 | 0.90 % |
| 5 cm | 0.2966 | 0.93 % |
| 5.5 cm | 0.3362 | 1.07 % |
| 6 cm | 0.3082 | 0.99 % |

En la Tabla 5 se realiza una comparación de los sensores de fibra óptica desarrollados con el principio de pérdida de intensidad por curvatura. Se observa que el mecanismo sensor tiene un rango ligeramente inferior con respecto a los otros sensores, pero es competitivo en cuanto a la sensibilidad. Se tiene una resolución mayor en comparación con la mayoría de los sensores de otros autores, la cual es ideal para la aplicación a la que se requiere someter que es el MSE.

**Tabla 5. Comparación con otros sensores de desplazamiento por pérdida de intensidad (curvatura)**

| Año | Rango mm | Sensibilidad nW/mm | Resolución mm | Referencia |
|---|---|---|---|---|
| 2019 | 0-18 | 0.0319 | 0.05 | (Teng *et al.*, 2019) |
| 2019 | 0-140 | 6.91 | 0.1434 | (Ghaffar, *et al.*, 2019a) |
| 2019 | 0-100 | 2.6 | 10 | (Ghaffar, *et al.*, 2019b) |
| 2020 | 0-150 | 1.26 | 0.78 | (Ghaffar, *et al.*, 2020a) |
| 2020 | 0-140 | 9.158 | 0.109 | (Ghaffar, *et al.*, 2020b) |
| 2022 | 0-60<br>0-60 | 7.999<br>8.096 | 5<br>5 | Este trabajo |

Por último, se observó que en la primera región de la prueba no es lineal, lo que se atribuye a los pocos dientes de los piñones como lo explica Norton. Para reducir la posibilidad de interferencia y socavación en los engranes se debe aumentar el número mínimo de dientes. El mecanismo que utiliza un tren de piñones con un ángulo de presión de 25 grados se debe cambiar a una relación de 12:18 dientes y evitar los problemas de interferencia y socavación (Norton, 2011). Un factor importante a considerar en el diseño y

 ISSN en trámite

mejoramiento del mecanismo transductor es el radio de curvatura ya que este parámetro se relaciona con el piñón de engranes, al ser el elemento que transduce el movimiento lineal a un movimiento de curvatura en la fibra óptica. La relación del tren de piñones con respecto al radio de curvatura es que entre mayor sea la diferencia entre la relación de los piñones, menor radio de curvatura se generará con el desplazamiento aplicado.

## 4. CONCLUSIONES

Se diseñó y se caracterizó un mecanismo transductor optomecánico para medir el desplazamiento entre trabes de puentes de concreto que convierte un desplazamiento lineal a un radio de curvatura que genera pérdidas de potencia con fibra óptica multimodo. Se obtuvieron valores de sensibilidad con un coeficiente de variación similares para mediciones de apertura (0.7999 nW/cm o 7.999 nW/mm) y cierre (0.8096 nW/cm o 8.096 nW/mm) en un rango de 6 cm (60 mm) con una resolución de 0.5 cm (5 mm).

Se observa la importancia de tener una sensibilidad que corresponda con la pérdida de potencia necesaria para caracterizar el sensor de desplazamiento. Para el óptimo funcionamiento de un mecanismo transductor que use engranes y cremalleras es importante el número de dientes para generar un movimiento uniforme y preciso desde la medida inicial hasta la medida final.

El mecanismo transductor optomecánico es robusto y presenta mediciones precisas, tanto en las mediciones de apertura como las de cierre, así como una confiabilidad en que el radio de curvatura sea similar con respecto al desplazamiento de apertura como de cierre del mecanismo transductor. Se tiene la ventaja de que no requiere de procesamiento de señal o de técnicas sofisticadas para obtener la información del sensor, ya que solo relaciona la pérdida de potencia con respecto al desplazamiento aplicado.

## REFERENCIAS

Cabezas, A. and Pinto, R. A. (2014) *Sistemas de comunicaciones ópticas*. Available at: http://books.google.com/books?id=zhFu4jZ1h4oC&pgis=1.

Chen, W. *et al.* (2019) 'High-sensitive tilt sensor based on macro-bending loss of single mode fiber', *Optical Fiber Technology*, 50(February), pp. 1–7. doi: 10.1016/j.yofte.2019.02.006.

Cheng, L. *et al.* (2020) 'A U-shaped-wound fiber macro-bending loss crack sensor improved by an optical splitter', *Optical Fiber Technology*, 58(September 2019), p. 102259. doi: 10.1016/j.yofte.2020.102259.

Ghaffar, A., Liu, W., *et al.* (2019a) 'Twisted macro-bend coupling based three-dimensional displacement measurement sensor using polymer fiber', *OSA Continuum*, 2(9), p. 2773. doi: 10.1364/osac.2.002773.

Ghaffar, A., Hou, Y. L., *et al.* (2019b) 'Two-dimensional displacement optical fiber sensor based on macro-bending effect', *Optics and Laser Technology*, 120(May), pp. 1–6. doi: 10.1016/j.optlastec.2019.105688.

Ghaffar, A., Liu, W. Y., *et al.* (2020a) 'A low-cost wide range plane-in-out displacement measurement sensor based on twisted macro-bend coupling method', *Optik*, 206(December 2019).

Ghaffar, A., Mehdi, M., *et al.* (2020b) 'The coupling of scattered-bend loss in POF based the displacement measurement sensor', *Sensing and Bio-Sensing Research*, 29(March), p. 100351. doi: 10.1016/j.sbsr.2020.100351.

Khare, R. P. (2004) *Fiber Optics and Optoelectronics*.

Martín Pereda, J. A. (2004) *Sistemas y redes ópticas de comunicaciones*, *Prentice Hall*.

Norton, R. L. (2011) *Diseño De Maquinas: Un Enfoque Integrado*, *Diseño de Elementos de Máquinas*. Edited by P. Hall

Rajan, G. (2014) *Optical Fiber Sensor Advanced Techniques and Applicacions*. Edited by K. Iniewski.

Teng, C. *et al.* (2019) 'Investigation of a plastic optical fiber imprinted with V-groove structure for displacement sensing', *Optical Engineering*, 58(07), p. 1. doi: 10.1117/1.oe.58.7.072002.

Zhang, Yingzi *et al.* (2018) 'Enhancement of a Continuous Liquid Level Sensor Based on a Macro-Bend Polymer Optical Fiber Coupler', *IEEE Photonics Journal*, 10(1). doi: 10.1109/JPHOT.2018.2795550.

Zheng, Y., Xiao, W. and Zhu, Z. W. (2020) 'A simple macro-bending loss optical fiber crack sensor for the use over a large displacement range', *Optical Fiber Technology*, 58(November 2019), p. 102280. doi: 10.1016/j.yofte.2020.102280.

 ISSN en trámite

# Estudio Paramétrico del Área De Vidriado de Un Edificio No Residencial En Un Clima Semicálido

**Quintana. U*. Chagolla M.A**. Simá. E*****

*Centro Nacional De Investigación y Desarrollo Tecnológico, CP 62490
Cuernavaca, Morelos. México (Tel:7773627770; e-mail: m20ce053@cenidet.tecnm.mx*, miguel.ca@cenidet.tecnm.mx**, efrain.sm@cenidet.tecnm.mx***).

**Resumen:** En este trabajo se presenta el estudio de la influencia del vidriado de las ventanas en las cargas térmicas de una edificación no residencial. Las ventanas ocupan un área importante en la fachada del edificio y juega un papel indispensable para mantener el confort térmico de la edificación. Se realizó un análisis térmico del efecto de la relación aspecto de área vidriada-pared (RAVP) para una edificación no residencial; la edificación utilizada para este estudio fue la utilizada por la norma NOM-008-ENER-2001. Se utilizó la interfaz comercial DesingBuilder para la simulación en EnergyPlus. Se implementaron cuatro valores de RAVP 20%, 40%, 70% y 90% así como dos tipos de vidriado; claro y reflectivo. El estudio se realizó en un clima (Aw) semí-cálido subhúmedo (según la clasificación Koppen), que corresponde a la Ciudad de Cuernavaca, Morelos. Se encontró que las cargas térmicas de calentamiento son prácticamente nulas en todos los casos. La mayor reducción de cargas térmicas de enfriamiento anuales fue de 77.5 MWh, al comparar el caso de la edificación no residencial con vidrio claro y reflectivo para una RAVP de 90%, siendo el caso del vidrio reflectivo el que obtuvo la menor cantidad de carga térmica.

*Palabras Clave*: Relación de área vidriada-pared, Confort térmico, Ahorro de energía en edificaciones.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las edificaciones utilizan más del 30% de toda la energía a nivel mundial, emisiones de gases de efecto invernadero y generación de residuos [Nejat et al. (2015)]. Los sistemas de acondicionamiento de aire e iluminación ocupan el mayor consumo de energía total en un edificio. En una edificación que utiliza aire acondicionado, la mayor cantidad de energía consumida es debido a la energía de enfriamiento y calentamiento, que está principalmente influenciada por el tipo de clima de la región, los materiales de construcción de la edificación, en donde el vidriado juega un papel muy importante [Long et al. (2014)]. Las ventanas proveen iluminación natural, vista y entrada de aire fresco. Características como el tipo de vidrio, el tamaño, la orientación de la ventana e incluso el color del vidrio desempeñan un papel fundamental en el consumo energético de los edificios [Baetens et al. (2010)]. En México el consumo energético en edificaciones no residenciales está regulado por la norma NOM-008-ENER-2001 [Norma Oficial Mexicana (2001)] la cual proporciona una guía para el cálculo del consumo energético, determinando las ganancias de calor de la edificación base y las del edificio proyectado (la edificación que se pretende construir), también ayuda a mejorar y optimizar energéticamente el diseño de la edificación mejorando el comportamiento térmico de su envolvente.

Autores como Lee et al. (2012), estudiaron el consumo de energía en edificios de oficinas considerando la variación del diseño de la fenestración. Utilizaron el software *COMFEN* para evaluar el consumo de energía. Este estudio identificó las características del consumo energético de edificios para cuatro orientaciones (Norte, Sur, Este y Oeste) con ventanas diseñadas de diferente manera, considerando el tipo de acristalamiento y cambiando la relación de aspecto vidrio-pared (RAVP). El estudio se realizó para cinco climas típicos de Asia, climas similares a las regiones tropicales y cálidas de México como la ciudad de estudio, Cuernavaca. En este estudio se obtuvo el consumo de energía en una edificación no residencial variando el coeficiente global de transferencia de calor (Valor-U), el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC), la orientación y la RAVP. Los resultados se compararon con una edificación de referencia y se varió la RAVP desde 10 hasta 90%. Se recomienda que en todos los casos el RAVP sea el mínimo, recomendado menor al 25%. Para los climas cálidos y fríos un elevado valor del SHGC son los que proporcionan la mayor reducción de cargas térmicas. Se concluye que las propiedades óptimas de la ventana varían según el clima y al diseñar o remodelar un edificio con orientación al ahorro de energía, se recomienda realizar un proceso de simulación energética de la edificación tomando en cuenta las propiedades de las ventanas. En México se han realizado estudios paramétricos de áreas de vidriado en edificaciones no residenciales como el reportado por Polar et al. (2015), que realizaron un estudio teórico para determinar el RAVP óptimo para diferentes regiones de la

 ISSN en trámite

República Mexicana. Usaron una herramienta de simulación energética DesingBuilder (2022) en la cual construyeron la geometría de una edificación no residencial que fue utilizada en la norma NOM-008-ENER (2001) con dos tipos de vidriado en las ventanas que fueron, vidrio claro y vidrio reflectivo. Los valores de RAVP que utilizaron fueron de 20%, 40%, 70% y 90%. Los resultados obtenidos mostraron que en climas áridos como los de algunas regiones del norte del país el vidrio reflectivo es mucho más eficiente, ya que ayuda a reducir el calentamiento producido por la radiación solar lo que conlleva a un ahorro en consumo de energía en cargas de enfriamiento. De igual forma se observó que este vidrio no es tan efectivo en climas templados o fríos, sin embargo, los resultados mostraron que las cargas térmicas de enfriamiento y calentamiento eran considerablemente menores que las del vidrio claro.

En este trabajo se hace un estudio paramétrico del efecto de la variación del RAVP y el uso de tipos de vidriados (claro y reflectivo) en el consumo de energía en una edificación no residencial. En un clima donde no se ha realizado un estudio anual de este tipo, el clima es (Aw) semí-cálido subhúmedo, según la clasificación Koppen dada por Kottek (2006). Y además se realizó el estudio de la reducción de las emisiones de $CO_2$ con respecto al consumo de energía eléctrica de la edificación. Determinando la relación que tiene la RAVP con el consumo de energía y por ende con la emisión de gases contaminantes. Este estudio fue realizado con los datos climáticos de la ciudad de Cuernavaca en el estado de Morelos.

## 2. DATOS CLIMATICOS

Los datos climáticos fueron obtenidos de la estación meteorología con ubicación en el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), obtenido de datos históricos del software Meteonorm v8 (2022). En la Figura 1 se observan los valores de radiación solar promedio mensuales correspondientes a la zona de la Ciudad de Cuernavaca, Morelos. Se observa que la radiación solar mensual máxima se tiene el mes de marzo con 210.18 $kW \cdot m^{-2}$ y la mínima en el mes de junio con 136.42 $kW \cdot m^{-2}$, los meses con los menores valores de radiación coinciden con la temporada de lluvia.

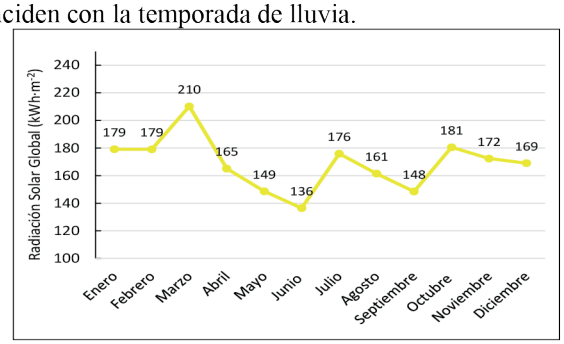



Fig. 1. Radiación solar promedio mensual

En la Figura 2, se muestran los datos de la temperatura ambiente máxima, mínima y promedio mensual, datos que se utilizaron para la simulación. La temperatura máxima se obtuvo en el mes de mayo con 30.7 ºC y la mínima en enero con 15.9 ºC. La temperatura promedio mensual máxima se tuvo de igual manera en el mes de mayo con 26.9 ºC y la mínima promedio mensual fue en el mes de enero con 21.5 ºC, la temperatura promedio anual fue de 23.8 ºC.

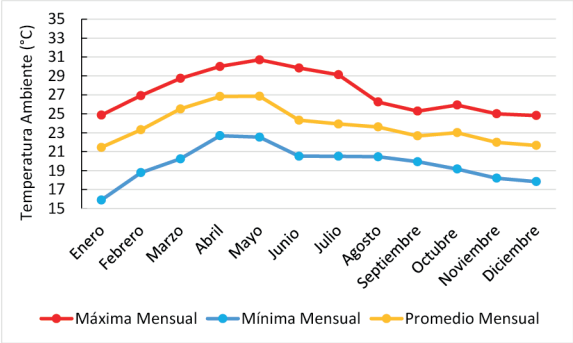



Fig. 2. Temperaturas mensuales del estado de Morelos.

## 3. EDIFICACION BASE

La edificación base utilizada para este trabajo, es la edificación no residencial utilizada para la realización de la norma NOM-008-ENER (2001). Es una edificación de tres pisos como lo marca la norma a para todas las ciudades a excepción de la Ciudad de México, lo que correspondería al lugar de estudio Cuernavaca, Morelos. Los pisos son cuadrados con 669 $m^2$ y las ventanas son homogéneos en todas direcciones. En la Tabla 1, se describen los materiales utilizados para la construcción de la edificación (mostrando primero el material al interior y terminando con el material al exterior) y sus propiedades termofísicas. La edificación considera muros de ladrillo con acabado al interior de yeso, ladrillo y acabado de mortero al exterior. El techo está construido de acabado de yeso al interior, concreto e impermeabilizando al exterior.

**Tabla 1. Materiales de construcción.**

| Elemento | Material | Densidad ($kg \cdot m^{-3}$) | Calor Especifico ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) | Conductividad Térmica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| Pared | Yeso | 800 | 1000 | 0.372 |
| | Ladrillo | 1600 | 800 | 0.81 |
| | Mortero | 1890 | 837 | 0.72 |
| Techo | Yeso | 800 | 1000 | 0.372 |
| | Concreto | 2300 | 840 | 1.740 |
| | Impermeabilizante | 1127 | 800 | 0.17 |
| Piso | Azulejo | 2600 | 795 | 1.136 |

 ISSN en trámite

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Concreto | 2300 | 840 | 1.740 |
| Piso superior | Azulejo | 2600 | 795 | 1.136 |
| | Concreto | 2300 | 840 | 1.740 |
| | Yeso | 800 | 1000 | 0.372 |

Para el estudio se consideraron dos tipos de vidriado claro y reflectivo con un espesor de 6mm (espesor especificado en la NOM-008-ENER (2001)) y variando el RAVP entre cuatro valores diferentes 20%, 40%, 70% y 90%. En la Tabla 2 se muestran los valores del Coeficiente de Sombreado (SC), el coeficiente global de transferencia de calor (Factor U) y el SHGC, del vidriado utilizado para las simulaciones.

**Tabla 2. Ficha técnica del vidriado.**

| Tipo de vidrio | Coeficientes de Ganancia Solar | | |
|---|---|---|---|
| | SC | Factor-U | SHGC |
| Claro | 0.94 | 5.82 | 0.82 |
| Reflectivo | 0.386 | 5.79 | 0.336 |

El coeficiente Factor-U cuantifica el aislamiento de un vidriado; esto puede decirnos la tasa de flujo de calor a través del vidrio. Este factor es el coeficiente de transferencia de calor total en un sistema de vidriado, lo cual incluye transferencia de calor por radiación, conducción y convección. El factor SHGC establece la ganancia de calor solar a través de un vidrio en relación con la radiación incidente [Kersken (2021)]. En la Tabla 3, se presentan las propiedades ópticas de los vidrios utilizados. Donde $T_{sol}$ es la transmitancia solar, $T_{vis}$ es la transmitancia visible, $R_{sol}$ es la reflectancia solar, $R_{vis}$ es la reflectancia visible. ε es la emitancia, para vidrio claro interior $\varepsilon_1$ y exterior $\varepsilon_2$ es 0.84 y para vidrio reflectivo $\varepsilon_1$ y $\varepsilon_2$ es 0.837; k es la conductividad térmica, para el vidrio claro es de 1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ y para el vidrio reflectivo es 0.703 de $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Los subíndices 1 y 2 representan al lado exterior e interior del vidrio, respectivamente.

**Tabla 3 Propiedades ópticas del vidriado.**

| Tipo de vidrio | $T_{sol}$ | $R_{sol1}$ | $R_{sol2}$ | $T_{vis}$ | $R_{vis1}$ | $R_{vis2}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Claro | 0.772 | 0.073 | 0.074 | 0.878 | 0.084 | 0.085 |
| Reflectivo | 0.202 | 0.363 | 0.148 | 0.256 | 0.534 | 0.322 |

3.1 PARAMETROS DE SIMULACION

La edificación base se modifica en DesingBuilder para establecer los parámetros de simulación y operación de la edificación. En la Tabla 4, se presentan los parámetros de simulación obtenidos del edificio base de para la NOM-008-ENER (2001), en los que se describe una edificación de tres pisos con una altura entre pisos de cuatro metros, una densidad de ocupación de nueve metros cuadrados, un área por piso de 669 metros cuadrados y según el tipo de clima se selecciona la temperatura de confort que para el caso es de 25 ºC.

**Tabla 4. parámetros de simulación.**

| Parámetro | Valor |
|---|---|
| Número de pisos | 3 |
| Altura entre pisos | 4 m |
| Área por piso | 669 $m^2$ |
| Densidad ocupacional | 9 $m^2$ por persona |
| Set de temperatura | 25 °C |
| RAVP | 20%, 40%, 70%, 90% |
| Vidrio | Claro y reflectivo |

4. BALANCE TERMICO EN EDIFICACIONES.

El balance térmico de una edificación en términos generales se refiere a que las condiciones térmicas dependen de las ganancias y pérdidas de calor por convección, radiación y conducción. Si las ganancias de calor son mayores que las pérdidas el edificio tendera a calentarse y tendera a enfriarse si las pérdidas son mayores que las ganancias de calor. En la Figura 4 se muestran las ganancias y pérdidas de calor en una edificación.

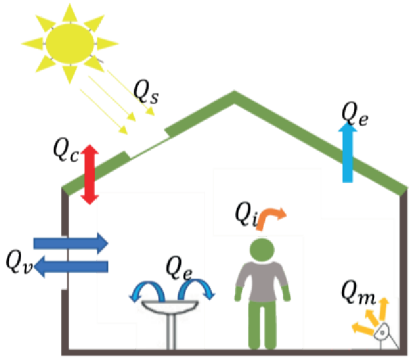



Fig. 3. Balance térmico en edificaciones.

La ecuación de balance térmico expresa que, el equilibrio térmico para una edificación se alcanza cuando la suma de ganancias y las pérdidas de calor es igual a cero como se muestra a continuación en la ecuación (1).

 ISSN en trámite

$$Q_S + Q_i \pm Q_c \pm Q_v \pm Q_m - Q_e = 0 \qquad (1)$$

Donde

$Q_S$ son las ganancias solares; $Q_i$ son las ganancias internas producidas por el calor metabólico, la iluminación de los focos, lámparas, computadoras etc.; $Q_c$ son las ganancias y pérdidas por conducción con las superficies de la envolvente; $Q_v$ son las ganancias y pérdidas por convección; $Q_m$ son las ganancias y pérdidas por sistemas mecánicos de climatización; $Q_e$ son las ganancias debidas a los ocupantes y equipos.

## 5. SOFTWARE BES (BUILDING ENERGY SIMULATION)

Las simulaciones se realizaron en el software DesingBuilder, que es una interfase del motor de cálculo EnergyPlus (2022). En este software se construyó la geometría y se introdujeron los datos climáticos. Antes de poder realizar las simulaciones necesarias para el estudio, se tiene que comprobar que el software se está utilizando de manera correcta y para esto se realizó un ejercicio de prueba BESTEST. El método BESTEST (Building Energy Simulation Test) de la norma ANSI/ASHRAE 140-2007, es un método que permite efectuar la verificación de los resultados de los programas de simulación energética edificios. Este método fue desarrollado por la IEA (International Energy Agency).

La implementación de este método consiste en introducir al programa de simulación un edificio con características geométricas definidas, como las propiedades de los materiales de construcción, los equipos instalados y los datos de clima. Una vez realizadas las simulaciones del edificio de referencia, el estándar proporciona un conjunto de resultados para los diferentes programas de simulación. Si los valores están dentro del intervalo especificado significa que los datos del edificio se han introducido correctamente y que el programa está siendo usado adecuadamente.

### 5.1 PRUEBA BESTEST CASO 600

En esta sección se muestran las características del modelo BESTEST caso 600, que fue el caso que se realizó para comprobar que se estuviera usando de manera correcta el software de simulación. Con la realización de esta prueba se comprobó que el software se estaba usando de manera correcta para poder realizar las simulaciones correspondientes a este estudio. En la Tabla 5 se muestran los resultados de la prueba realizada comparados con la prueba ejemplo de la norma, con respecto a las cargas de calentamiento y enfriamiento, respectivamente. Con una diferencia de 2.722 y 3.128 MWh, de calentamiento y enfriamiento respectivamente. La diferencia de valores se encuentra dentro de los limites considerados como correctos por la prueba, ahora se puede proceder con las simulaciones del estudio.

**Tabla 5. Resultados Bestest.**

| Resultados | Cargas Térmicas (MWh) | |
|---|---|---|
| | Calentamiento | Enfriamiento |
| Norma | 4516.482 | 6710.421 |
| Simulación | 4513.760 | 6707.293 |
| Diferencia | 2.722 | 3.128 |
| Diferencia (%) | < 1 | < 1 |

## 6. RESULTADOS

Para este trabajo la orientación no fue considerada debido a que la distribución de las ventanas es homogénea. De los resultados obtenidos de las simulaciones en todos los casos no se obtuvieron cargas térmicas de calentamiento, esto debido principalmente a las características de clima cálido y a la temperatura de confort seleccionada de 25 ºC, especificada por a la NOM-008-ENER (2001) para el lugar donde corresponde la simulación, Cuernavaca, Morelos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las cargas térmicas de enfriamiento mensuales en las simulaciones para un vidriado claro y reflectivo variando el RAVP desde 20% hasta 90%. En la Figura 4, se muestran las cargas de enfriamiento para la edificación con un RAVP de 20 % con vidrio claro y reflectivo, se puede observar una disminución en las cargas de enfriamiento para el caso del vidrio reflectivo en todos los meses. Presentandose la carga térmica de enfriamiento mínima mensual para el vidriado claro y reflectivo en febrero con 183.3 y 181.4 MWh, respectivamente. La carga térmica de enfriamiento mensual máxima se tuvo en el mes de marzo con 211.5 y 209.5 MWh, para el vidrio claro y refectivo respectivamente.

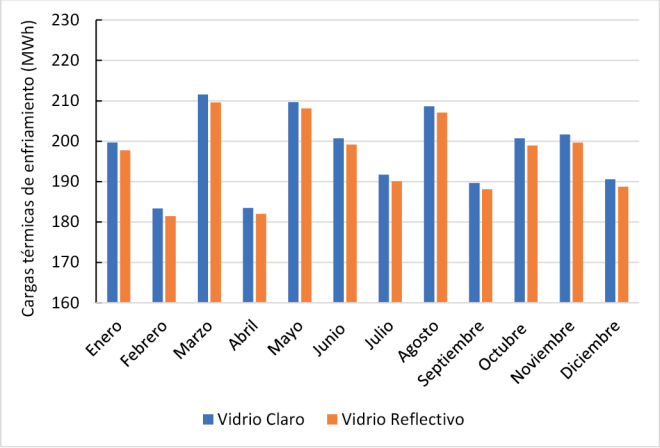



Fig. 4. Cargas térmicas de enfriamiento para un RAVP de 20%.

 ISSN en trámite

En la Figura 5 se muestran las cargas térmicas de enfriamiento para un RAVP de 40% para ambos vidriados, claro y reflectivo. En este caso se sigue observando de manera consistente que las cargas de enfriamiento son mayores para el vidrio claro en todos los meses. La carga térmica mensual mínima se presentó el mes de febrero con 185.3 y 182.0 MWh, para el vidrio calro y reflectivo respectivamente. La carga térmica mensual máxima fue en marzo con 213.7 y 210.2 MWh, para el vidrio claro y reflectivo respectivamente.

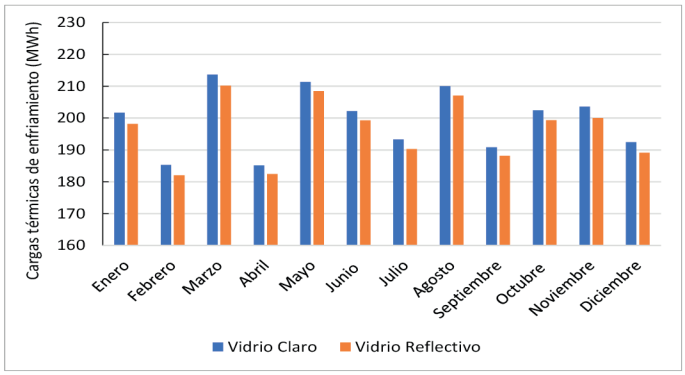



Fig. 5. Cargas térmicas de enfriamiento para un RAVP de 40%.

En la Figura 6, se presentan los resultados para las simulaciones con un RAVP de 70% en este caso el vidriado ya cubre un área mucho mayor de la envolvente, más de la mitad del área total es vidriado por lo que el impacto de este sistema en la edificación es mayor. Se puede observar el mismo comportamiento para ambos tipos de vidriado siendo el vidrio reflectivo el que presenta menores cargas de enfriamiento, pero esta vez la diferencia es mayor que en los casos anteriores entre el vidrio claro y el reflectivo.

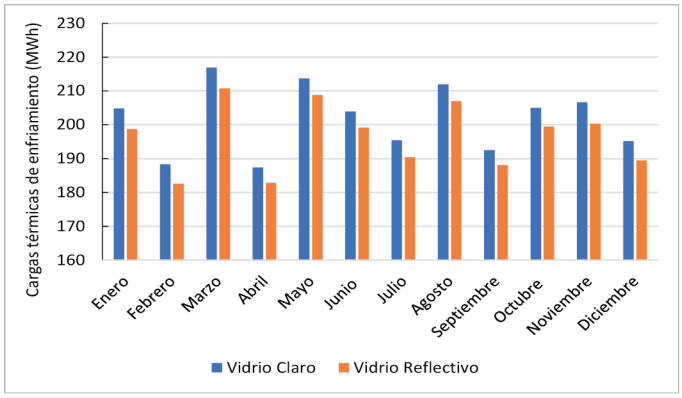



Fig. 6. Cargas térmicas de enfriamiento para un RAVP de 70%.

Presentándose la carga de enfriamiento mínima en el mes de marzo con 188.2 y 182.5 MWh, para el caso del vidrio claro y reflectivo respectivamente. La carga de enfriamiento máxima se presentó el mes de marzo con 217 y 210.5 MWh, para el caso del vidrio claro y reflectivo respectivamente.

En la Figura 7, se muestran los resultados para un RAPV de 90%. Se observa que el vidrio reflectivo continúa siendo el que presenta menores cargas térmicas de enfriamiento y la diferencia es más grande conforme se aumenta el área de vidriado. La carga térmica mensual mínima se presentó en el mes de febrero con 189.7 y 182.8 MWh, para el vidrio claro y reflectivo respectivamente. La carga térmica mensual máxima fue en marzo con 218.3 y 210.9 MWh para el vidrio claro y reflectivo respectivamente.

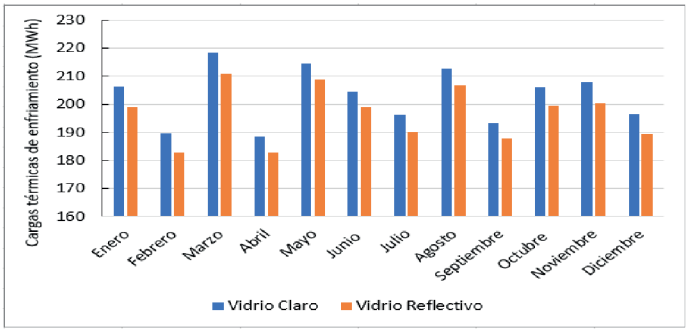



Figura.7. Cargas térmicas de enfriamiento para un RAVP 90%.

## 6.1 REDUCCIÓN DE EMISIONES $CO_2$

Otro de los beneficios que tiene utilizar este tipo de sistemas de vidriado reflectivo para reducir el consumo de energía, es la reducción de las emisiones de $CO_2$. Se determinaron las emisiones indirectas de $CO_2$ la edificación no residencial base de la norma NOM-008-ENER (2001). La reducción de las emisiones de $CO_2$ debido al consumo de energía eléctrica se calculó utilizando el Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional del año 2017 (1 MWh = 0.582 toneladas de CO2) (Comisión Reguladora de Energía 2019). En la Tabla 6, se presenta la reducción de emisiones de $CO_2$ para cada caso en toneladas y el porcentaje que representan para cada caso. Teniendo la menor reducción en el caso con una RAVP de 20% donde solo redujo un 1% de emisiones y la mayor reducción se presenta en el caso con una RAVP de 90% donde se aprecia una reducción de 10%.

**Tabla 6. Reducción de emisiones de CO2**

| RAVP % | vidrio reflectivo ton $CO_2$/año | Vidrio claro ton $CO_2$/año | Diferencia ton $CO_2$/año | Porcentaje % |
|---|---|---|---|---|
| 20 | 1367.9 | 1380.0 | 12.0 | 1% |
| 40 | 1370.3 | 1392.1 | 21.8 | 2% |
| 70 | 1372.0 | 1409.3 | 37.3 | 3% |
| 90 | 1372.0 | 1517.0 | 145.0 | 10% |

 ISSN en trámite

## 7. CONCLUSIONES

En este estudio se presentó un análisis térmico de la influencia que tiene la RAVP para dos tipos de vidriado en el consumo energético de edificaciones no residenciales, haciendo uso de herramientas de simulación energética. Estos resultados nos permiten concluir que, si bien ambos tipos de vidriado presentan un incremento en el consumo energético a medida que se incrementa el RAVP, el vidriado reflectivo resulta ser una mejor opción que el vidrio claro. En todos los casos simulados el vidrio reflectivo mostró una reducción de las cargas térmicas de enfriamiento, teniéndose la mayor reducción el caso de un RAVP de 90%, con respecto al caso base con vidrio claro. En lo que respecta a las cargas de calentamiento, no se presentaron para ninguno de los casos. Se confirma que las menores cargas térmicas de enfriamiento se presentaron en el caso de un RAVP de 20%, con vidrio reflectivo. Por lo que podemos decir que el vidrio reflectivo resulta una mejor opción en términos generales. Estas disminuciones en cargas térmicas de enfriamiento se traducen en un ahorro energético. Si bien los resultados son satisfactorios en cuanto a la reducción de consumo energético se refiere, se debe mencionar que esto solo es para un clima cálido, como el de Cuernavaca. El vidrio reflectivo tiene un gran desempeño térmico para su uso en edificaciones no residenciales, esto debido a que tiene un bajo valor de SHGC y de factor-U lo que provoca que reduzca las ganancias de calor y una gran resistencia a la transferencia de este. Por otra parte, el vidrio reflectivo también mostró ser una mejor opción al dar beneficios adicionales, tales como la reducción de $CO_2$ debido a la disminución del consumo de energía destinada al confort. Como se observó, el caso con una mayor reducción de $CO_2$ fue el caso con una RAVP de 90% con vidrio reflectivo (en comparación con el caso base de vidrio claro), con una reducción de 77.5 MWh. Los resultados muestran que al incrementar el RAVP se incrementan las cargas térmicas de enfriamiento y las emisiones de $CO_2$, tanto en el caso de vidrio reflectivo y claro. Sin embargo, al utilizar el vidrio reflectivo en un edificio no residencial con una RAVP de 90% se pueden reducir las emisiones de $CO_2$ hasta en 10%, en comparación con el caso base de vidrio claro y la misma RAVP. Al reducir la emisión de estos contaminantes se contribuye a la conservación del medio ambiente, lo que mejora la calidad del aire y de las condiciones medioambientales de las ciudades.

## 8. REFERENCIAS

ANSI/ASHRAE Standard 140, (2011). Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).

Baetens, R., Jelle, B.P., Gustavsen, A. (2010). Properties, requirements, and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volumen (94), 87-105.

Comisión Reguladora de Energía (2019). Factor de Emisión Del Sistema Eléctrico Nacional 2018.Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Sitio web, https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/442910/Aviso_Factor_de_Emisiones_2018.pdf

DesingBuilder V7.0 (2022). Sitio web https://designbuilder.co.uk/

EnergyPlus (2022). Department of Energy, sitio web https://www.energy.gov

J. W. Lee, H. Jung, J. Park, J. B. Lee y Y. Yoon. (2013) Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements, Renewable Energy **50** 522.

Kersken, M. (2021). Method for the climate-independent determination of the solar heat gain coefficient (SHGC; g-value) of transparent façade and membrane. *Energy & Buildings*, Volumen (293), 110866.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, Volumen (15), 259-263.

Long, L. y Ye, H. (2014). How to be smart and energy efficient: A general discussion on thermochromic windows. *Scientific Reports,* Volumen (4), 6427.

Meteonorm v8 (2022). Sitio web, www.meteonorm.com

Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M.M., Gohari, M., Majid, M.Z.A. (2015). A global review of energy consumption, $CO_2$ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten $CO_2$ emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* Volumen (43), 843–862.

NOM-008-ENER-2001, NORMA OFICIAL MEXICANA. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales

Polar. H., Álvarez. G., Simá. E., Chagolla. M., (2015) Estudio de la razón de aspecto de área vidriada-pared (RAVP) en edificaciones no residenciales, MEMORIAS DEL XXI CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM (2015)

 ISSN en trámite

# Absorción de energía de perfiles elípticos bi-tubulares reforzados sometidos a flexión

**Quirino Estrada*, Dariusz Szwedowicz**, Elva Reynoso*, Jesús Silva*, Lara Wiebe*, Abel Quezada*, Elvis Coutiño***, Julio Vergara-Vázquez****, Oscar Flores***

**Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Ciudad Juárez, Chihuahua México (quirino.estrada@uacj.mx, elva.reynoso@uacj.mx, jesilva@uacj.mx, lara.wiebe@uacj.mx, abquezad@uacj.mx, al183089@alumnos.uacj.mx)*
***Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México (dariusz.sd@cenidet.tecnm.mx)*
**** Instituto de Estudios Superiores de Jocotitlán, Jocotitlán, Estado de México, México, (elvis.coutino@tesjo.edu.mx)*
*****Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Palenque, Instituto Politécnico Nacional (jvergarav@ipn.mx)*

Resumen: Durante un choque automotriz lateral diversas partes del chasis son sometidas a cargas de flexión. En este sentido, el presente artículo propone el diseño y avaluación numérica de perfiles bi-tubulares elípticos reforzados sometidos a cargas de laterales. Durante el análisis se evaluó el efecto del reforzamiento de los perfiles por platos, así como por rigidez geométrica (perfil interno) en la absorción de energía. Los perfiles fueron fabricados con aluminio 6063-T5 y evaluados a través de un ensayo de flexión de tres puntos utilizando el software de elementos finitos Abaqus. La efectividad de perfiles bi-tubulares elípticos respecto a circulares fue demostrada. El mejor desempeño en cuanto a la eficiencia a la fuerza de aplastamiento (CFE) con 0.80 se obtuvo al reforzar el perfil elíptico con costillas en forma horizontal.

*Keywords:* Choques automotrices, perfiles bi-tubulares elípticos, flexión, prueba de tres puntos, FEM

## 1. INTRODUCIÓN

Durante un choque automotriz parte de la energía mecánica es transmitida a los pasajeros. En este sentido los pasajeros sufren desde lesiones graves hasta la muerte (Khatri, N. et *al*., 2018). Con el objeto de contrarrestar tales efectos el empleo de estructuras de pared delgada como sistemas de absorción de energía está en incremento (Rogala, et *al*., 2021; Ferdynus, et *al.,* 2020). Las estructuras de pared delgada absorben energía a través de la deformación plástica que sufren (Huang et *al.,* 2020). A través de los años diversas configuraciones de estructuras de pared delgada han sido propuestas tales como perfiles simples (Shojaeifard, et *al.,* 2012), bi-tubulares (Yin et *al.,* 2011) así como diversas geometrías (Ghadianlou et *al.,* 2013; Tang et *al.,* 2016), circulares (Mamalis, et *al.,* 2006), cuadradas (Zhang et *al.,* 2016), compuestas (Sookchanchai et *al.,* 2021) y elípticas (Estrada, et *al.,* 2022). Sin embargo, la efectividad de los perfiles bi-tubulares respecto a los simples ha sido corroborada (Goel, 2015). Un perfil bi-tubular está formado por dos perfiles de igual o diferente geometría atados por costillas de unión, que a su vez sirven como elementos de rigidez. En este sentido Vergara et *al.,2019* analizó numéricamente a través de pruebas de tres puntos perfiles simples y compuestos. Los perfiles compuestos tuvieron base circular con un perfil interno poligonal. En todos los casos los perfiles compuestos tuvieron un mejor desempeño que sus contrapartes simples. Respecto a perfiles compuestos el mejor desempeño se obtuvo al combinar un perfil circular con uno triangular con una CFE igual a 0.86. Li et *al., 2015* realizaron un análisis comparativo entre perfiles circulares, cuadrados simples y dobles. Adicionalmente verificaron la viabilidad de colocar espuma de relleno. Como resultado los perfiles concéntricos rellenos con espumas mostraron un mejor desempeño respecto a los simples con y sin espuma. Después de evaluarlos a través de una prueba de tres puntos, el mejor desempeño se obtuvo con perfiles bi-tubulares circulares rellenas con espuma. Estrada et *al.,2019* comparó numéricamente las características de absorción de energía de perfiles compuestos sometidos a flexión. Los perfiles evaluados tienen como base un perfil cuadrado externo mientras formas poligonales y circulares fueron empleadas como perfil interno. Después de la evaluación a través de una prueba de tres puntos el mejor desempeño se obtuvo con un perfil compuesto con base externa e interna cuadrada con una CFE de 0.8720. Respecto a perfiles elípticos, Estrada et *al.,*2022 realizó un análisis experimental para evaluar el efecto de la relación de aspecto (β) y platos de rigidez en la absorción de energía y eficiencia de la fuerza de aplastamiento. Como conclusión determinaron un mejor desempeño para estructuras con β mayores a 1. Finalmente, como se ha descrito anteriormente el empleo de perfiles bi-tubulares incrementa la capacidad de absorción de energía de las estructuras de pared delgada. Sin embargo, los estudios para el caso de flexión han sido poco analizada respecto a sus análogos axiales, de la misma manera el uso de perfiles con base cuadrada es la más frecuente en los estudios. Por tanto, en este trabajo se plantea el estudio de perfiles bi-tubulares elípticos reforzados sometidos a flexión. La investigación analiza el efecto de platos de rigidez como elementos de reforzamiento. Adicionalmente se analiza la

 ISSN en trámite

viabilidad del uso de perfiles bi-tubulares con estructuras de geometrías diferentes.

## 2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL ALUMINIO 6063-T5

La precisión de los resultados numéricos depende del correcto modelado de las propiedades mecánicas del material. En todos los casos el material de fabricación de los perfiles elípticos bi-tubulares se utilizó el aluminio 6063-T5. La caracterización de este se realizó a través de tres ensayos de tensión basados en la norma ASTM E8. La velocidad de ensayo fue de 2 mm/min. Las probetas se obtuvieron directamente de un perfil circular en la dirección de la extrusión del tubo. Los resultados obtenidos se muestran con la curva esfuerzo vs deformación la cual se presenta en la Figura 1. Así mismo en la Tabla 1 se presenta un resumen de las propiedades mecánicas calculadas.

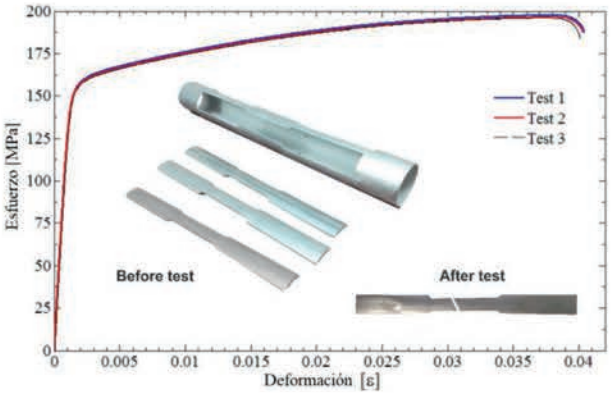



Fig. 1. Curva esfuerzo vs desplazamiento para Al 6063-T5

Tabla 1. Propiedades mecánicas para Al 6063-T5

| | Módulo de Young [MPa] | Coeficiente Poisson | Densidad [kg/m$^3$] |
|---|---|---|---|
| Elasticidad | 66940 | 0.33 | 2700 |
| Plasticidad | Límite de fluencia [MPa] | | |
| | 158.79 | | |

## 3. VALIDACIÓN DE UN MODELO DISCRETO DE PRUEBA DE TRES PUNTOS

El presente artículo se basa en estudio numérico usando el software de elementos finitos Abaqus. En este sentido es necesario validar un primer modelo discreto para asegurar la precisión y viabilidad de los resultados numéricos. El modelo numérico a evaluar es un ensayo de flexión de tres puntos de un perfil circular. Un perfil circular se ha elegido desde que el circulo es un caso especial de elipse cuyos dos focos se sitúan en su centro, tiene una relación de aspecto de 1 (Estrada et *al.,* 2022). Considerando el modelo discreto, el perfil se modeló con elementos S4R con propiedades elastoplásticas para el aluminio 6063-T5 (ver sección 2). Sus dimensiones fueron diámetro (D) de 38.1 mm, longitud (L) de 500 mm y espesor (t) de 1.5 mm. Por su parte los soportes y punzón se modelaron como cuerpos rígidos (R3D4). Las condiciones de contacto se modelaron con coeficientes de fricción (CF) de 0.05 entre el perfil y los elementos rígidos. Mientras que un CF de 0.15 para simular el auto-contacto entre los pliegues del perfil. Los detalles del modelo discreto incluyendo condiciones de la frontera y cargas se presentan en la Figura 2. Finalmente, como resultado de un análisis de convergencia de malla se utilizó un tamaño de malla de 5 mm con refinamiento al centro del perfil de 2.5 mm. La prueba experimental se realizó de manera cuasi-estática, haciendo uso de la máquina universal Shimadzu AG-X plus 100 kN utilizando una velocidad en el identador de 6mm/s. La prueba se llevó a un desplazamiento máximo de 80 mm.

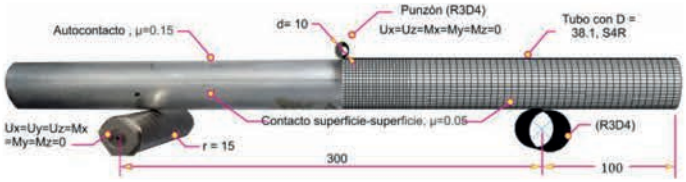



Fig. 2. Modelo discreto de prueba de tres puntos

La comparación de los resultados numéricos y experimentales para la fuerza vs desplazamiento se muestra en la Figura 3. En ambos casos se presenta un aumento gradual de la fuerza hasta alcanzar 2.3 kN. Posteriormente se inicia un decaimiento exponencial suave lo cual significa la pérdida de carga del tubo.

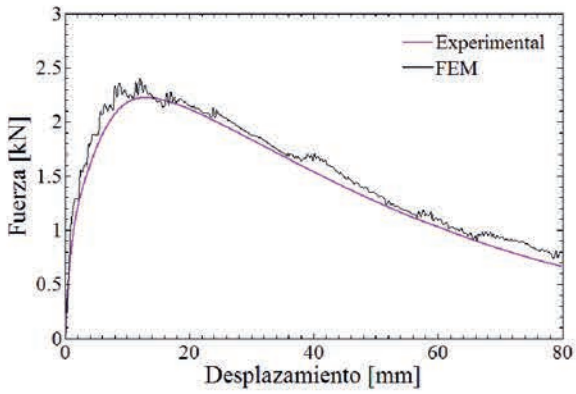



Fig. 3. Comparación de la curva fuerza vs desplazamiento

El modo de deformación es caracterizado por una línea de identación central con dos pliegues laterales exteriores (Ver Figura 4). Finalmente, a partir de las diferencias calculadas para la fuerza de aplastamiento (>3%) el modelo queda validado.

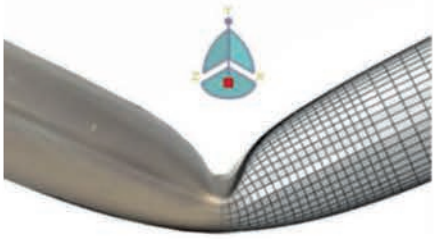


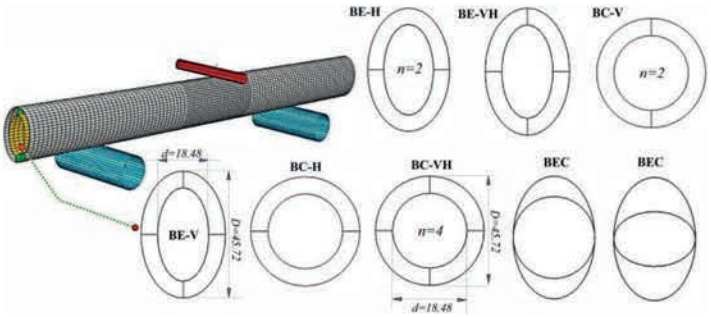
Fig. 4. Comparación del modo de deformación final experimental y numérico

 ISSN en trámite

## 4. ANÁLISIS NUMÉRICO DE PERFILES BI-TUBULARES ELÍPTICOS REFORZADOS

El principal objetivo del presente artículo es evaluar el efecto del reforzamiento en perfiles bi-tubulares elípticos por costillas y por rigidez geométrica (perfil interno). En este sentido se presentan perfiles tanto circulares como elípticos con diferentes números de costillas (n) con orientación vertical (V), horizontal (H) o combinadas (VH). Para el caso de perfiles elípticos se ha elegido una relación de aspecto $\beta = 1.50$ para el perfil externo y $\beta = 1.82$ para el perfil interno, ambas relaciones se encuentran dentro de los límites de dimensionamiento de tubos elípticos para garantizar un máximo desempeño en términos de $E_a$ (Estrada *et* al., 2022). La longitud L de los perfiles fue 500 mm. En todos los casos las estructuras fueron fabricadas con Al 6063-T5 y sometidas a un ensayo de flexión de tres puntos. El reforzamiento por rigidez geométrica del perfil interno consistió en la interacción directa del perfil interno con el externo (sin costilla). Con el objeto de hacer una comparación realista todas las estructuras presentan la misma masa (234 gr). Detalles de los perfiles evaluados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Perfiles bi-tubulares elípticos evaluados




| Cod | Base | D | d | t | n |
|---|---|---|---|---|---|
| BE-V | E | 45.72 | 18.48 | 0.801 | 2 |
| BE-H | E | 45.72 | 18.48 | 0.801 | 2 |
| BE-VH | E | 45.72 | 18.48 | 0.757 | 4 |
| BC-V | C | 38.1 | 26.1 | 0.810 | 2 |
| BC-H | C | 38.1 | 26.1 | 0.810 | 2 |
| BC-VH | C | 38.1 | 26.1 | 0.767 | 4 |
| BEC | E | 45.72 | - | 0.799 | - |
| BEE | E | 45.72 | - | 0.859 | - |

Los perfiles presentados en la Tabla 2 se evaluaron a través de indicadores de resistencia al impacto tales como: Carga pico ($P_{max}$), fuerza promedio ($P_m$), energía absorbida ($E_a$), eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE) y energía especifica (SEA), donde F es la fuerza de aplastamiento, m la masa y $\delta$ es el desplazamiento.

Tabla 3. Indicadores de resistencia al impacto

| $P_m$ [kN] | $E_a$ [kJ] | CFE [-] | SEA [J/gr] |
|---|---|---|---|
| $P_m = \frac{E_a}{\delta}$ | $E_a = \int_0^{\delta} F.d\delta$ | $CFE = \frac{P_m}{P_{max}}$ | $SEA = \frac{E_a}{m}$ |

## 5. RESULTADOS

El comportamiento mecánico de las estructuras bi-tubulares se obtuvo a través del análisis de las curvas fuerza -desplazamiento (ver Figura 5). En todos los casos se observa un aumento de la fuerza de flexión hasta alcanzar un valor máximo $P_{max}$ (2-2.75 kN) para posteriormente decrecer en forma exponencial. Los perfiles bi-tubulares con base elíptica mostraron una mejor capacidad de carga respecto a los perfiles circulares. En este caso el perfil BE-VH el cual hace referencia a un reforzamiento tanto vertical como horizontal presentó la máxima resistencia $P_{max}$ = 2.736 kN. Mientras que la menor resistencia se presentó con el perfil bi-tubular circular (BC-H).

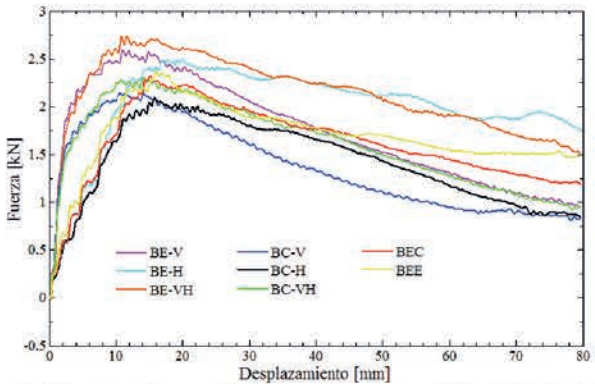



Fig. 5. Curva esfuerzo-deformación para perfiles bi-tubulares

La absorción de energía ($E_a$) se muestra en la Figura 6, la cual es calculada obteniendo el área bajo la curva. En este sentido el reforzamiento de los perfiles con costillas tanto verticales como horizontales maximizan la capacidad de carga de los perfiles bi-tubulares.

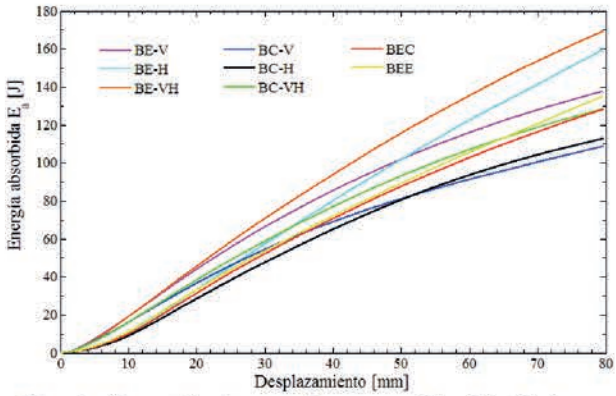



Fig. 6. Absorción de energía para perfiles bi-tubulares

 ISSN en trámite

La capacidad de absorción de energía depende del modo de colapso de las estructuras. En este sentido todas las estructuras presentaron un modo deformación similar, el cual es caracterizado por una línea central con dos pliegues adyacentes (ver Figura 7-9). Considerando la sección transversal esta sufre un proceso de movilización, la cual es en menor o mayor grado en función del tipo de reforzamiento, número de costillas y alineación de estas.

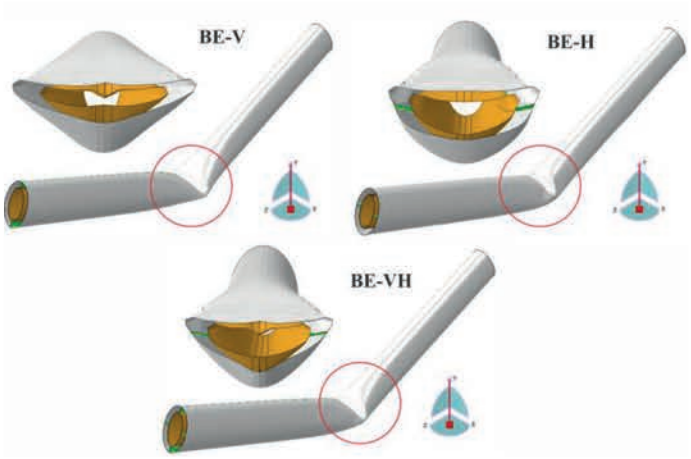



Fig. 7. Modo de deformación para perfiles bi-tubulares con base elíptica

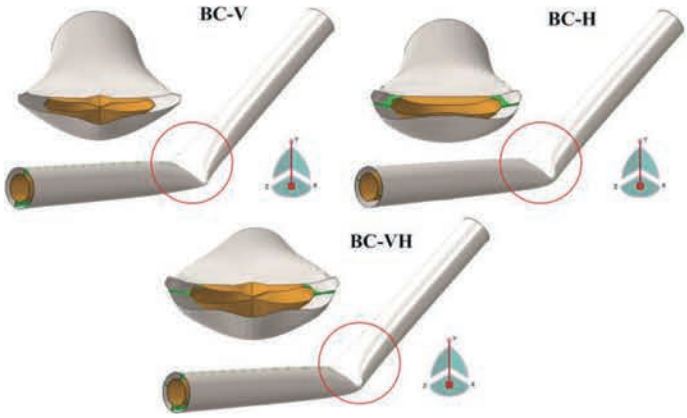



Fig. 8. Modo de deformación para perfiles bi-tubulares con base circular

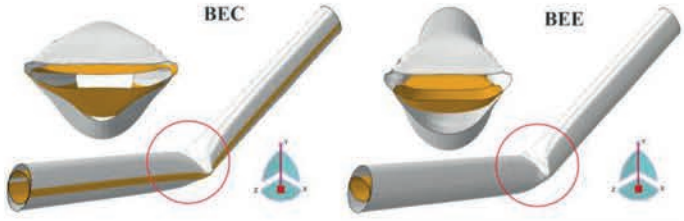



Fig. 9. Modo de deformación para perfiles bi-tubulares con reforzamiento por rigidez geométrica (perfil interno)

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados calculados para los indicadores de resistencia al impacto. Considerando el valor de $P_{max}$ este es máximo cuando los perfiles bi-tubulares se refuerzan con costillas verticales y horizontales tal y como se demostró en el perfil BE-VH y BC-VH con 2.736 kN y 2.308 kN, respectivamente. Un reforzamiento con costillas en disposición horizontal tiene un pobre desempeño, siendo el valor de $P_{max}$ más bajo de 2.088 kN (BC-H). Respecto a la energía absorbida ($E_a$) los perfiles bi-tubulares con base elíptica tienen un mejor desempeño que los circulares. En este sentido presentan un aumento de $E_a$ de entre 24.13% al 55.56% respecto al valor más bajo (108.75 J). Lo anterior queda demostrado al analizar los valores de fuerza promedio ($P_m$) donde el valor más bajo igual a 1.359 kN se calculó para el perfil bi-tubular con base circular BC-V. Recordando que todos los perfiles tienen la misma masa (234 gr) la efectividad de la forma elíptica con reforzamiento en dirección axial y longitudinal quedó demostrado desde que se calculó un valor máximo de SEA igual a 0.723 J/gr.

Tabla 4. Resultados numéricos para los perfiles bi-tubulares con refuerzo

| Código | Pmax (kN) | Pm (kN) | Ea (J) | SEA (J/gr) | CFE |
|---|---|---|---|---|---|
| BE-V | 2.599 | 1.720 | 137.64 | 0.588 | 0.663 |
| BE-H | 2.494 | 1.993 | 159.50 | 0.681 | 0.800 |
| BE-VH | 2.736 | 2.116 | 169.31 | 0.723 | 0.773 |
| BC-V | 2.130 | 1.359 | 108.75 | 0.464 | 0.638 |
| BC-H | 2.088 | 1.410 | 112.87 | 0.482 | 0.675 |
| BC-VH | 2.308 | 1.605 | 128.47 | 0.549 | 0.695 |
| BEC | 2.319 | 1.604 | 128.33 | 0.548 | 0.691 |
| BEE | 2.363 | 1.687 | 135.00 | 0.576 | 0.713 |

Si se considera que un valor alto de $E_a$ no necesariamente significa un mejor desempeño de la resistencia al impacto de las estructuras, es necesario analizarlas en términos de la eficiencia a la fuerza de aplastamiento (CFE). Un valor cercano a 1 de CFE indica un valor óptimo. Si se descarta el valor de CFE para un reforzamiento vertical (BE-V), todas las estructuras bi-tubulares con base elíptica presentan un incremento de CFE de 11.75% hasta 25.39% respecto al valor más bajo de CFE igual a 0.638 (BC-V). El máximo valor de CFE igual a 0.80 se obtuvo con un perfil bi-tubular con base elíptica con reforzamiento horizontal (BE-H). Esto significa que el perfil BE-H presenta un valor pico relativamente bajo con una resistencia a la flexión ($P_m$) aceptable lo cual permite calcular una menor diferencia entre $P_{max}$ y $P_m$. Lo anterior forma parte de los principales requerimientos en el diseño estructural, desde que al momento de un impacto se requiere un inicio suave para disminuir el efecto de las fuerzas inerciales en los pasajeros. Por tanto, se recomienda el diseño de estructuras bi-tubulares con base elíptica ($\beta = 1.50$ para el perfil externo y $\beta = 1.82$ para el perfil interno) reforzadas horizontalmente para el diseño de estructuras sometidas a flexión.

 ISSN en trámite

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el efecto de reforzamiento de estructuras bi-tubulares elípticas en la capacidad de absorción de energía. En el estudio se analizó el refuerzo a través de platos, así como refuerzo por rigidez geométrica a través perfil interno. Después del análisis numérico se concluye:

1. El empleo de costillas/platos juegan un rol importante en la capacidad de absorción de energía, carga pico y eficiencia a la fuerza de aplastamiento.

2. Sin importar la base geométrica de las estructuras bi-tubulares el empleo de costillas verticales y horizontales de las estructuras propuestas mejoran la capacidad de carga hasta 31.03% y 11.05% respecto al valor más bajo calculado BC-H (2.088 kN).

3. Los perfiles elípticos tienen un mejor desempeño para Ea, SEA respecto a sus pares circulares. Se calculó una mejora de entre 24.13% al 55.56% respecto al valor más bajo (BC-V).

4. Al comparar las perfiles bi-tubulares de sección elíptica con circular, se observa que la primera configuración presenta un mejor comportamiento de CFE. En ese sentido el perfil con mejor característica es el BE-H con dos costillas horizontales que presentan un valor de CFE de 0.80.

5. Respecto al empleo de refuerzo a través de la rigidez del perfil interno (forma y disposición), un perfil interno elíptico tiene un mejor desempeño de CFE respecto al circular (3.18%)

6. La capacidad de absorción de energía de los perfiles bi-tubulares se encuentra inicialmente en función de la forma geométrica seguido de la orientación de las costillas.

7. Finalmente a partir de los hallazgos encontrados, el empleo de perfiles bi-tubulares con el empleo de costillas horizontales es altamente recomendado para el diseño de estructuras sometidas a flexión para la disipación de energía.

## REFERENCIAS

Estrada, Q., Szwedowicz, D., Tran, T., Rodriguez-Mendez, A., Elias-Espinosa, M., Gómez-Vargas, O. A., & Partida-Ochoa, G. (2022). Bending crashworthiness of elliptical tubes with different aspect ratio and stiffeners. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 120(9), 6661-6680.

Estrada, Q., Szwedowicz, D., Gutierrez-Wing, E., Silva-Aceves, J., Rodriguez-Mendez, A., Elias-Espinosa, M., ... & Bedolla-Hernandez, J. (2019). Energy absorption of single and multi-cell profiles under bending load considering damage evolution. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 233(8), 2120-2138.

Ferdynus, M., Rozylo, P., & Rogala, M. (2020). Energy absorption capability of thin-walled prismatic aluminum tubes with spherical indentations. Materials, 13(19), 4304.

Ghadianlou, A., & Abdullah, S. B. (2013). Crashworthiness design of vehicle side door beams under low-speed pole side impacts. Thin-Walled Structures, 67, 25-33.

Goel, M. D. (2015). Deformation, energy absorption and crushing behavior of single-, double-and multi-wall foam filled square and circular tubes. Thin-walled structures, 90, 1-11.

Huang, Z., & Zhang, X. (2020). Crashworthiness and optimization design of quadruple-cell Aluminum/CFRP hybrid tubes under transverse bending. Composite Structures, 235, 111753.

Khatri, N. A., Shaikh, H., Maher, Z. A., Shah, A., & Ahmed, S. F. (2018). A review on optimization of vehicle frontal crashworthiness for passenger safety. International Journal of Engineering & Technology, 7(2.34), 1-4

Li, Z., & Lu, F. (2015). Bending resistance and energy-absorbing effectiveness of empty and foam-filled thin-walled tubes. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 34(9), 761-768.

Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Ioannidis, M. B., & Kostazos, P. K. (2006). Bending of cylindrical steel tubes: numerical modelling. International Journal of Crashworthiness, 11(1), 37-47.

Rogala, M., Ferdynus, M., Gawdzińska, K., & Kochmański, P. (2021). The Influence of Different Length Aluminum Foam Filling on Mechanical Behavior of a Square Thin-Walled Column. Materials, 14(13), 3630.

Shojaeifard, M. H., Zarei, H. R., Talebitooti, R., & Mehdikhanlo, M. (2012). Bending behavior of empty and foam-filled aluminum tubes with different cross-sections. Acta Mechanica Solida Sinica, 25(6), 616-626.

Sookchanchai, K., Hlaing, S. S., & Uthaisangsuk, V. (2021). A geometrical parametric study of side door reinforced beams under lateral impact load. International Journal of Crashworthiness, 1-16.

Tang, T., Zhang, W., Yin, H., & Wang, H. (2016). Crushing analysis of thin-walled beams with various section geometries under lateral impact. Thin-Walled Structures, 102, 43-57.

Vergara, J. (2019). Disipación de energía por deformación plástica en estructuras de pared delgada de sección compuesta bajo cargas a flexión. Jornada de Ciencia y Tecnologia Aplicada.

Yin, H., Wen, G., Hou, S., & Chen, K. (2011). Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of honeycomb-filled single and bitubular polygonal tubes. Materials & Design, 32(8-9), 4449-4460.

Zhang, X., Zhang, H., & Wang, Z. (2016). Bending collapse of square tubes with variable thickness. International Journal of Mechanical Sciences, 106, 107-116.

 ISSN en trámite

# Estudio numérico y experimental de ventilación cruzada en una habitación de una casa del Estado de Morelos

**E. G. Ortiz Salvador*,[1], E. G. Ricoy Zárate*,**
**L. G. Carreto Hernández*, P. Sotelo Rodríguez*, S. L. Moya Acosta*, R. Campos Amezcua***

** Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Mor., CP 62490, México*

*[1](e-mail: m21ce002@cenidet.tecnm.mx).*

**Resumen**: Este artículo presenta un estudio numérico-experimental de la ventilación cruzada en una habitación de Cuernavaca, Morelos, México. Se evaluaron los cambios de aire por hora (ACH) y el confort térmico dentro de la habitación. Las simulaciones numéricas se realizaron con el software ANSYS Fluent. Para la obtención de datos del proceso experimental se realizó la construcción de una tarjeta adquisidora de datos desarrollada en el sistema Arduino, posteriormente se instrumentó la habitación bajo estudio. Los resultados del proceso experimental se utilizaron para validar los resultados numéricos de temperatura en tres puntos diferentes dentro de la habitación, obteniendo un porcentaje de desviación media de 0.26. Además, se encontró que los ACH fueron de 21.52, siendo adecuados ya que están por encima de los 20 ACH que recomienda la norma ASHRAE 62.2. Sin embargo, no se alcanzaron condiciones de confort térmico para los ocupantes. Se recomienda combinar la ventilación cruzada con otro sistema de ventilación natural.

Palabras clave: Ventilación cruzada, Confort térmico, CFD, Arduino.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el cambio climático, la sobrepoblación, la urbanización intensiva y el uso excesivo de fuentes convencionales de energía ha desencadenado serios problemas ambientales, técnicos y sociales sobre el sector de las edificaciones. Hasta ahora, el 36% del consumo de energía mundial y el 39% de los gases de efecto invernadero provenientes de procesos relacionados con la energía son atribuidos al sector de las edificaciones [1]. Además, los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) representan el 70% del consumo total de electricidad en este sector [2], ya que son utilizados para brindar confort térmico y mejorar la calidad del aire interior. Sin embargo, la ventilación natural se puede utilizar para mejorar la calidad del aire interior, eliminar los contaminantes de los espacios y eliminar el calor de un edificio durante el día o la noche, propiciando así condiciones de confort para los ocupantes [3]. La ventilación cruzada ha demostrado ser capaz de suministrar cambios de aire por hora (ACH) en el intervalo de 5 a 22 [3]. Sin embargo, su eficiencia está fuertemente relacionada con la cantidad de muros internos, obstáculos y el número y tamaño de aberturas. Zhang et al. [4] evaluaron dos, tres y cuatro aberturas en una habitación con ventilación cruzada. Encontraron que dos aberturas aumentan la tasa de ventilación y mejora la circulación del aire interior en comparación con las configuraciones de tres y cuatro aberturas. Además, la presencia de paredes y bloqueos interiores siempre condujo a menores tasas de ventilación. Nasrollahi y Ghobadi [5] evaluaron el confort térmico en un edificio con ventilación cruzada. Encontraron que la ubicación correcta de las aberturas mejora el confort térmico al aumentar el flujo de aire. Sin embargo, los resultados mostraron que la demanda de energía de refrigeración en climas cálidos es alta y que el uso de sistemas de ventilación natural es beneficioso, pero que, para ciertas condiciones, estos sistemas de ventilación por sí solos, no son capaces de propiciar confort térmico.

El presente trabajo busca evaluar la ventilación cruzada en una habitación de una casa del estado de Morelos, México. La casa es de dos pisos y está construida con materiales típicos de la región. La planta baja está constituida por la cocina, el comedor, la sala y la estancia. La planta alta cuenta con cuatro recámaras, donde generalmente las habitaciones ubicadas al este, presentan condiciones de disconfort térmico en las temporadas de primavera y verano. Este trabajo se centra únicamente en la habitación sureste que es la más caliente de la casa, ver Figura 1.1. El estudio de ventilación cruzada se realizará para las mejores condiciones de velocidad del viento, para poder establecer si para estas condiciones de ventilación tan favorables, es posible además obtener confort térmico. De no ser así se confirmaría la necesidad de incorporar otro sistema pasivo de ventilación natural.

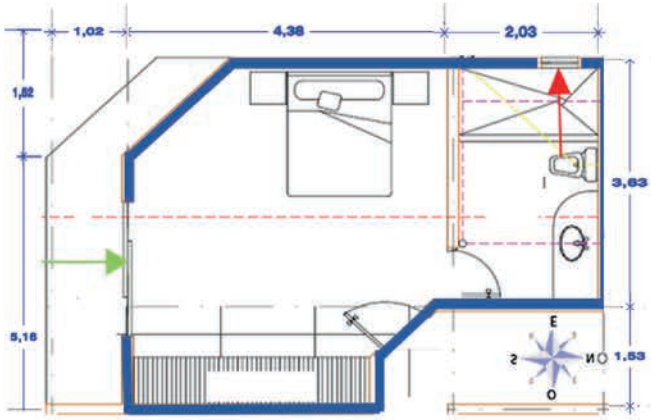



Figura 1.1 Plano de la habitación bajo estudio.

En este trabajo se desarrolla un estudio experimental y simulaciones numéricas para determinar el comportamiento del flujo de aire y la temperatura dentro de la habitación, para de esta manera evaluar la ventilación y confort térmico de acuerdo con los lineamientos ASHRAE 62.2 [6] e ISO7730 [7], respectivamente.

ISSN en trámite

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En esta sección se presentan el equipo y materiales utilizados para la instrumentación, la programación y construcción del adquisidor de datos, y las pruebas de campo.

### 2.1 Equipo, materiales e instrumentación

La habitación fue instrumentada para monitorear la temperatura en su interior y en las superficies internas de las paredes que la conforman, así como en el centro de la habitación (incluyendo la humedad relativa en este punto). También se midió la temperatura y velocidad del aire en la ventana de entrada de la habitación (ventana sur). La Tabla 1 muestra los materiales e instrumentos utilizados en el desarrollo experimental, así como sus características. Estos fueron seleccionados de acuerdo con su precisión y costo.

**Tabla 1 Materiales e instrumentos utilizados.**

| Materiales e instrumentos | Características |
|---|---|
| Arduino Nano | Pinout: 14 pines digitales (6 PWM) y 8 pines analógicos |
| Sensor de temperatura DS18B20 | Su precisión es de ±0.5°C (de -10°C a +85°C) |
| Cable estañado AWG 080-417 | Estañado sencillo |
| Sensor de temperatura y humedad DTH22 | Rango de medición de temperatura: -40°C a 80 °C<br>Rango de medición de humedad: De 0 a 100% RH |
| Resistencia | 1.2 KΩ |
| Fuente de alimentación | 5V |
| Anemómetro UT363BT | Velocidad del viento de 0 a 30 m/s<br>Precisión +/- 5% rdg +0.5<br>Temperatura -10 °C a 50 °C<br>Precisión +/- 2°C<br>Resolución 0.1 m/s |

La Figura 2.1 muestra la posición de los sensores adheridos a las superficies interiores de los muros. El anemómetro UT363BT registró la medición de la temperatura y la velocidad del flujo de aire en la ventana de entrada (Sensor 10), el sensor DTH22 registró la medición de la temperatura y humedad en el centro de la habitación (sensor 7). Los sensores DS18B20 registraron la temperatura interior de las paredes y techo (1-5, 6), y también registraron temperatura en el interior de la habitación en los extremos este y oeste (sensores 9 y 8). La adquisición de datos se realizó por medio de Arduino nano en conjunto con el capturador PLX-DAQ. La nomenclatura utilizada en este trabajo para cada sensor se muestra en la Tabla 2.

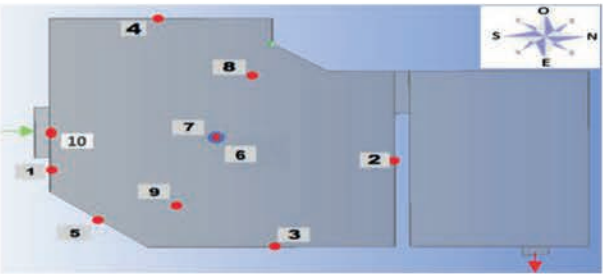



**Figura 2.1 Ubicación de los sensores en la habitación experimental.**

**Tabla 2 Nomenclatura utilizada para cada sensor.**

| Numeración | Nomenclatura | Descripción |
|---|---|---|
| 1 | TMS | Temperatura interior muro sur |
| 2 | TMN | Temperatura interior muro norte |
| 3 | TME | Temperatura interior muro este |
| 4 | TMO | Temperatura interior muro oeste |
| 5 | TMI | Temperatura interior muro este en diagonal |
| 6 | Ttecho | Temperatura interior techo |
| 7 | TC | Temperatura en el centro de la habitación |
| 8 | TCO | Temperatura en el lado oeste de la habitación |
| 9 | TCE | Temperatura en el lado este de la habitación |
| 10 | Sv | Sensor de velocidad |

### 2.2 Programación del adquisidor de datos

El algoritmo que determina la medición de los sensores DS18B20 y DTH22 se describe a continuación: Se declaran las variables a utilizar y las librerías necesarias para el funcionamiento de los sensores dentro del programa. Se declaran tres variables enteras de interés y una constante de pin de datos para conectar los sensores de temperatura. Aplicando la función *Serial.println* se establecen las etiquetas que llevan nuestros datos en el proceso de medición de variables de interés. También se declaran las variables para almacenar los valores correspondientes al orden de conexión de los sensores con su respectiva ubicación, basado en los ejes cardinales. La comunicación serial de datos se realizó por medio de Arduino y la herramienta de captura de datos PLX-DAQ, donde este último permitió la visualización de las variables capturadas en Excel.

### 2.3 Construcción de la tarjeta adquisidora

El diseño electrónico del adquisidor de datos se llevó a cabo en el software PROTEUS, en este se realizaron las conexiones de los sensores DS18B20 y DHT22 con Arduino nano, ver Figura 2.2. Las resistencias utilizadas fueron seleccionadas de acuerdo con la distancia entre el sensor y el adquisidor de datos. Se establecieron las resistencias *pull up* de 4.7 kΩ adecuadas para evitar el ruido electrónico en nuestro circuito debido a que la distancia de cableado es de 5 metros, ver Tabla 3.

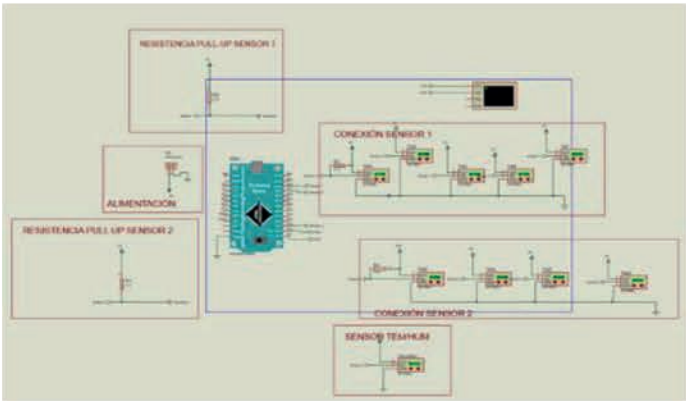



**Figura 2.2 Diseño electrónico del adquisidor de datos en el software PROTEUS.**

ISSN en trámite

**Tabla 3 Valor de Resistencia pull up utilizados.**

| Distancia (m) | Valor de Resistencia (kΩ) |
|---|---|
| 5 | 4.7 |
| 5 a 10 | 3.3 |
| 10 a 20 | 2.2 |
| 20 a 50 | 1.2 |

El diseño obtenido de PROTEUS nos permitió realizar las pistas de los componentes electrónicos para el desarrollo de la placa de circuito impreso (PCB). Posteriormente se soldaron cada uno de los componentes electrónicos a la placa de circuito impreso (PCB), ver Figura 2.3.

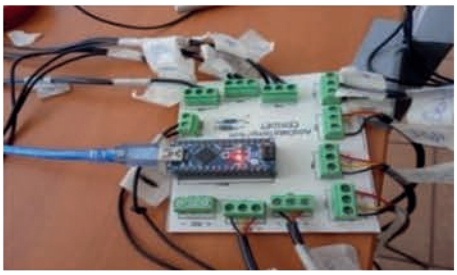


**Figura 2.3 Tarjeta de adquisición de datos.**

2.4 Pruebas de campo

El sistema de adquisición de datos, en conjunto con los sensores, se colocó en la habitación de estudio, ver Figura 2.4. Los sensores se fijaron con cinta adhesiva a la envolvente de la habitación, en las posiciones descritas en la sección 2.1. Se utilizó un equipo de cómputo conectado al adquisidor directamente para la captura de datos. Las mediciones se realizaron en la temporada de verano, en los días del 27 de julio al 4 de agosto. El intervalo de medición fue de 1 segundo. La Figura 2.5 muestra la temperatura de los diferentes sensores durante los días medidos. Estas curvas nos indican un comportamiento adecuado de la temperatura debido a que llega a su punto máximo en una hora del día y después disminuye durante la tarde y noche; además la temperatura del techo máxima alcanzada es de 35.37 °C que es más elevada, como es de esperarse durante el verano.

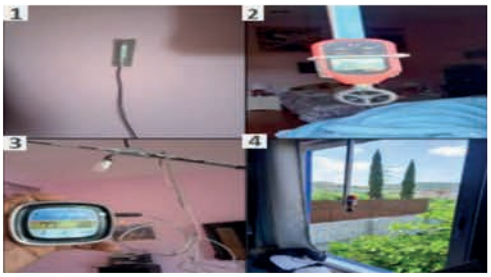



**Figura 2.4 (1) Sensor de temperatura. (2) Sensor de velocidad. (3) Prueba de medición de temperatura en el centro de la habitación. (4) Ventana de entrada de viento.**

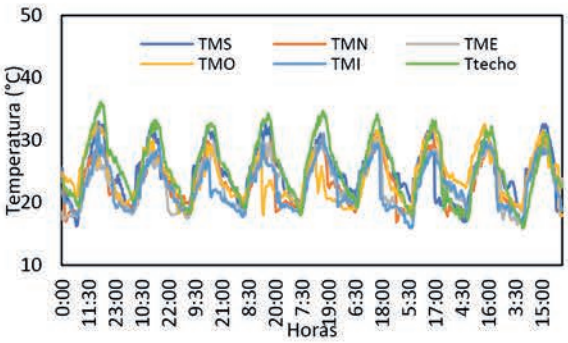



**Figura 2.5 Comportamiento de la temperatura en la habitación experimental.**

3. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

3.1 Modelo físico

El modelo físico de la habitación se muestra en la Figura 3.1. El modelo consideró puertas y ventanas abiertas tomando en cuenta las mejores condiciones de ventilación. Las condiciones de frontera dinámicas fueron velocidad de entrada y presión de salida en las ventas de entrada y salida respectivamente. El modelo virtual se realizó con el software ANSYS SpaceClaim.

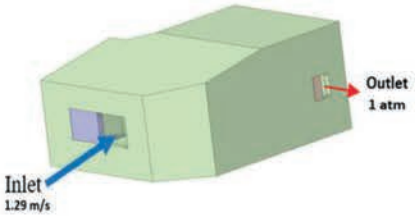



**Figura 3.1 Modelo físico.**

3.2 Discretización del volumen de control

Para generar el modelo discreto o malla se recomienda utilizar el elemento más simple para describir el fenómeno. También se puede realizar un refinamiento que capture el fenómeno físico dominante en regiones con grandes gradientes de velocidad. Para este estudio se utilizó un mallado uniforme automático tomando en consideración que es una geometría sencilla, ver Figura 3.2.

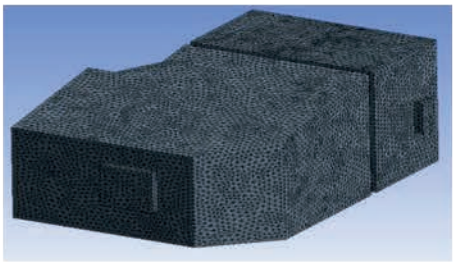


**Figura 3.2 Discretización del dominio de control.**

 ISSN en trámite

3.3 Modelo matemático

El software ANSYS Fluent [8] utiliza el método de volumen finito para resolver las ecuaciones que rigen el comportamiento del flujo de fluido. Estas ecuaciones son la ecuación de conservación de masa, Ec. (1), cantidad de movimiento (2) - (4) y energía (5), correspondientes a la formulación RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes, por sus siglas en inglés) [8], para flujo turbulento tridimensional, en estado permanente y bajo la aproximación de Boussinesq. Los promediados son con respecto al tiempo y cada variable instantánea del campo turbulento se descompone en dos componentes, un valor medio y otro fluctuante, tal como $u = \bar{u} + u'$.

$$\nabla \cdot \left(\rho \vec{\bar{V}}\right) = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \left(\rho \overline{u_i \vec{V}}\right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \nabla \cdot \left[(\mu \nabla \bar{u_i}) + \rho \overline{u_i' u_j'}\right] \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \left(\rho \overline{u_j \vec{V}}\right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \nabla \cdot \left[(\mu \nabla \bar{u_j}) + \rho \overline{u_i' u_j'}\right] - \rho g \beta (\bar{T} - \bar{T_O}) \tag{3}$$

$$\nabla \cdot \left(\rho \overline{u_k \vec{V}}\right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \nabla \cdot \left[(\mu \nabla \bar{u_k}) + \rho \overline{u_i' u_j'}\right] \tag{4}$$

$$\nabla \cdot \left(\rho C_p \overline{T \vec{V}}\right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla \bar{T}) + \rho \overline{u_i' T'} \tag{5}$$

$\vec{V}$ es el vector velocidad cuyas componentes son $(u_i, u_j, u_k)$, $\rho$ es la densidad, P es la presión, mientras $g$, $\mu$, $\beta$, $C_p$, $\lambda$, $\nabla \bar{T}$ y $T_O$ son la gravedad, viscosidad molecular, coeficiente de expansión térmica volumétrica del aire, calor especifico, conductividad térmica, temperatura y temperatura de referencia respectivamente.

El tensor de esfuerzos turbulentos de Reynolds incluido en las Ecs. (2)-(4), $\rho \overline{u_i u_j}$, conduce a un problema de cerradura. El tensor se define como:

$$\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u_j}}{\partial x_i}\right)$$

Donde la viscosidad turbulenta relaciona los esfuerzos turbulentos de Reynolds con los gradientes de velocidad media. En contraste con la viscosidad molecular $\mu$, $\mu_t$ no es una propiedad del fluido sino que depende fuertemente del estado local de la turbulencia y puede variar significativamente desde un punto a otro en el fluido. El modelo de turbulencia utilizado en este trabajo es el k-ε realizable [8], aplicado ampliamente en el campo de la investigación sobre ventilación natural. Para este modelo:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Donde la energía cinética turbulenta (k) y la disipación de energía cinética turbulenta (ε) se determinan resolviendo las ecuaciones de transporte que se enuncian a continuación:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho k \bar{u_j}\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_K + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_K \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho \varepsilon \bar{u_j}\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{K} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \tag{7}$$

La definición de todas las variables involucradas en las Ecs. (6) y (7) pueden encontrarse en [8].

4. RESULTADOS

4.1 Resultados experimentales

El análisis de los datos experimentales de la habitación de estudio nos permitió establecer las condiciones de frontera para realizar las simulaciones numéricas. Estas condiciones se determinaron mediante la búsqueda de un estado cuasi-estacionario, que nos permitió identificar el comportamiento del fluido en una hora crítica del día. En particular es de las 15:00 a las 16:00 horas del día 2 de agosto, donde nuestras variables de interés no tienen un cambio significativo en este lapso. Las Figuras 4.1 y 4.2 muestran la temperatura en la superficie interior de las paredes y la velocidad del aire en el centro de la ventana de entrada de la habitación, respectivamente; para este intervalo de tiempo.

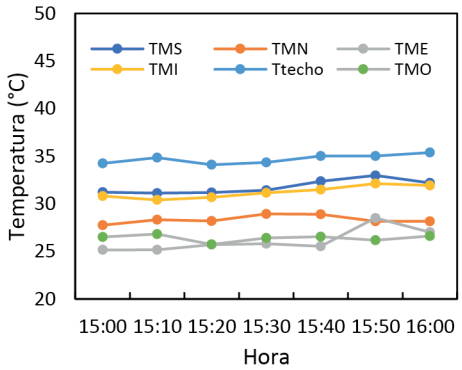



**Figura 4.1 Temperatura de las paredes en un estado cuasi-estacionario.**

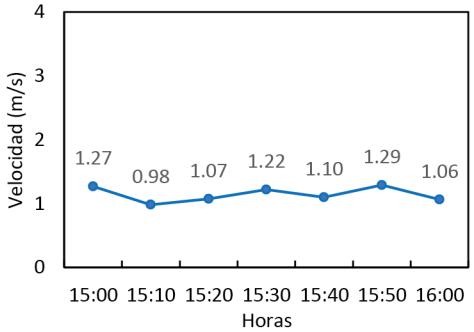



**Figura 4.2 velocidad en la ventana de entrada en el estado cuasi-estacionario.**

ISSN en trámite

4.2 Establecimiento de las condiciones de frontera

Los resultados experimentales que se presentan en la sección anterior nos permiten establecer las condiciones de frontera de temperatura a partir del estado cuasi-estacionario, promediando los datos medidos en cada muro en el intervalo de tiempo seleccionado. Para encontrar la condición de frontera de velocidad se selecciona esa misma hora y se promedian los valores máximos de velocidad para obtener las mejores condiciones de ventilación. Las condiciones de frontera obtenidas se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4 Condiciones de frontera establecidas con los datos experimentalmente.**

| Condiciones de frontera | |
|---|---|
| Paredes y techo | |
| TMS | 32.98 °C |
| TMN | 28.15 °C |
| TME | 28.51 °C |
| TMO | 26.16 °C |
| TMI | 32.12 °C |
| Ttecho | 35.03 °C |
| Ventanas | |
| Velocidad de entrada | 1.29 m/s |
| Presión de salida | 1 atm |

4.3 Análisis de independencia de malla

El análisis de independencia de malla nos permite reducir el tiempo computacional sin sacrificar precisión numérica. En este estudio se evaluaron 5 mallas con diferentes tamaños de elemento. Para cada malla se realizaron simulaciones con las condiciones de frontera descritas en la sección anterior. Los resultados de velocidad obtenidos entre cada malla fueron comparados en una línea en el centro de la habitación, ver Figura 4.3. Esta línea se estableció desde la ventana de entrada hasta el muro intermedio, a una altura de 1.5 m. La Tabla 5 muestra la desviación cuadrática media porcentual (RMSE) para cada malla. Se observó que se alcanza la independencia de malla con un tamaño de elemento de 0.06 m.

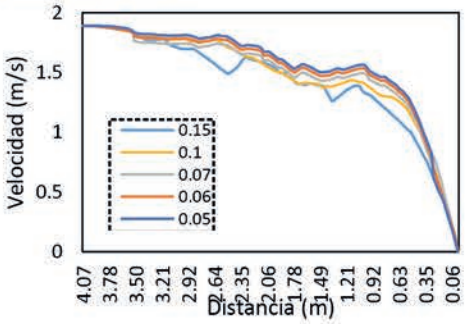



**Figura 4.3 velocidad en la entrada en el estado cuasi-estacionario.**

**Tabla 5 Análisis de independencia de malla.**

| Tamaño de elemento (m) | N° de elementos | Comparativa (m) | RMSE (%) |
|---|---|---|---|
| 0.1 | 228,579 | 0.15 | 22.567 |
| 0.07 | 552,906 | 0.1 | 14.196 |
| 0.06 | 818,150 | 0.07 | 4.002 |
| 0.05 | 1,267,553 | 0.06 | 2.937 |

4.4 Validación

Para asegurar que los resultados numéricos son correctos se realiza una comparativa entre los valores obtenidos experimentalmente en el centro de la habitación con respecto a los datos de la simulación numérica. Estos datos deben tener un margen de error menor a 0.5 °C debido a la incertidumbre del sensor. La Tabla 5 muestra la comparación de los resultados numéricos contra experimentales, donde se observa una diferencia máxima de 0.47 °C. Se concluye que las simulaciones son confiables.

**Tabla 6 Comparación de resultados numéricos y experimentales.**

| Puntos | Nombre del punto | Temperatura experimental (°C) | Temperatura numérica (°C) | Diferencia (°C) |
|---|---|---|---|---|
| | TC | 30.14 | 30.37 | 0.23 |
| | TCE | 29.96 | 30.43 | 0.47 |
| | TCO | 29.74 | 30.12 | 0.38 |

4.5 Estudio dinámico-térmico

Para determinar si las condiciones de ventilación y confort térmico son óptimas en la habitación bajo estudio, se realizó un estudio dinámico-térmico utilizando las condiciones de frontera mencionadas en la sección 4.2 y utilizando la malla seleccionada en la sección 4.3.

4.5.1 Cambios de aire por hora (ACH)

La Figura 4.4 muestra la distribución de velocidades en los planos medios de la habitación, considerando las mejores condiciones de ventilación posibles (condiciones de frontera de velocidad). Se observa que el flujo en el centro de la habitación no es el adecuado debido a que las velocidades son muy bajas e incluso en las zonas de color azul la velocidad es cercana a cero lo que indica que no hay flujo de aire. Para evaluar la ventilación dentro de la habitación se calcularon los cambios de aire por hora (ACH) que nos permiten saber cuántas veces se cambia el aire dentro de la habitación para obtener una ventilación adecuada [6]. ASHRAE establece que los cambios de aire por hora para una habitación deben de ser mayores a 20 ACH [6]. La Tabla 7 muestra los ACH obtenidos en la simulación. Se concluye que los ACH son adecuados.

$$\tau_n = \frac{1}{ACH} = \frac{V}{Q} \tag{8}$$

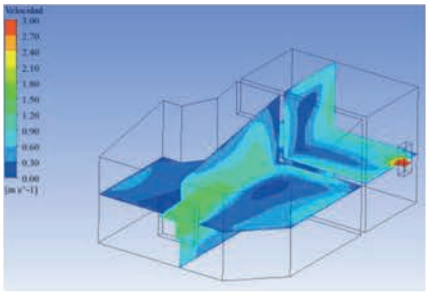


**Figura 4.4 Contornos de velocidad dentro de la habitación.**

ISSN en trámite

**Tabla 7 Cambios de aire por hora dentro de la habitación.**

| Zona | Volumen ($m^3$) | Velocidad de entrada (m/s) | Área de entrada ($m^2$) | ACH |
|---|---|---|---|---|
| Habitación | 64.15 | 1.29 | 1 | 21.52 |

4.5.2 Confort térmico

La Figura 4.5 muestra la distribución de temperatura en los planos medios de la habitación. Se observa que aun cuando las temperaturas más elevadas se presentan cerca del muro sur y del techo, la temperatura en el resto de la habitación sigue siendo alta. Para el análisis de confort térmico se utilizó la herramienta de cálculo de confort térmico CBE, para ello se calculó la velocidad y temperatura promedio del aire dentro de la habitación, estas fueron 0.052 m/s y 30.46°C, respectivamente. La humedad relativa se tomó de los datos experimentales del estado cuasi-estacionario, y fue de 22.46%. También se consideró un factor de ropaje 0.5 y una tasa metabólica de 1.2 para el cálculo del voto medio predicho (PMV); estos parámetros corresponden a ropa ligera de verano y actividad física sedentaria. Los valores de voto medio predicho (PMV) y porcentaje previsto de insatisfechos (PPD) fueron de 1.48% y 50%, respectivamente, ver Figura 4.6. Debido a que la ISO7730 establece un límite de confort aceptable en un valor de PPD igual o menor al 10%, se concluye entonces que no se obtuvieron condiciones de confort térmico.

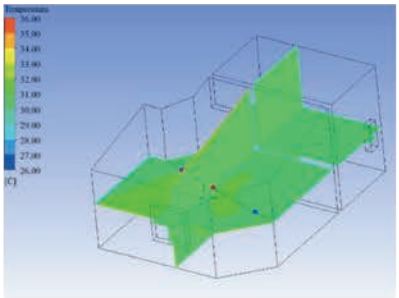


**Figura 4.5 Contornos de temperatura dentro de la habitación.**

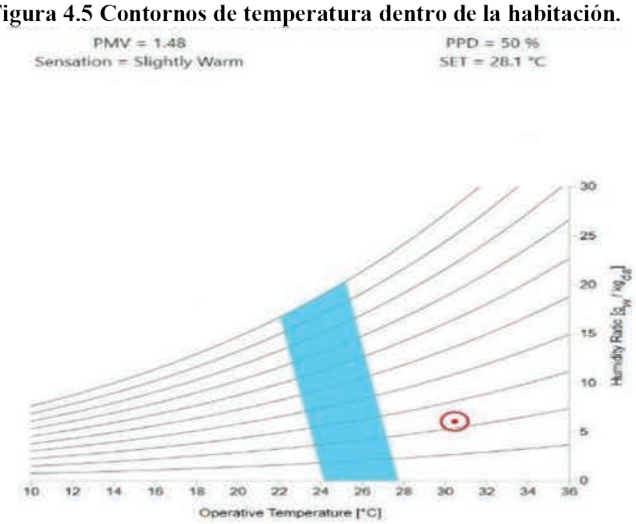



**Figura 4.6 Diagrama de confort térmico y valores PMV y PPD correspondientes a la habitación bajo estudio.**

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió numérica y experimentalmente la ventilación cruzada en una habitación de una casa del estado de Morelos, México. La instrumentación de la habitación permitió la adquisición de las condiciones de frontera para la simulación numérica y conocer la condición actual de ventilación natural, así como de confort térmico. Los resultados numéricos de temperatura fueron validados con los datos experimentales. Se encontró una diferencia máxima de 0.47 °C entre los resultados numéricos y experimentales. Los resultados mostraron que los cambios de aire por hora (ACH) en la habitación fueron de 21.52; por consiguiente, son adecuados para satisfacer las necesidades de ventilación porque supera los 20 ACH que estable la norma ASHRAE. Sin embargo, la evaluación del confort térmico mostró que se tiene un porcentaje de insatisfacción del 50%, muy por encima del 10% recomendable, por lo cual se concluye que la ventilación cruzada no es suficiente para proveer confort térmico. Se recomienda implementar otro sistema de ventilación pasiva en conjunto con la ventilación cruzada, como es el sistema denominado Torre de Viento [10], el cual podría incorporar además humidificación del aire.

REFERENCIAS

[1] M. Santamouris y K. Vasilakopoulou, «Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation,» e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, vol. 1, p. 100002, 2021.

[2] A. Alazazmeh y M. Asif, «Commercial building retrofitting: Assessment of improvements in energy performance and indoor air quality,» Case Studies in Thermal Engineering, vol. 26, p. 100946, 2021.

[3] H. Zhang, D. Yang, V. W. Y. Tam, Y. Tao, G. Zhang, S. Setunge y L. Shi, «A critical review of combined natural ventilation techniques in sustainable buildings,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 141, p. 110795, 2021.

[4] X. Zhang, A. U. Weerasuriya, J. Wang, C. Y. Li, Z. Chen, K. Tse y J. Hang, «Cross-ventilation of a generic building with various configurations of external and internal openings,» Building and Environment, Vol. 1 de 2207, Part A., p. 108447, 2022.

[5] N. Nasrollahi y P. Ghobadi, «Field measurement and numerical investigation of natural cross-ventilation in high-rise buildings; Thermal comfort analysis,» Applied Thermal Engineering, vol. 211, p. 118500, 2022.

[6] ANSI/ASHRAE Standard 62.2 Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings, 2020.

[7] ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.

[8] FLUENT, User's Guide 14, Fluent Inc., EE. UU..

[9] S. Hosseini, «Hosseini, S. H., Shokry, E., Ahmadian Hosseini, A. J., Ahmadi, G., & Calautit, J. K. (2016). Evaluation of airflow and thermal comfort in buildings ventilated with wind catchers: Simulation of conditions in Yazd City, Iran. Energy for Sustainable Developm,» Energy for Sustainable Developm , vol. 35, pp. 7-24, 2016.

[10] L.G.Carreto-Hernandez,S.L.Moya,C.A.Varela-Boydo,A.Francisco-Hernandez, « Studies of ventilation and thermal comfort in different wind tower-room configurations considering humidification for a warm climate of Mexico,» Journal of Building Engineering, vol. 46, 2022.

# REDES SOCIALES TecNM/CENIDET

@TecNMCENIDET.mx

Cenidet

Cenidet_oficial

CENIDET

https://cenidet.tecnm.mx/

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico