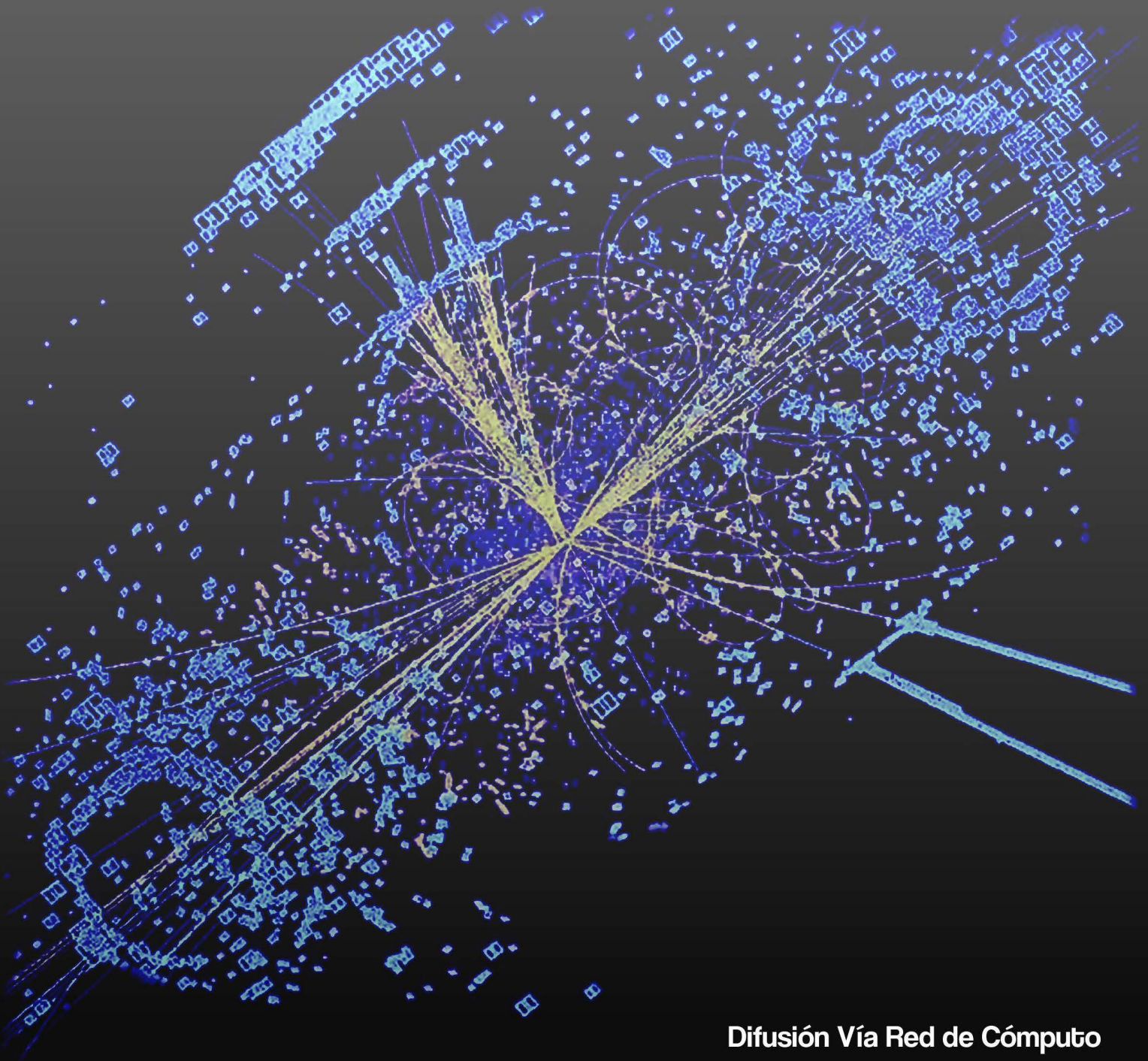


TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Julio-Diciembre 2019

Vol 2 / Núm. 2

ISSN: En trámite



Difusión Vía Red de Cómputo



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO®

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA

VOLUMEN 2, NÚMERO 2, JULIO-DICIEMBRE 2019.

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 2, Núm. 2, julio-diciembre 2019, es una publicación semestral, publicada y editada por el Tecnológico Nacional de México dependiente de la Secretaría de Educación Pública, a través del Tecnológico Nacional de México/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. 5536002511. 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 Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Colonia Palmira, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 62490, Tel. +(52) 777 362 7770, fecha de término de última actualización, 4 de febrero de 2020.

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 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

Dr. Enrique Fernández Fassnacht

Director General del Tecnológico Nacional de México (TecNM)

Dra. Yesica Imelda Saavedra Benítez

Directora del TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET)

Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez

Subdirector Académico del TecNM/CENIDET

Ing. Misael López Nava

Subdirector de Planeación y Vinculación del TecNM/CENIDET

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza

Jefe del Departamento de Gestión Tecnológica y Vinculación del TecNM/CENIDET

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo

Jefe del Departamento de Desarrollo Académico

Dr. Guadalupe Madrigal Espinosa

Oficina de Transferencia de Tecnología del TecNM/CENIDET

Dr. Juan Gabriel González Serna

Jefe del Departamento de Ciencias Computacionales

Dr. Mario Ponce Silva

Jefe del Departamento en Ingeniería Electrónica

Dr. Andrés Blanco Ortega

Jefe del Departamento en Ingeniería Mecánica

Editorial

En diversas instituciones educativas de México, se señala como normativa final para la titulación de los estudiantes de posgrado, que publiquen algún artículo en una revista calificada (arbitrada, indizada o con ISSN), por ello, en 2018, el grupo de investigadores del Departamento de Ingeniería Electrónica del Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), integrado por los Doctores Ricardo Fabricio Escobar Jiménez, Gloria Lilia Osorio Gordillo y Rodolfo Amalio Vargas Méndez, tuvo la iniciativa de crear una publicación electrónica llamada Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada como resultado de los artículos presentados en una actividad académica que lleva el mismo nombre, siendo ellos los coordinadores de los dos primeros números de este ejemplar electrónico, a quienes les reconocemos esta acertada iniciativa.

De esta manera, desde el segundo semestre del año 2018 la Revista electrónica intitulada Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada, de manera semestral da a conocer los hallazgos de investigaciones realizadas en las áreas de Ciencias Computacionales, Ingeniería Electrónica e Ingeniería Mecánica. Los artículos son arbitrados bajo la modalidad de entre pares, y pueden estar escritos en español e inglés.

La Convocatoria se dirige principalmente a estudiantes de posgrado, investigadores y profesores de diferentes instituciones educativas del país y del extranjero, para que, a través de sus artículos, compartan ante otros colegas, sus proyectos en las áreas citadas a través de las cuales el TecNM/CENIDET forma profesionistas, abordando en este Vol. 2, Núm. 2, noviembre 2019, temas relacionado a las siguientes áreas:

En Ingeniería Electrónica: Análisis, modelado y simulación de sistemas; Convertidores de potencia; Calidad de la energía y sus aplicaciones; Electrónica de potencia aplicada a la energía eólica y fotovoltaica y Sistemas de control tolerantes a fallas.

En Ingeniería Mecánica: Vibraciones mecánicas y fatiga de materiales; Confort térmico en edificaciones; Aprovechamiento de energías renovables para procesos industriales; Manufactura y diseño mecánico; Cinemática y dinámica de sistemas robóticos.

En Ciencias de la Computación: Visión artificial y robótica; Lenguaje natural; Aprendizaje automático; Ambientes, herramientas, modelado y reusabilidad de software y Bioinformática.

Finalmente, es importante señalar que esta tercera publicación es resultado de la actividad realizada el 14 y 15 de noviembre de 2019 con el nombre de 3ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada, organizada en esta ocasión por el Departamento de Ciencias Computacionales del CENIDET, en la cual se recibieron a través de la plataforma EasyChair aproximadamente 70 artículos provenientes de diferentes entidades federativas de México, así como algunas otras del extranjero; las cuales fueron organizados en el presente compendio por el Consejo Editorial y, arbitrados por el Consejo Científico integrado por expertos en las área del conocimiento del propio TecNM/CENIDET y por un Consejo de Revisores de la 3ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada, provenientes de diferentes instituciones educativas y de investigación; seleccionando un total de 56 publicaciones de las cuales; 24 son del área de Ciencias Computacionales, 15 de Ingeniería Electrónica y 17 de Ingeniería Mecánica, provenientes de un promedio de 13 entidades del país como: Ciudad de México, Chiapas, Coahuila, Estado de México, Guanajuato, Guerrero, Morelos, Oaxaca, Puebla, Tabasco, Tamaulipas, Tlaxcala y Veracruz, a través de los cuales se brinda conocimiento de vanguardia en estas temáticas.

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino

Editora

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
Dr. Guadalupe Madrigal Espinosa
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Editores Asociados

Ing. Víctor Josué Ruiz Martínez Sitio
Web

Eduardo Camilo Fernández González
Diseño Editorial

María del Carmen Sevilla Sánchez
Cinthia Marelly Castro Aquino Salma
Marian Garcia Sánchez
Apoyo en Diseño Editorial

Coordinadores de la 3ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada

Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez
Coordinador General

Dr. Manuel Mejía Laval
Editor General de los Artículos

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Comunicación y logística

Dr. Javier Ortiz Hernández
Vinculación

M.C. Mario Guillén Rodríguez
Administrador de plataforma EasyChair

Dr. Jesús Dario Mina
Área de Ingeniería Electrónica

Dr. Andrés Blanco Ortega
Área de Ingeniería Mecánica

Dr. Gabriel González Serna
Área de Ingeniería Mecánica

Comité Técnico de los Artículos

Dr. Jesús Dario Mina
Editor Asociado Ingeniería Electrónica

Dr. Andrés Blanco Ortega
Editor Asociado Ingeniería Mecánica

Dra. Andrea Magadán Salazar
Editor Asociado Ingeniería Ciencias
Computacionales

JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA

Comité de Arbitraje TecNM/CENIDET

Ciencias Computacionales

Dr. Juan Gabriel González Serna
Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez
Dra. Andrea Magadán Salazar
Dra. Alicia Martínez Rebollar
Dra. Olivia Graciela Fragoso Díaz
Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez
Dr. Manuel Mejía Lavalle
Dr. Juan Gabriel González Serna
Dr. Joaquín Pérez Ortega
Dr. Dante Mújica Vargas
Dr. Javier Ortiz Hernández

Ingeniería Electrónica

Dr. Mario Ponce Silva
Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Dra. Ma. Guadalupe López López
Dr. Jesús Darío Mina Antonio
Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel
Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Dr. Luis Gerardo Vela Valdés
Dr. José Francisco Gómez Aguilar
Dr. Jarniel García Morales
Dr. Ricardo Eliu Lozoya Ponce
Dr. Jesús Aguayo Alquicira
Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez
Dr. Enrique Quintero Mármol Márquez
Mtro. Héctor Ramón Azcaray Rivera
Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Dr. Carlos Daniel García Beltrán

Ingeniería Mecánica

Dr. Andrés Blanco Ortega
Dra. Claudia Cortés García
Dr. Arturo Abúndez Pliego
Dr. Wilberth Alcocer Rosado
Dr. Jesús Xamán Villaseñor
Dr. Efraín Simá Moo
Dr. Saulo Jesús Landa Damas
Mtro. Carlos Manuel Lara Barrios
Dr. Enrique Alcudia Zacarías
Dr. Carlos Miguel Jiménez Xamán
Dr. Eladio Martínez Rayón

Comité de Arbitraje externo

M.I. Edgar Antúnez Leyva
Instituto Mexicano de Tecnología
del Agua

Dr. Said Polanco Martagón
Universidad Politécnica de Victoria,
Tamaulipas.

Dra. Adriana Mexicano Santoyo
Instituto Tecnológico de Ciudad
Victoria, Tamaulipas.

Dr. Humberto Hernández García
Instituto Nacional de Electricidad y
Energías Limpias

Dr. José Ricardo Daniel Calderón Cruz
Instituto Nacional de Electricidad y
Energías Limpias

Dra. María Yasmín Hernández
Instituto Nacional de Electricidad y
Energías Limpias

Dr. Mario Guillén Rodríguez
Instituto Nacional de Electricidad y
Energías Limpias

Dr. Miguel Pérez Ramírez
Instituto Nacional de Electricidad y
Energías Limpias

Dr. Manuel Arias Montiel
Universidad Tecnológica de la
Mixteca

Dr. Osslán Osiris Vergara Villegas
Universidad Autónoma de Ciudad
Juárez

Dr. Oscar Gerardo Sánchez Siordia
Centro de Investigación en
Ciencias de Información
Geoespacial

Dra. Daniela Alejandra Moctezuma Ochoa
Centro de Investigación en Ciencias de
Información Geoespacial

Dra. Blanca Alicia Vargas Govea
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica.

Dr. Fabio Abel Gómez Becerra
Instituto Tecnológico de Puerto Vallarta

Dr. Jorge Ochoa Somuano
Universidad del Mar, campus Puerto
Escondido.

Dr. Juan Humberto Sossa Azuela
Instituto Politécnico Nacional

Dr. Winfried Meusel
Infinity³ professional services GmbH

M.C. José Efraín Ruiz Ramírez
Tecnológico Nacional de México campus
Zacatepec

M.C. Norma J. Ontiveros Hernández
Tecnológico Nacional de México campus
Zacatepec

Ing. José Alfonso Santana Camilo
Tecnológico Nacional de México campus
Zacatepec

Mtra. Laura Cruz Reyes
Tecnológico Nacional de México campus
Ciudad Madero



ÍNDICE

Ciencias Computacionales

Imágenes Digitales Oscuras Mejoradas con una Red Neuronal Artificial Pulso-Acoplada	10
Selección de una Metodología Ágil para Desarrollar un Proyecto Big Data	16
Comparación de OpenCV y DLIB para detección del rostro en ambientes no controlados	22
Red Neuronal Convolucional y de Filtrado para la Supresión de Lluvia y Niebla en Imágenes de Conducción	28
Métricas UX mediante análisis de seguimiento ocular	33
Mapeo Sistemático de herramientas web para la creación de un chatbot	38
Heurística para la generación de preguntas y respuestas a partir de la estructura HTML	43
El Problema del Camino más Corto Resuelto con una Alternativa Eficiente basada en Redes Neuronales	48
Comparación de plataformas de desarrollo de agentes conversacionales	54
Bioinformatic tools to predict protein structure of GPN proteins family	59
Selección y caracterización de los mejores lenguajes de programación para el desarrollo de aplicaciones en Ciencia de Datos	64
Entornos Virtuales de Aprendizaje Inmersivo, análisis sobre sus características	68
Un experimento para determinar el efecto de la curva del olvido en el aprendizaje del signo lingüístico	72
Sistema Generador Automático de Reportes para Aplicaciones Web Dinámicas	77
Generación de un corpus etiquetado de tweets apológicos	82
Reconocimiento de Secuencias Genéticas Promotoras usando Inteligencia Artificial	87
Reconstrucción Automática de Rutas Utilizando Modelos de Datos de una Plataforma de Internet de las Cosas	92



Controversias en Torno a la Inteligencia Artificial y sus Verdaderos Retos	97
Diseño de una LPS a partir de una AOPLA para empresas manufactureras textiles	101
Diseño de un vehículo que resuelve laberintos por medio de árboles de decisión con control de velocidad difuso	108
Procesamiento Digital de Imágenes y Redes Neuronales Artificiales para la clasificación de marcas criminales en grafitis	114
El Uso de Indicadores de Gestión para la Toma de Decisiones	119
Creación de la Ontología Temporal del Patrón de Análisis para Inventarios	124
Control de iluminación por sistema difuso y prototipo persiana automatizada implementado en microcontrolador Atmega328P.	131

Ingeniería Electrónica

Improving the Dynamic Behaviour of a Multi-terminal DC System through Droop Control Gain Optimization	136
Diagnóstico de fallas en transformadores empleando transformadas de Fourier de orden fraccionario	141
Convertidores de potencia bidireccionales para aplicaciones de tracción	146
Análisis y Diseño Optimizado de un Convertidor Resonante CD-CD de Alta Eficiencia en Lazo Abierto	151
Observador adaptable para la estimación simultánea de parámetros en cultivos de microalgas	156
Topología multipuerto basada en un convertidor Cúk bidireccional no aislado para un sistema de cosecha y almacenamiento de energía	161
Diseño de un controlador Tipo III T-S para un convertidor bidireccional en un sistema de almacenamiento de energía	166
Estimación de posición ante la pérdida de señal de GPS	172



Diseño óptimo de sistemas fotovoltaicos autónomos considerando el perfil de misión	177
Diseño matemático e Implementación en Software de un Decodificador BCH(15,7,2) para Control de Errores	183
Evaluación perfil de misión en controlador de carga y rectificador	188
Diseño de un Convertidor Tipo Buck-Boost Para Almacenamiento de Energía	193
Detección de Acoplamiento de Receptor Inalámbrico para Manejo Eficaz de Potencia Mediante Buck Simétrico	199
Observer design for heart dynamics estimation	204
Diseño de Prototipo Conversor de Energía Undimotriz a Energía Eléctrica	208

Ingeniería Mecánica

Modeling and Simulation of a Series Elastic Actuator Under Gait Cycle Conditions	212
Cálculo del Eje de las Cuchillas y del Cilindro Neumático para una Máquina Trituradora y Compactadora para Poliestireno Expandido (Unicel)	219
Análisis Numérico del Comportamiento de Fluido en Tubería Recubierta con DLC por Triboadhesión	224
Comparación de Wavelets madre como Herramienta de Extracción de Características en Señales de Resonancia Magnética	229
Resistencia de la unión eje/cubo mediante un modelo por elementos finitos	233
Disipación de energía por deformación plástica en estructuras de pared delgada de sección compuesta bajo cargas a flexión	241



Comportamiento térmico en una chimenea solar de un canal, bajo condiciones climáticas del estado de Tabasco, México.	247
Propuesta de metodología para el estudio de Sistemas de Edificación Térmicamente Activados	252
Kinematic and Dynamic Modeling of an Exoskeleton for Upper Limb Rehabilitation	257
Calidad aplicada en el diseño de piezas mecánicas, mediante la manufactura aditiva	263
Identificación de los Coeficientes Rotodinámicos en un sistema Rotor-cojinetes Utilizando Algoritmos Genéticos.	268
Análisis cinemático de una máquina de rehabilitación de cadera	272
Improving Heat Transfer in a Liquid-Metal Duct Flow	276
Caracterización de soldadura por fricción rotativa en Aluminio 6063-T4	283
Control PID para un Exoesqueleto de 3 gdl para rehabilitación de personas que han sido afectadas por un accidente cerebrovascular	288
Análisis de la eficiencia térmica de un concentrador cilindro parabólico utilizando Agua y nanofluido (H ₂ O/Al ₂ O ₃) como fluidos de trabajo	294
Análisis estructural del álabe de una turbina eólica horizontal de baja potencia	300

Imágenes Digitales Oscuras Mejoradas con una Red Neuronal Artificial Pulso-Acoplada

K. Salvador Aguilar Domínguez, Manuel Mejía Lavalle,
Andrea Magadán Salazar y Gerardo Reyes Salgado

Tecnológico Nacional de México / CENIDET
Cuernavaca, Morelos, México;
e-mail:{kevin.aguilar17ca, mlavalle, magadan & greyes}@cenidet.edu.mx

Resumen: Las imágenes digitales cada vez son más utilizadas en diversas áreas, pero éstas pueden verse afectadas en su calidad, lo que dificulta cualquier proceso o análisis que se quiera realizar sobre ellas. Las imágenes oscuras son un típico ejemplo de ello. En este trabajo se implementa un modelo basado en una Red Neuronal Artificial de tipo Pulso-Acoplada de Tercera Generación para mejorar las imágenes oscuras, específicamente utilizando el Modelo de Intersección Cortical y una Matriz de Tiempo para modificar el valor de los píxeles y conseguir mejorar la calidad de la imagen. Los experimentos realizados muestran que la Red propuesta es mejor en promedio.

Palabras clave: Procesamiento de imágenes, Mejora de imágenes, Redes Neuronales Artificiales, Redes Neuronales Pulso-Acopladas, Matriz de Tiempo.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad de las imágenes puede ser descritas por las siguientes características: la nitidez, el contraste, el color, la claridad y los artefactos (Pedersen, Bonnier, Hardeberg, & Albrechtsen, 2010). Las imágenes muy oscuras generalmente afectan el contraste y la claridad de la imagen, ya que presentan acumulaciones de píxeles con niveles bajos, que degradan su calidad. Actualmente existe una gran variedad de técnicas que tratan este problema, como lo es la Ecuilización del Histograma (EH) (Pajares & Cruz, 2008), por su fácil implementación y buenos resultados. El histograma de una imagen es una función discreta que representa el número de píxeles en la imagen en función al nivel de intensidad. El objetivo de la Ecuilización del Histograma es distribuir de forma uniforme el valor que toma cada uno de los píxeles a lo largo del rango dinámico, obteniendo como resultado una imagen con mejor contraste; otra técnica utilizada en el procesamiento de imágenes son las Redes Neuronales Artificiales (RNA's) (Manaswini & Sashikala, 2018). Las Redes Neuronales Pulso-Acopladas (*Pulse-Coupled Neural Network* PCNN), también llamadas de tercera generación, son utilizadas en el área de visión artificial; este paradigma se basa en el modelo de Eckhorn, que parte de la frecuencia de activación de las neuronas de la corteza visual de los mamíferos (Eckhorn, Reitboeck, Arndt, & Dicke, 1990). Esto les permite cumplir de cierto modo algunas características visuales humanas (Ma, Zhan, & Wang, 2010), a diferencia de otras técnicas más matemáticas, como: el reajuste de niveles de gris, el filtrado y la redistribución del histograma (Rodríguez & Sossa, 2011). El Modelo de Intersección Cortical (*Intersection*

Cortical Model ICM) es una versión simple del modelo de PCNN y fue presentado como una herramienta para el procesamiento de imágenes que es computacionalmente más rápido que el modelo PCNN completo sin perder su efectividad en el procesamiento de imágenes (Ma et al., 2010). Se derivó de varios modelos de la corteza visual y es básicamente la intersección de estos modelos; algunas de sus aplicaciones se muestran en (Cardenas, Mejia-Lavalle, Sossa, & Pardo, 2014; Ekblad, Kinser, Atmer, & Zetterlund, 2004; Ortiz, Mejía-Lavalle, & Sossa, 2016; Wang, Chen, & Wang, 2019; Yin, Liu, Liu, & Chen, 2019), entre otras. Este modelo al igual que el modelo de la PCNN entregan imágenes binarias que poseen meta información de la imagen. En algunas ocasiones se ha utilizado la introducción de una Matriz de Tiempo en un modelo de Red Neuronal Pulsante para mejorar distintas características de la imagen como se muestra en (Cardenas et al., 2014; Ma et al., 2010; Ortiz et al., 2016), ya que ésta da información sobre la intensidad de los píxeles en la imagen.

En la Sección 2 se muestra el modelo utilizado y la Matriz de Tiempo, la Sección 3 describe el algoritmo propuesto, en la Sección 4 se presentan las métricas utilizadas, la experimentación y resultados obtenidos se presentan en la Sección 5, en la 6a Sección se presenta la discusión y finalmente las conclusiones son mencionadas en la Sección 7.

2. MODELO DE INTERSECCIÓN CORTICAL (ICM)

El modelo ICM se basa en el modelo PCNN mostrado en la Fig. 1. Este modelo intenta minimizar el costo del cálculo para agilizar el proceso, pero manteniendo la efectividad de la PCNN cuando se aplica a imágenes. Se basa en los elementos comunes de varios modelos biológicos (Lindblad & Kinser,

2005). Es un modelo simplificado de PCNN. Prácticamente la ICM es un caso especial cuando no hay neuronas de enlace (*linking*) en la PCNN, es decir si la fuerza de enlace de la PCNN se establece en 0, se convertirá en la ICM. Por ello este modelo sólo utiliza entradas de alimentación (*feeding*). La Fig. 2 muestra el diagrama de la ICM.

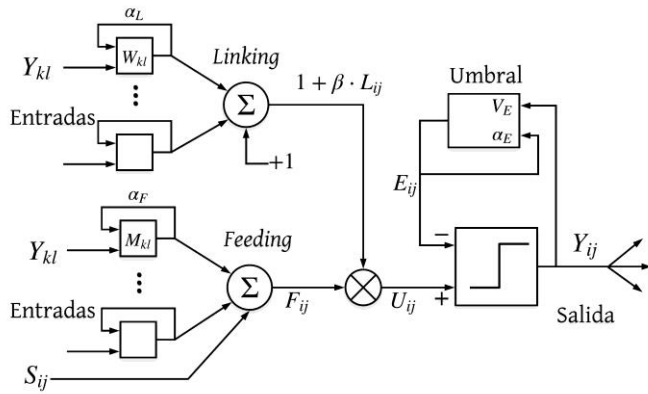


Fig. 1. Diagrama PCNN (Lindblad & Kinser, 2005).

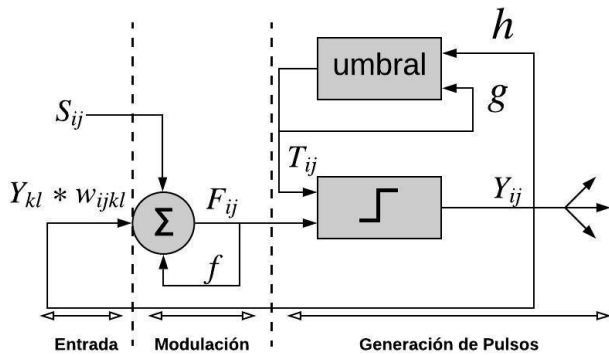


Fig. 2. Diagrama ICM (Ortiz et al., 2016).

El modelo ICM se describe por las siguientes tres ecuaciones:

$$F_{ij}[n] = f F_{ij}[n-1] + \sum w_{ijkl} Y_{kl}[n-1] + S_{ij} \quad (1)$$

$$T_{ij}[n] = g T_{ij}[n-1] + h Y_{ij}[n-1] \quad (2)$$

$$Y_{ij}[n] = \begin{cases} 1 & \text{si } F_{ij}[n] > T_{ij}[n] \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3)$$

donde n es la iteración actual, w es la matriz de pesos sinápticos generalmente gaussiana como se muestra en la ecuación (4), que liga una neurona con sus vecinas y finalmente f , g y h son coeficientes de ajuste, donde $g < 1$, $f < g$ y h un valor cercano a 20.

$$w_{kl} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0.5 & 0 & 0.5 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 \end{bmatrix} \quad (4)$$

La Matriz de Tiempo (MT) registra la iteración o tiempo de activación para todas las salidas Y_{ij} . El diagrama de la ICM con Matriz de Tiempo se muestra en la Fig. 3.

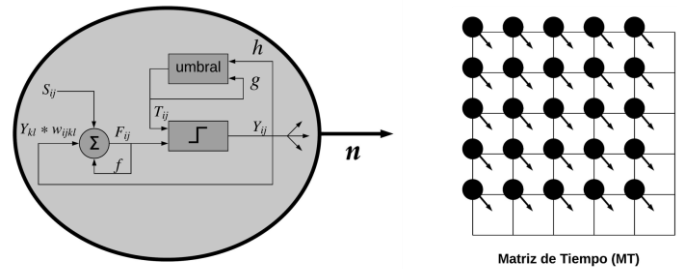


Fig. 3. Diagrama de la ICM con Matriz de Tiempo.

Si la neurona se dispara se registrará el tiempo en que se disparó por primera vez (Ortiz et al., 2016). Por tanto, un gran valor en la Matriz de Tiempo indica que el píxel correspondiente tiene una baja intensidad, y pertenece a una región más oscura. La Matriz de Tiempo se define en la ecuación (5).

$$M_{ij}[n] = \begin{cases} n & \text{si } Y_{ij} = 1 \\ M_{ij}[n-1] & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

3. MODELO PROPUESTO ICM-LTM PARA IMÁGENES OSCURAS

El proceso del modelo que llamamos Modelo de Intersección Cortical con Matriz de Tiempo Luminosa (*Intersection Cortical Model - Luminance Time Matrix ICM-LTM*) (Aguilar & Mejía-Lavalle, 2018; Aguilar, Mejía-Lavalle, & Sossa, 2019) anexa la Matriz de Tiempo donde se registrará la iteración n de activación de cada una de las neuronas de salida Y_{ij} . El proceso del modelo se muestra de manera gráfica en la Fig. 4. y se describe con las siguientes instrucciones:

I. Inicializar los valores de la ICM y normalizar la imagen oscura de entrada entre 0 y 1, con respecto al rango dinámico ($L-1$) de la imagen, introduciendo los valores obtenidos en la matriz S_{ij} , siendo en este caso $L-1 = 255$.

II. Se inicializa la ICM y se itera hasta llenar la Matriz de Tiempo M_{ij} , es decir que todas las neuronas se hayan activado por lo menos una vez.

III. Se normalizan los valores de la Matriz de Tiempo entre 0 y 1, con respecto a la iteración de la última neurona disparada.

IV. Los valores de la Matriz de Tiempo son multiplicados por un peso W . Obteniendo una Matriz de Tiempo Ponderada (MTP).

V. Los píxeles de la imagen oscura son modificados sumando el valor de la MTP, obteniendo una imagen mejor distribuida en su rango dinámico, alcanzando el valor deseado, en este caso 1.

VI. Finalmente, la imagen se des-normaliza multiplicando por su rango dinámico ($L-1$), obteniendo la imagen mejorada.

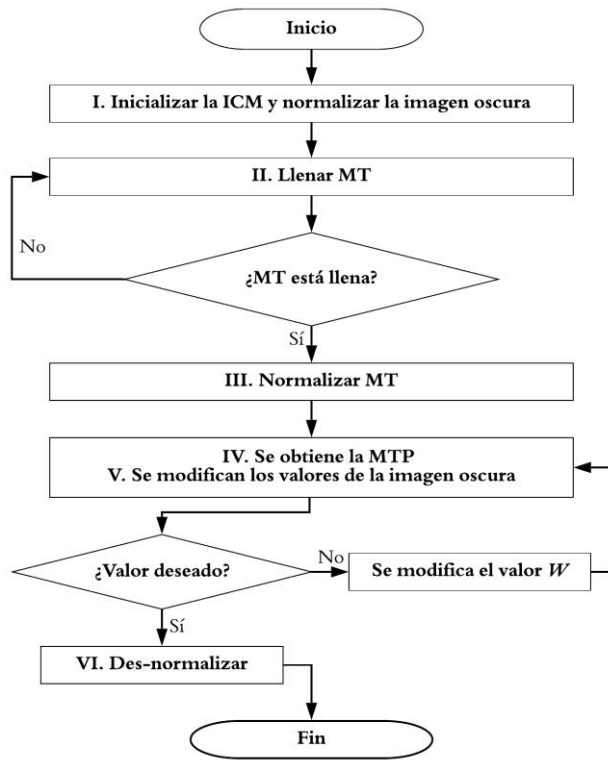


Fig. 4. Diagrama de Flujo ICM-LTM.

4. MÉTRICAS DE EVALUACIÓN EMPLEADAS

En la mayoría de los casos, los efectos de mejora son evaluados de manera subjetiva, sólo por la percepción visual, difícilmente se llegan a evaluar de forma objetiva por medio de métricas. A pesar de esto, existen diferentes métricas para evaluar la calidad de una imagen. En ocasiones usado medidas obtenidas sobre los atributos, la calidad en este tipo de modelos se puede aproximar como una función que calcula la distancia euclídea de las imágenes en su valor cromático, como se muestra en la ecuación (6) (Robledano-Arillo, Moreno-Pelayo, & Pereira-Uzal, 2016).

$$C(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (6)$$

donde la calidad es entendida como la distancia euclidiana entre una imagen digital x y su imagen referente ideal y , a partir de sus atributos i , ponderados mediante sus coeficientes de ponderación p . Otro método utilizado es la Métrica de Similitud Estructural ($SSIM$) que considera la luminancia, contraste y estructura, combinando las tres obteniendo la ecuación (7) (Wang, Bovik, Sheikh, & Simoncelli, 2004).

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (7)$$

donde μ_x y μ_y son el promedio de cada una de las imágenes, σ_x^2 y σ_y^2 la varianza de las imágenes, σ_{xy} es la covarianza, $C_1=(k_1L)^2$ y $C_2=(k_2L)^2$, donde $L=255$, $k_1=0.01$ y $k_2=0.03$ por defecto.

5. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS CONSEGUIDOS

Para la experimentación se utilizaron 10 imágenes seleccionadas de manera aleatoria para comprobar la factibilidad del algoritmo, las cuales se pasaron a escala de grises del Dataset BSDS500 (Berkeley Segmentation Data, 2013) (Fig. 5), estas fueron degradadas con la técnica de desplazamiento del histograma, con un desplazamiento de -80 en su valor cromático. M_{ij} , Y_{ij} y F_{ij} se inicializaron en 0; T_{ij} se inicializó en 1. El parámetro f en 0.1, g en 0.9 y h en 20. Finalmente, la Matriz de pesos w_{kl} se estableció como se muestra en la ecuación (4).



Fig. 5 Imágenes utilizadas (Berkeley Segmentation Data, 2013).

Para cuantificar los resultados conseguidos se comparó con las ecuaciones (6) y (7) como métricas de evaluación, en contraste con la técnica EH; se calcularon tomando como referencia ideal la imagen original, estableciendo el parámetro p en 1 para la métrica C .

La Tabla 1, muestra la comparación de la evaluación de la imagen oscura, los resultados obtenidos por la técnica de Ecuación del Histograma y el modelo ICM-LTM propuesto, utilizando como métrica de evaluación la ecuación (6) normalizando los resultados dividiendo entre el valor máximo de diferencia. En esta métrica se considera como mejor resultado un valor más cercano a cero ya que indica que posee valores parecidos a la imagen original que se toma como referencia ideal. Los mejores resultados se marcan con negritas y los peores en *italicas subrayado*.

Tabla 1. Evaluación con métrica C

Imagen	Oscura	EH	ICM-LTM
1	<u>0.3012</u>	0.1221	0.0645
2	<u>0.2804</u>	0.1156	0.0725
3	<u>0.3033</u>	0.1592	0.0875
4	<u>0.2956</u>	0.0711	0.0748
5	<u>0.2915</u>	0.1828	0.0968
6	0.2252	<u>0.3600</u>	0.1547
7	0.2464	<u>0.2778</u>	0.0882
8	0.2645	<u>0.3399</u>	0.1387
9	<u>0.2578</u>	0.2577	0.0859
10	<u>0.2986</u>	0.1293	0.0657
Promedio	<u>0.2765</u>	0.2015	0.0929

En esta Tabla se puede observar que el modelo propuesto obtiene mejores resultados en nueve de diez imágenes y a pesar de que EH obtiene mejor evaluación en una imagen, la diferencia no es tan grande. El promedio muestra que se obtienen mejores resultados con el modelo propuesto. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos con la métrica $SSIM$ ecuación (7). En esta métrica a diferencia de C se considera como mejor resultado el valor más cercano a uno. Del mismo modo, los mejores resultados se marcan con negritas y los peores en *italicas subrayado*.

Tabla 2. Evaluación con métrica $SSIM$

Imagen	Oscura	EH	ICM-LTM
1	0.9000	<u>0.8823</u>	0.9236
2	<u>0.6979</u>	0.8490	0.8775
3	0.8850	<u>0.7606</u>	0.9288
4	0.9044	<u>0.8908</u>	0.9129
5	0.8728	<u>0.6613</u>	0.9073
6	<u>0.4157</u>	0.6405	0.7561
7	<u>0.1405</u>	0.3723	0.7127
8	<u>0.1234</u>	0.5926	0.7656
9	<u>0.5305</u>	0.6872	0.8255
10	<u>0.3625</u>	0.7056	0.7060
Promedio	<u>0.5833</u>	0.7042	0.8316

En la Tabla se puede observar que, en las diez imágenes utilizadas, el índice es mayor con las imágenes obtenidas con la ICM-LTM. A su vez se observa que la técnica EH degrada la calidad de la imagen en cuatro de los casos según la métrica $SSIM$, es decir EH obtiene peores resultados que la imagen oscura.

6. DISCUSIÓN

La Fig. 6 muestra uno de los resultados obtenidos, en el inciso a) se muestra la imagen número 1 con su histograma, b) la imagen número 1 oscura con un desplazamiento de -80 en su valor cromático y su histograma, c) la imagen número 1 oscura mejorada con el método de Ecuación del Histograma con su histograma y d) la imagen número 1 oscura mejorada con el modelo ICM-LTM propuesto y su histograma. En ella se puede observar que la Ecuación del Histograma oscurece la imagen, introduce ruido y perdiendo detalles (como las nubes) según se puede apreciar en el zoom del inciso a) de la Fig. 7. En el histograma de las imágenes (Fig. 6, recuadros de la derecha) se puede observar que la técnica ICM-LTM entrega un histograma más semejante a la imagen original que la técnica EH.

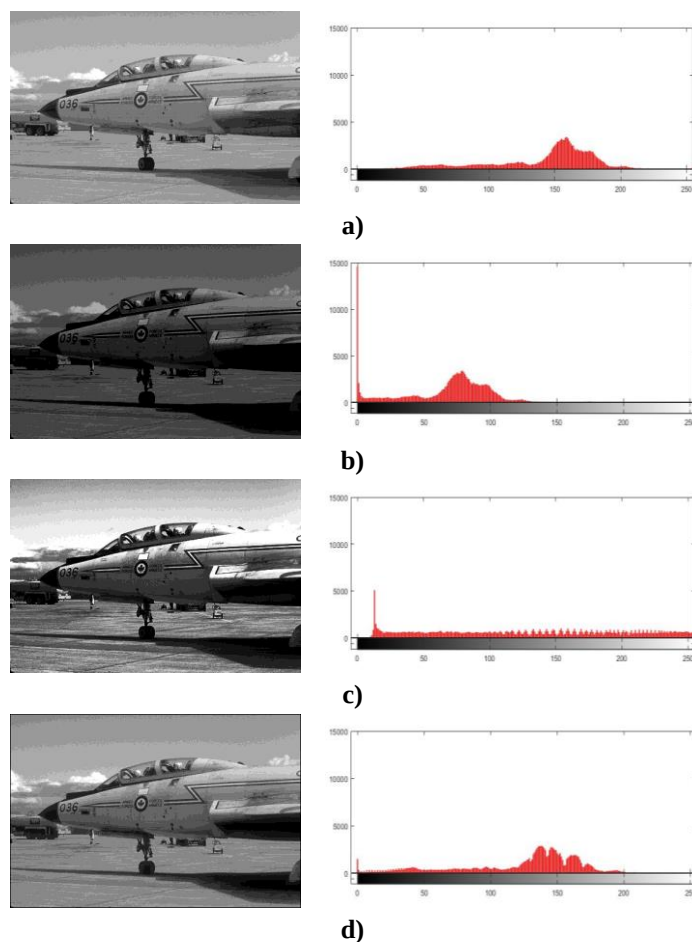


Fig. 6 a) Original, b) Oscura, c) EH, d) ICM-LTM.

Los resultados obtenidos por el modelo ICM-LTM en promedio son mejores que EH de acuerdo a las métricas de evaluación, mejorando la imagen oscura en comparación a la calidad de la misma antes de ser mejorada. Adicionalmente, al ser ICM-LTM de naturaleza paralela, potencialmente es más eficiente que otras formas de mejoramiento de naturaleza secuencial. Unas de las principales desventajas de ICM-LTM es que sólo mejora imágenes en escala de grises y la cantidad de parámetros de ajuste que posee la ICM, que deben ser sintonizados a prueba y error.



Fig. 7 Zoom de la imagen mejorada con a) EH, b) ICM-LTM.

7. CONCLUSIONES

El modelo propuesto ICM-LTM entrega mejores resultados que la Ecuación del Histograma considerando las métricas utilizadas. Así mismo, el algoritmo mejora la imagen oscura en promedio un 18% evaluado con la métrica *C* y un 25% con *SSIM*, logrando en ocasiones una mejora de hasta el 23% con *C* y 64% con *SSIM*.

Los resultados mostraron que el algoritmo ICM-LTM obtiene un histograma y un resultado visualmente más semejante a la imagen original, a su vez, introduciendo menos ruido a la imagen resultante que la técnica EH.

Como trabajo a futuro se podría realizar la paralelización del algoritmo; incluirse más métricas para evaluar el desempeño, y/o utilizar un algoritmo de detección de formas u objetos en las imágenes; trabajar con las 500 imágenes del Dataset y con casos reales de imágenes oscuras, por ejemplo, imágenes médicas; y validar con significancia estadística los resultados.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). K. Salvador Aguilar D. agradece a CONACYT por la beca concedida para la realización de sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

Aguilar, K. S., & Mejía-Lavalle, M. (2018). (Póster) Mejoramiento de imágenes luminosas utilizando el modelo de intersección cortical. *Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada*, 1, 64, (ISSN en trámite).
Aguilar, K. S., Mejía-Lavalle, M., & Sossa, J. H. (2019). (Póster) Mejoramiento de imágenes médicas luminosas

utilizando el modelo de intersección cortical. *Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada*, 2, 94, (ISSN en trámite).
Berkeley Segmentation Data. (2013). Benchmarks 500 (BSDS500).
URL: <https://www2.eecs.berkeley.edu/research/projects/CS/Vision/Grouping/Resources.html>, Consultado en agosto, 2019.
Cardenas, S., Mejía-Lavalle, M., Sossa, J. H., & Pardo, E. C. (2014). Pulse-Coupled Neural Networks applied to Human Brain Image Processing. *IEEE 2014 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering*, 60–65.
<https://doi.org/10.1109/ICMEAE.2014.46>
Eckhorn, R., Reitboeck, H. J., Arndt, M., & Dicke, P. (1990). Feature Linking via Synchronization among Distributed Assemblies: Simulations of Results from Cat Visual Cortex. *Neural Computation*, 2(3), 293–307.
<https://doi.org/10.1162/neco.1990.2.3.293>
Ekblad, U., Kinser, J. M., Atmer, J., & Zetterlund, N. (2004). The intersecting cortical model in image processing. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 525(1–2), 392–396.
<https://doi.org/10.1016/J.NIMA.2004.03.102>
Lindblad, T., & Kinser, J. M. (2005). *Image processing using pulse-coupled neural networks*. Heidelberg New York Dordrecht London: Springer.
Ma, Y., Zhan, K., & Wang, Z. (2010). *Applications of pulse-coupled neural networks*. Berlin: Springer.
Manaswini, J., & Sashikala, M. (2018). Review of neural network techniques in the verge of image processing. *International Proceedings on Advances in Soft Computing, Intelligent Systems and Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 628, 345–361.
Ortiz, E., Mejía-Lavalle, M., & Sossa, H. (2016). Uso de redes neuronales pulsantes para mejorar el filtrado de imágenes contaminadas con ruido Gaussiano. *Research in Computing Science*, 114(ISSN 1405-5546), 45–58.
Retrieved from [http://www.rcs.cic.ipn.mx/2016_114/Uso de redes neuronales pulsantes para mejorar el filtrado de imagenes contaminadas con ruido.pdf](http://www.rcs.cic.ipn.mx/2016_114/Uso%20de%20redes%20neuronales%20pulsantes%20para%20mejorar%20el%20filtrado%20de%20imagenes%20contaminadas%20con%20ruido.pdf)
Pajares, G., & Cruz, J. M. de la. (2008). *Ejercicios resueltos de visión por computador*. Madrid: Alfaomega.
Pedersen, M., Bonnier, N., Hardeberg, J. Y., & Albrechtsen, F. (2010). Attributes of image quality for color prints. *Journal of Electronic Imaging*, 19(1), 011016.
<https://doi.org/10.1117/1.3277145>
Robledano-Arillo, J., Moreno-Pelayo, V., & Pereira-Uzal, J. M. (2016). Aproximación experimental al uso de métricas objetivas para la estimación de calidad cromática en la digitalización de patrimonio documental gráfico. *Revista Española de Documentación Científica*, 39(2), e128.
<https://doi.org/10.3989/redc.2016.2.1249>
Rodríguez, R., & Sossa, J. H. (2011). *Procesamiento y análisis digital de imágenes*. México: Alfaomega.

- Wang, B., Chen, L. L., & Wang, M. (2019). Novel image segmentation method based on PCNN. *Optik*, 187, 193–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.05.007>
- 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), 14. Retrieved from <http://www.cns.nyu.edu/~lcv/ssim/>.
- Yin, M., Liu, X., Liu, Y., & Chen, X. (2019). Medical Image Fusion With Parameter-Adaptive Pulse Coupled Neural Network in Nonsampled Shearlet Transform Domain. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(1), 49–64. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2838778>

Selección de una Metodología Ágil para Desarrollar un Proyecto Big Data

**L.I Antonio Juan Capistran Abundez, Dr. Juan Carlos Rojas Pérez, Dra. Olivia Graciela Fragoso Díaz,
Dr. René Santaolaya Salgado**

{antonio.capistran18ce, carlos.rojas, ofragoso, rene}@cenidet.edu.mx

Tecnológico Nacional de México/Cenidet

Dirección: Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos.

Teléfono: 01(777) 362-7770

Resumen:

En la actualidad existe una gran diversidad de paradigmas, lenguajes de programación y tecnologías que facilitan el desarrollo de proyectos o sistemas de software. Cuando el desarrollo de software es secuencial el modelo en cascada resulta adecuado. Sin embargo, cuando los proyectos o sistemas de software son de tipo Big Data, las problemáticas a enfrentar no pueden ser atendidas por un modelo de desarrollo secuencial, ya que los modelos en cascada resultan rígidos para aceptar cambios, mientras que en los proyectos Big Data los requerimientos cambian constantemente. En la actualidad no existe una metodología orientada para desarrollar proyectos Big Data. En este trabajo se analiza y propone el uso de una metodología ágil como alternativa adecuada para adaptarse a los entornos cambiantes que caracteriza a los proyectos Big Data.

Palabras clave: Big Data, Metodologías Ágiles, Ingeniería de Software.

1. INTRODUCCIÓN

La industria del software busca constantemente mejorar sus múltiples procesos de desarrollo para lograr productos de software que funcionen correctamente, mejoren los tiempos de entrega acordados y obtengan la calidad suficiente para cubrir los requisitos del cliente. Ingenieros de software coinciden que utilizar procesos de desarrollo de software adecuados incrementa las posibilidades de éxito, es por esto que la industria de software a lo largo de los años ha implementado modelos en cascada, desarrollo incremental y espiral que les permita mejorar y controlar sus actividades (Arndt, 2018). Aplicar metodologías tradicionales para el desarrollo de software ha permitido a las empresas obtener software eficiente y de calidad.

Las metodologías tradicionales han resultado eficientes en el desarrollo de software. Sin embargo, la evolución de la informática deriva en una actualidad generadora de amplio volumen de datos casi a velocidad de tiempo real y con variedad de fuentes y tipos de datos, tanto estructurados como no estructurados y semi-estructurados, de ahí que sea esencialmente importante para las empresas procesar y obtener información analizable para generar conocimiento que les permita tomar decisiones pertinentes para su negocio.

A partir de la evolución tecnológica, las empresas recurren a proyectos Big Data para lograr diferenciales competitivos que les permita estar a la vanguardia en el mercado. Sin embargo, los proyectos Big Data son complicados de manejar principalmente por tres características: volumen de datos, velocidad a la que se generan y la variedad de formatos existente. Para disminuir la complejidad de manejo en los proyectos Big Data, como medida

de solución se propone a las metodologías ágiles cuya implementación en el desarrollo de software ha sido satisfactoria en la mejora de sus procesos desplazando la aplicación de metodologías secuenciales (Tarwani & Chug, 2016).

Este documento se estructura de la siguiente forma: en la Sección 2 se encuentra información de trabajos relacionados a Big Data, metodologías tradicionales y ágiles. En la Sección 3, se revisan las características de las principales metodologías tradicionales y el aporte para lograr éxito en el desarrollo de software. En la Sección 4, se describen las características que permiten a las metodologías ágiles aventajar al enfoque tradicional cuando son implementadas en cualquier tipo de proyecto. También, se presenta una breve comparación con las metodologías tradicionales y un resumen general de los cuatro enfoques ágiles más populares. En la Sección 5 se analizan los retos y soluciones que enfrentan los proyectos Big Data con el hardware y software rebasados por volumen, velocidad y variedad de datos. También, se describe de forma breve por qué SCRUM es una metodología ideal para proyectos Big Data. Finalmente, en la Sección 6 se abordan las conclusiones y trabajos futuros del artículo.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Big Data es un fenómeno actual aplicable a toda aquella información que no puede ser procesada o analizada utilizando procesos o herramientas tradicionales (Barranco Fragoso, 2012). Dicho fenómeno describe grandes volúmenes de datos con alta velocidad de transferencia, complejos y variables que requieren técnicas y tecnologías avanzadas que permitan la captura, almacenamiento, distribución, y análisis de la información" (Alexander, Hoisie, & Szalay, 2011).

En la actualidad no existe una metodología orientada a sistemas Big Data, algunos trabajos abordan la complejidad de Big Data, otros trabajos han iniciado experimentar con el uso de metodologías ágiles, en (Ahmad, Soomro, & Broh, 2014) se realiza un análisis y estudio comparativo sobre la tendencia futura de tres metodologías ágiles populares: la Programación Extrema, SCRUM y el Proceso Unificado Racional. En el trabajo de (Abrahamsson, Salo, & Warsta, 2002) los autores revisan y analizan la mayoría de métodos ágiles desde aspectos tales como procesos, roles y responsabilidades, practicas, experiencias, alcance e investigación actual concluyendo que los aspectos centrales de los métodos ágiles son la simplicidad y la velocidad. En el trabajo de (Moniruzzaman & Hossain, 2013), los autores identifican los principales factores de los métodos ágiles para mejorar el desarrollo de software y realizan una comparación entre los modelos tradicional y ágil concluyendo que la agilidad surge como una buena alternativa al desarrollo de software basado en la planificación secuencial. En (Arndt, 2018) se explora cómo la Ingeniería de Software se puede adaptar para apoyar el desarrollo de proyectos Big Data y cómo las técnicas de Big Data pueden usarse para aumentar la utilidad de los procesos en Ingeniería de Software para en forma mutua apoyarse y enriquecerse. En el trabajo de (Franková, Drahošová, & Balco, 2016) se muestra el enfoque ágil de gestión de proyectos sugiriendo formas de utilizarlo en proyectos relacionados con la gestión de Big Data, identificando que el objetivo de los métodos ágiles es el desarrollo de software en funcionamiento, determinando que los enfoques ágiles son recomendables para administrar proyectos de Big Data debido a su adaptabilidad a requisitos cambiantes, lo cual disminuye los problemas de volumen de datos que exceden la capacidad de las herramientas de software utilizadas comúnmente. En (Awad, 2019), los autores describen las características de algunas metodologías tradicionales y ágiles. También se analizan fortalezas, debilidades y apoyados por comentarios de profesionales de la industria del software, los resultados mostraron que las metodologías ágiles son adecuadas para proyectos de pequeña y mediana escala. En (Srinivasu, Koushik, & Santhosh, 2017), los autores describen los desafíos de la minería de Big Data, hacen una revisión de los marcos y plataformas modernos para procesar y administrar proyectos Big Data y analizan tecnologías o herramientas que pueden beneficiarse de la minería de Big Data.

3. METODOLOGÍAS TRADICIONALES

De acuerdo a (Pressman, 2012), en Ingeniería de Software, las metodologías de desarrollo clásicas o modelos de proceso prescriptivo fueron planteadas originalmente para poner orden en el caos del desarrollo de software que existía cuando se empezó a generar masivamente.

Estas metodologías tienen como base la secuencia de pasos: definición de requisitos, creación de soluciones, pruebas e implementación. Las metodologías tradicionales más significativas, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Metodologías tradicionales (Versión modificada de (Ali, 2017))

Modelo	Características
Cascada	Secuencial: requisitos, análisis, diseño, codificación, pruebas y operaciones.
Iterativo	Desarrollo de pequeñas versiones del producto.
Espiral	Cuatro fases principales: objetivos, evaluación de riesgos, desarrollo y validación, y Planificación.
Incremental	Divide el proyecto en etapas y desarrolla una parte de los requerimientos en cada fase.

Los enfoques tradicionales imponen un proceso disciplinado sobre el desarrollo de software con el objetivo de hacerlo más predecible y más eficiente. Sin embargo, se observa su escaso éxito debido a que se le da mayor importancia a la metodología por lo cual, el ritmo de desarrollo se ralentiza (Awad, 2019). Sus cuatro características similares son las siguientes: enfoque predictivo, documentación completa, procesos orientados y herramientas orientadas.

4. METODOLOGÍAS ÁGILES

La agilidad en desarrollo de software surge como respuesta a la insuficiencia de los métodos tradicionales para manejar entornos rápidos y en constante cambio. El enfoque ágil comprende que los requisitos de software son dinámicos por lo tanto deben tener la capacidad para detectar y responder a las expectativas de negocio cuyas características empresariales giran en entornos inestables y cambiantes (Moniruzzaman & Hossain, 2013).

Algunos de los beneficios que otorgan las metodologías ágiles se presentan en la Figura 1.

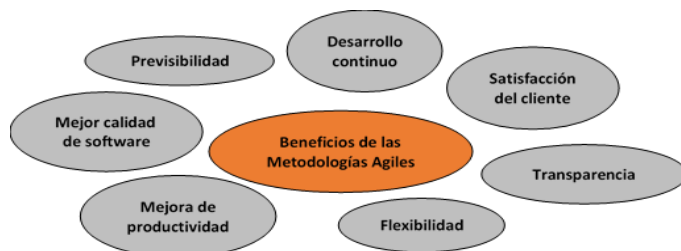


Fig. 1 Beneficios Ágiles (Matharu, Mishra, Singh, & Upadhyay, 2015)

El método ágil para desarrollar software se realiza a través de pequeñas etapas basadas en colaboración, planificación adaptativa, entrega temprana, mejora continua, comentarios de clientes y rediseño frecuente para lograr desarrollo incremental de software entregado en iteraciones y así poder responder a los cambios constantes. Es por lo antes mencionado, que las empresas adoptan la agilidad como recurso para reducir la complejidad del desarrollo de software y los requerimientos cambiantes de los usuarios (Matharu, Mishra, Singh, & Upadhyay, 2015).

Para visualizar las ventajas del enfoque ágil ante los métodos clásicos, en la Tabla 2 se muestran de forma general, características comparativas entre ambos enfoques:

Tabla 2 Enfoque Tradicional versus Ágil (Matharu et al., 2015)

Parámetros	Enfoque Tradicional	Enfoque Ágil
Adaptabilidad al cambio	Cambiar la sostenibilidad	Cambiar la adaptabilidad
Enfoque de desarrollo	Predictivo	Adaptativo
Orientado al desarrollo	Orientado al proceso	Orientado a las personas
Tamaño del proyecto	Grandes	Pequeños/Medianos
Planificación	A largo plazo	A corto plazo
Estilo de gestión	Controlado	Colaboración
Aprendizaje	Continuo en el desarrollo	Secundario al desarrollo
Documentación	Alta	Baja

Con base en los trabajos de (Moniruzzaman & Hossain, 2013) y (Pérez, 2012) donde se mencionan las metodologías ágiles más exitosas, se presenta de forma general la descripción de cuatro de las metodologías más destacadas.

El método de organización Lean Manufacturing, destaca como pionero en el objetivo de mejora continua y organización del sistema para satisfacer al cliente a través de entrega de productos y servicios de calidad que el cliente necesita, justo en el momento en que los necesita, en la cantidad requerida y al precio correcto, utilizando la mínima cantidad de materiales, trabajo y tiempo (Galgano, 2008). La filosofía Lean tiene como base cinco principios para disminuir desperdicios, los cuales se han adoptado desde la fundación de la empresa Toyota. Según (Martín, 2010), Lean distingue tres tipos de desperdicio en los procesos productivos que consumen recursos sin aportación de valor: *muda* o desperdicio, *mura* o irregularidad y *muri* o sobrecarga cuyo ejemplo es visible en la Figura 2.



Fig. 2 Objetivos Lean (Galgano, 2008)

De la mano de la automotriz Toyota, surge Kanban como metodología para gestionar proyectos, siendo el enfoque ágil con menor resistencia para adaptarse en empresas acostumbradas a métodos clásicos. Es una herramienta incluida en el método de abastecimiento *Justo a tiempo* el cual pertenece a la filosofía de producción Lean (Ríos, 2015). Su objetivo es gestionar como se van completando las tareas y en la actualidad se ha utilizado en la gestión de proyectos de desarrollo software ya que es una metodología adaptativa con la menor resistencia al cambio.

Kanban ha ganado popularidad en la industria del software ya que proporciona un medio para visualizar y limitar el progreso del trabajo durante el proceso de desarrollo de software (Matharu et al., 2015). Sus características generales son:

- Tablero Kanban para visualizar el flujo de trabajo.
- Maximizar productividad reduciendo inactividad.
- Iteraciones sucesivas con entregas de partes del producto.
- Solo tareas necesarias para reducir trabajo y tiempo perdido.

La Figura 3, muestra el funcionamiento de un tablero Kanban.



Fig. 3 Tablero Kanban (Matharu et al., 2015).

Una característica inherente de los enfoques ágiles, es la simplicidad. Es por ello que la metodología Extreme Programming enfocada en la satisfacción del cliente y el trabajo en equipo se ubica como una de las metodologías ágiles más populares ya que gerentes, clientes y desarrolladores son socios iguales en un equipo colaborativo con un entorno simple pero efectivo que les permite ser altamente productivos.

Su forma de trabajo tiene como base una serie de fases, valores, roles y reglas cuya simplicidad muestra su forma de trabajar en el diagrama de flujo de la Figura 4 (Wells, 2009):

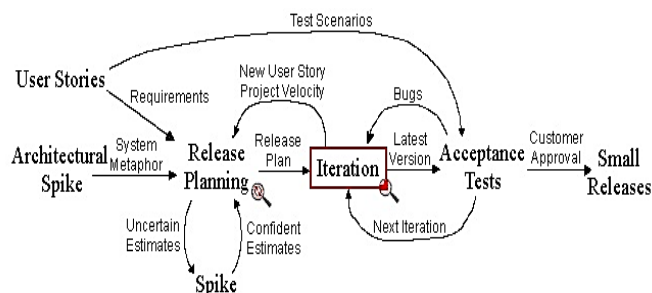


Fig. 4 Extreme Programming (Wells, 2009)

En la actualidad el método de desarrollo de proyectos más popular y favorito de muchas organizaciones a nivel mundial es SCRUM (SCRUMstudy, 2017). Organización, justificación de negocio, calidad, cambio y riesgo, son los cinco aspectos del enfoque SCRUM que aportan adaptabilidad y mejora para centrarse en el cliente y lograr entregables efectivos.

Tiene como base seis principios: control de proceso empírico, Auto-organización, Colaboración, Priorización basada en el valor, Bloque de tiempo y Desarrollo iterativo que le permiten adaptarse a cualquier tipo de proyecto. La Figura 5 muestra el modelo de funcionamiento de SCRUM basado en iteraciones.

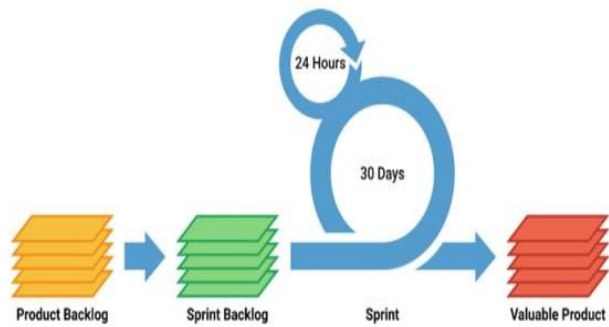


Fig. 5 Modelo SCRUM (Salza, Musmarra, & Ferrucci, 2019)

Con base en la revisión de metodologías tradicionales y ágiles, se describe la preferencia por el enfoque ágil, principalmente por su capacidad para adaptarse a diversos tamaños de proyectos y aceptar cambios en los requisitos durante el desarrollo, mientras que el enfoque tradicional es predecible y rígido en su proceso.

De las metodologías ágiles, SCRUM es la comúnmente más utilizada por las organizaciones de acuerdo a la Figura 6.

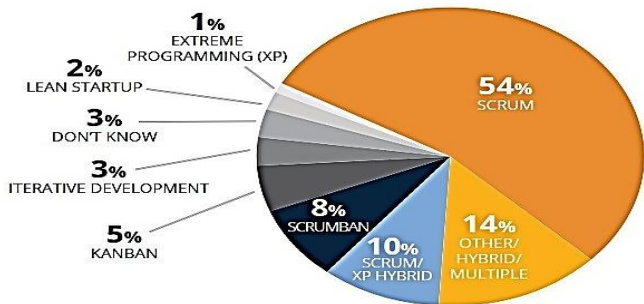


Fig. 6 Metodologías Ágiles (Version One, 2019)

Las ventajas de SCRUM respecto a otras metodologías ágiles radica principalmente en su capacidad para adaptarse a cualquier tipo de proyecto, lograr entregables funcionales continuos y con base en iteraciones, permitir cambios en los requisitos durante cualquier etapa del desarrollo.

Con base en el análisis de los enfoques clásico y ágil, la Tabla 3 muestra algunas ventajas de SCRUM ante la gestión tradicional.

Tabla 3 SCRUM versus tradicional (SCRUMstudy, 2017)

Característica	SCRUM	Gestión tradicional
Cambio	Actualización a lista de registro	Gestión del cambio
Documentación	Según se requiera	Integral
Énfasis	Personas	Procesos
Estilo de gestión	Descentralizado	Centralizado
Liderazgo	Colaborativo	Control
Organización	Auto organizada	Gestionada
Priorización de requerimientos	Según el valor del negocio	Fijo
Procesos	Iterativos	Lineales

Como se puede observar en la Tabla 3, las características de la metodología SCRUM motivan el cambio de paradigma en la forma de desarrollar sistemas de software. Para lograr la aplicación y aceptación de este enfoque ágil, se requiere de amplia difusión, presentación de casos de éxito y trabajos como el presentado aquí. La Figura 7 muestra las empresas en México que actualmente aplican SCRUM en sus procesos.



Fig. 7 Empresas mexicanas aplicando SCRUM (SCRUMstudy, 2017)

5. BIG DATA, RETOS Y SOLUCIONES.

La complejidad de los proyectos Big Data, radica principalmente en que el 85% de los datos generados no son estructurados. La Figura 8 muestra los tipos de datos SQL y noSQL.

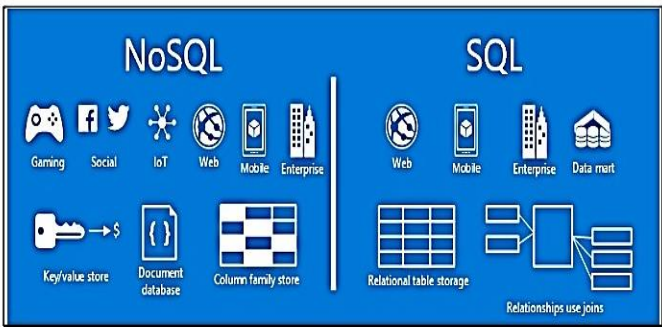


Fig. 8 Datos estructurados y no estructurados (Sena, 2017)

De acuerdo a (Srinivasu et al., 2017), los principales retos se encuentran en el volumen de datos generados por redes sociales, sensores y teléfonos inteligentes, el cual crece exponencialmente a ritmo de zeta bytes para 2020. La velocidad es un desafío importante porque desborda el flujo de datos ya que entran y salen de los sistemas en tiempo real. La complejidad en la variedad se debe a que la mayoría de datos se origina en nuevas fuentes. A los aspectos anteriores, se agregan desafíos de calidad y pertinencia de los datos, privacidad, seguridad y escalabilidad.

Con base en los cuatro puntos de vista para clasificar métodos, propuestos por (Iacovelli & Souveyet, 2008): uso, agilidad, aplicabilidad y productos. SCRUM destaca en los cuatro aspectos de los cuales, se presenta las características del aspecto de aplicabilidad en la Tabla 4.

Tabla 4 Aspectos de aplicabilidad (Iacovelli & Souveyet, 2008)

Punto de vista	Aspecto/Método	Lean	Kanban	XP	SCRUM
Aplicabilidad	Tamaño del proyecto	Pequeño	Pequeño	Pequeño	Pequeño/Grande
	Complejidad del proyecto	Baja	Baja	Baja	Alta
	Interacción con el cliente	Baja	Baja	Alta	Alta
	Interacción con usuarios finales	Baja	Baja	Baja	Alta
	Interacción entre miembros del equipo	Baja	Baja	Alta	Alta
	Integración de la novedad	Baja	Baja	Alta	Alta

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

Con base en la investigación de características de los cuatro enfoques ágiles con mayor éxito de implementación. Se determinó que SCRUM es recomendable para empresas que quieren integrar la agilidad en sus procesos. Los argumentos para recomendar SCRUM son: capacidad de adaptarse a todo tipo de proyectos, integrar cambios de requisitos, centrarse en el cliente para cumplir los objetivos y aumentar la productividad. Tiene como base las iteraciones para entregar valor continuo, colaboración y comunicación constante con el cliente y equipo de trabajo para alinearse con los objetivos comerciales.

SCRUM es la metodología que, por sus capacidades constituye una opción adecuada para atender las problemáticas presentes en el desarrollo de sistemas Big Data. Actualmente la investigación de este trabajo continua con un caso de estudio a través de un mapeo de la metodología SCRUM con las etapas del desarrollo de un sistema Big Data y visualizar como pueden aplicarse los principios ágiles de SCRUM.

Con esta metodología se pretende definir una alternativa inicial al desarrollo e implementación de sistemas Big Data considerando las características que hacen que estos proyectos sean inciertos y complejos. La metodología propuesta incluye la aplicación en tecnologías como servicios web, microservicios y aplicación de métricas de calidad para la obtención de productos que atiendan las problemáticas de los sistemas Big Data.

AGRADECIMIENTOS.

Al Tecnológico Nacional de México/CENIDET por el proyecto 6077.19-P “Generación y evaluación de servicios Web de aprendizaje” y al CONACYT por la beca nacional de Antonio Juan Capistran Abundez.

REFERENCIAS.

- Abrahamsson, P., Salo, O., & Warsta, J. (2002). Agile Software Development Review and Analysis. *VTT Technical Research Center of Finland*, (478), 112. <https://doi.org/10.1076/csed.12.3.167.8613>
- Ahmad, G., Soomro, T. R., & Broh, M. N. (2014). Agile Methodologies: Comparative Study and Future Direction. *European Academic Research*, I(11), 8826–8841. Retrieved from <http://euacademic.org/UploadArticle/273.pdf>
- Alexander, F. J., Hoisie, A., & Szalay, A. (2011). Demystifying Big Data. *Computing in Science and Engineering*, 13(6), 10–12. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.99>
- Ali, K. (2017). A Study of Software Development Life Cycle Process Models. *SSRN Electronic Journal*, 4(9), 92–95. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2988291>
- Arndt, T. (2018). Big Data and software engineering: prospects for mutual enrichment. *Iran Journal of Computer Science*, 1(1), 3–10. <https://doi.org/10.1007/s42044-017-0003-0>
- Awad, M. A. (2019). Software Development Methodologies. *Project Management of Large Software-Intensive Systems*, 49–66. <https://doi.org/10.1201/9780429027932-4>
- Barranco Fragoso, R. (2012). ¿Qué es Big Data? *IBM DeveloperWorks*, 1–10. Retrieved from <https://www.ibm.com/developerworks/ssa/local/im/que-es-big-data/>
- Franková, P., Drahošová, M., & Balco, P. (2016). Agile Project Management Approach and its Use in Big Data Management. *Procedia Computer Science*, 83(Ant), 576–

583. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.272>
- Galgano, G. (2008). *Introducción a la metodología lean*. 28.
- Iacovelli, A., & Souveyet, C. (2008). Framework for agile methods classification. *CEUR Workshop Proceedings*, 341, 91–102.
- Martín, M. Á. M. (2010). *Filosofía Lean*. 33–58.
- Matharu, G. S., Mishra, A., Singh, H., & Upadhyay, P. (2015). Empirical Study of Agile Software Development Methodologies. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 40(1), 1–6.
<https://doi.org/10.1145/2693208.2693233>
- Moniruzzaman, A. B. M., & Hossain, D. S. A. (2013). *Comparative Study on Agile software development methodologies*. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1307.3356>
- Pérez, M. J. (2012). Guía Comparativa de Metodologías Ágiles. *Universidad de Valladolid*, 3–117. Retrieved from <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/1495/1/TFG-B.117.pdf>
- Pressman, R. S. (2012). Ingeniería Del Software I. In *Ingeniería Del Software I*.
- Ríos, J. S. P. de los. (2015). *Implementación del método Kanban en Colombia*. 205.
- Salza, P., Musmarra, P., & Ferrucci, F. (2019). Agile and Lean Concepts for Teaching and Learning. In *Agile and Lean Concepts for Teaching and Learning*.
<https://doi.org/10.1007/978-981-13-2751-3>
- SCRUMstudy. (2017). *Guía de conocimiento de Scrum*. Retrieved from www.scrumstudy.com
- Sena, M. (2017). Como pasar de SQL a NoSQL sin sufrir. Retrieved from <https://medium.com/techwomenc/como-pasar-de-sql-a-nosql-sin-sufrir-e34dd22349e5>
- Srinivasu, M. A., Koushik, A., & Santhosh, E. B. (2017). Big Data Challenges and Solutions. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 5(10), 250–255.
<https://doi.org/10.26438/ijcse/v5i10.250255>
- Tarwani, S., & Chug, A. (2016). Agile methodologies in software maintenance: A systematic review. *Informatica (Slovenia)*, 40(4), 415–426.
<https://doi.org/10.31449/inf.v40i4.1182>
- Version One. (2019). The 13th annual STATE OF AGILE(TM) Report. *CollabNet | VersionOne*, 13.
- Wells, J. D. (2009). The Rules of Extreme Programming. Retrieved from <http://www.extremeprogramming.org/>

Comparación de OpenCV y DLIB para detección del rostro en ambientes no controlados

Wendy Valderrama Cardenas, Andrea Magadán Salazar *

*Departamento de Ciencias Computacionales
Tecnológico Nacional de México/CENIDET
{wendy.valderrama17ca, magadan}@cenidet.edu.mx*

Resumen: La variación en las condiciones de iluminación y pose del rostro frente a la cámara, son un gran obstáculo para la operación eficiente de los sistemas de reconocimiento facial. Una etapa importante de estos sistemas es la detección correcta del rostro frente a los efectos del cambio en las condiciones de iluminación ambientales, la formación de sombras y las imágenes oscuras. Este documento evalúa tres métodos de detección de rostros, sus ventajas y desventajas en función de la tasa de aciertos y la velocidad de detección, aplicado a imágenes con mala iluminación de ambientes no controlados (oscuras, luminosas, luz en una sola zona), una posición frontal a la cámara, además de evaluar la robustez de los algoritmos en rostros con una rotación de 90° frente a la cámara.

Palabras clave: Detección, rostro, ambiente no controlado, reconocimiento facial.

1. INTRODUCCIÓN

La detección del rostro es una etapa importante para los sistemas de reconocimiento facial, ya que tiene el propósito de localizar y extraer la región del rostro del resto de la imagen, para posteriormente generar los descriptores (a través de distancias) y realizar el reconocimiento facial.

Existen diversos algoritmos para lograr una detección del rostro adecuada; sin embargo, no todos los métodos ofrecen las mismas ventajas frente a imágenes en ambientes no controlados.

Existen diversos algoritmos que se han propuesto para abordar el problema, este documento evalúa tres propuestas que son: modelo Haar-like de OpenCV (Wilson & Fernandez, 2006), histograma orientado a gradiente (HoG) (Dalal & Triggs, 2010) y detección de objetos Max-Margin (D. E. King, 2015), encontrándose las dos últimas en la librería Dlib (D. E. King, 2009).

La principal aportación de este artículo es el estudio de las ventajas y desventajas que ofrecen los algoritmos evaluados, frente a imágenes de entornos no controlados, así como el tiempo de procesamiento de cada uno de ellos. El resto del documento está organizado de la siguiente manera: en la sección dos se analiza la metodología de los algoritmos, en la sección tres se presenta la experimentación realizada, en este caso y se analizan los resultados obtenidos. Finalmente, se dan las conclusiones respecto a cada propuesta.

2. TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN DEL ROSTRO

Conocer el funcionamiento, ventajas y desventajas de las tres técnicas revisadas en este trabajo, ayudará a determinar cuál es

el adecuado para utilizar en determinado problema a resolver. En esta sección se explican, brevemente, los algoritmos que se están comparando en este trabajo.

2.1 Haar-like de OpenCV (Wilson & Fernandez, 2006)

Esta librería se basa en la extracción de características Haar, ellas usan el cambio en los valores de contraste entre grupos de píxeles rectangulares adyacentes en lugar de usar los valores de intensidad de un píxel. Las variaciones de contraste entre los grupos de píxeles se utilizan para determinar las áreas claras y oscuras relativas.

Dos o tres grupos adyacentes con una variación relativa de contraste forman una característica Haar. Las características de tipo Haar, como se muestra en la Figura 1, se utilizan para detectar una imagen; además, se pueden escalar fácilmente aumentando o disminuyendo el tamaño del grupo de píxeles que se está examinando, lo que permite tener una gran flexibilidad en su aplicación (Rainer Lienhart & Jochen Maydt, 2002).

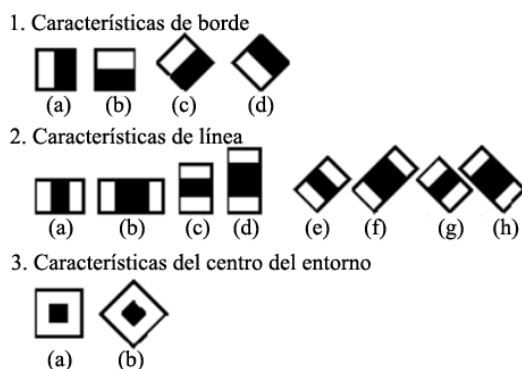


Fig. 1 Características comunes de *Haar* (Wilson & Fernandez, 2006)

Las características rectangulares simples de una imagen se calculan utilizando una representación intermedia de una imagen, llamada imagen integral (Viola & Jones, 2005). La imagen integral es una matriz que contiene las sumas de los valores de intensidad de los píxeles ubicados directamente a la izquierda de un píxel y directamente encima del píxel en la ubicación (x, y) . Entonces, si $A[x, y]$ es la imagen original y $AI[x, y]$ es la imagen integral, tenemos que la imagen integral se calcula como se muestra en la ecuación 1 y se ilustra en la Figura 2.

$$AI[x, y] = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} A(x', y') \quad (1)$$

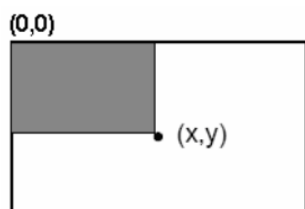


Fig. 2 Área sumada de imagen integral (Wilson & Fernandez, 2006)

2.2 HoG (Dalal & Triggs, 2010)

En 2010, Dalal y Triggs (Dalal & Triggs, 2010) propusieron los descriptores de características de histograma de gradientes orientados (HoG por sus siglas en inglés). Como un método para la detección de personas, y que posteriormente se emplearía en algoritmos de detección de objetos más generales. La idea principal se basa en que la apariencia local y la forma de un objeto pueden describirse mediante la distribución de gradientes de intensidad o direcciones de los bordes. La técnica cuenta el número de ocurrencias de una orientación del gradiente en determinadas regiones de la imagen. El método tiene similitudes con SIFT (Lowe, 1999) y con contextos de forma (Belongie, Malik, & Puzicha, 2002) aunque se diferencia de estos métodos en que se calcula en una rejilla densa de celdas espaciadas uniformemente (ver figura 3) y que utiliza

una normalización del contraste local para incrementar la precisión (Alegre, Pajares, & Junio, 2016).

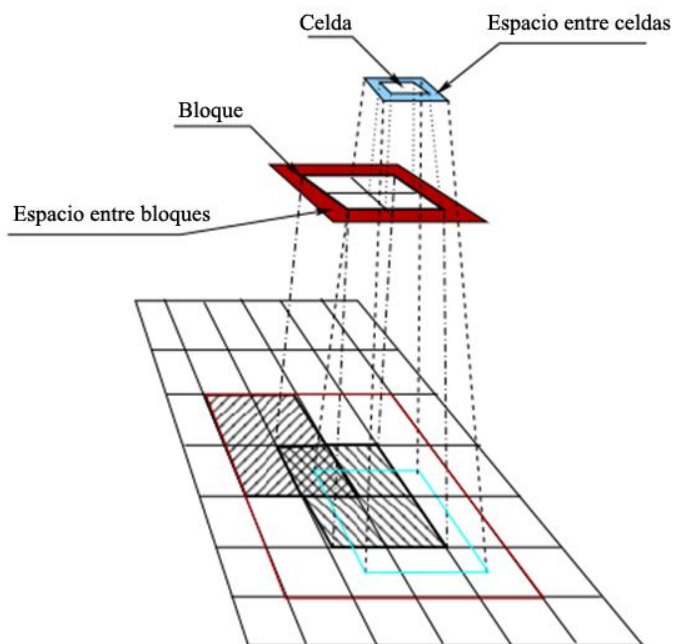


Fig. 3 Niveles de características HoG (Dahmane & Meunier, 2011)

2.3 Detección de objetos de margen máximo (D. E. King, 2015)

La detección de objetos de margen máximo (MMOD por sus siglas en inglés) es utilizada para aprender a detectar objetos en imágenes. Este método no realiza ningún sub-muestreo, sino que optimiza todas las sub-ventanas. MMOD se puede utilizar para mejorar cualquier método de detección de objetos que sea lineal en los parámetros aprendidos, como HoG o modelos de bolsa de palabras visuales (D. E. King, 2015).

La librería Dlib cuenta con una implementación del algoritmo MMOD con la extracción de características por medio de redes neuronales convolucionales seguida de un único filtro lineal. Esto significa que es incapaz de aprender a detectar objetos que exhiben variaciones complejas de pose o tienen variabilidad en su apariencia.

La herramienta contiene un modelo entrenado que se proporciona como parte de los programas de ejemplo de Dlib. Este modelo es una red ResNet con 29 capas convolucionales, es esencialmente una versión de la red ResNet-34 del artículo *Deep Residual Learning for Image Recognition* (Hembury, Borovkov, Lintuluoto, & Inoue, 2003) con algunas capas eliminadas y la cantidad de filtros por capa reducida a la mitad. La red fue entrenada desde cero en un conjunto de datos de aproximadamente 3 millones de caras derivado de una serie de conjuntos de datos (D. King, 2019).

3. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Los algoritmos fueron probados en Microsoft Visual community C++ 2015 con la librería OpenCV 3.4.0 (Intel, 2017) y Dlib 19.15 (D. King, 2015). Las pruebas se ejecutaron en un sistema Windows 8.1 de 64bits con procesador Core i5-3230M (2.60GHz) y 4 Gb de RAM.

Bancos de imágenes

- *Faces94* (Libor, 2007): contiene 14 imágenes de 200 personas, en total 2800. Las imágenes fueron capturadas de sujetos sentados a una distancia fija a la cámara mientras hablan frente a ésta. La iluminación es uniforme con un fondo verde.
- *FEI FaceDatabase* (Thomaz, 2012): contiene un conjunto de imágenes faciales tomadas entre junio de 2005 y marzo de 2006 en el laboratorio de inteligencia artificial de la FEI en São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil. El banco de imágenes se integró, principalmente, por estudiantes y el personal; contiene 20 imágenes de 152 individuos, en total 3040 imágenes. Cuenta con imágenes con rotación en el rostro, además de una imagen completamente oscura por individuo.
- Banco de imágenes propio: contiene 30 imágenes de 20 individuos, en total 600 imágenes, las cuales presentan variabilidad en la iluminación (oscuras, luminosas, luz en una sola zona) resolución y posición del rostro frente a la cámara.

Se realizaron 4 tipos de pruebas, con el objetivo de evaluar las tres técnicas revisadas en la sección 3, bajo diferentes condiciones, organizadas de la siguiente manera:

Prueba 1: Imágenes con mala iluminación (oscuras), en la figura 4 se muestra un ejemplo de las imágenes.



Fig. 1 Muestra de imágenes con diferentes niveles de oscuridad

Prueba 2: Imágenes en entornos no controlados, en la figura 5 se muestra un ejemplo de las imágenes.

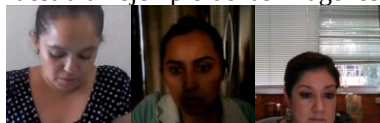


Fig. 2 Muestra del banco de imágenes propio con entornos no controlados.

Prueba 3: Imágenes con oclusión parcial del rostro (lente, barba y bigotes), en la figura 6 se muestra un ejemplo de las imágenes.

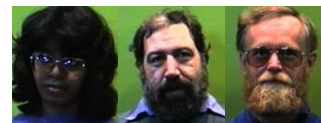


Fig. 3 Muestra del banco de imágenes con oclusión parcial

Prueba 4: Imágenes con rotación del rostro de 70° a 90°, en la figura 7 se muestra un ejemplo de las imágenes.



Fig. 4 Muestra del banco de imágenes FEI FaceDatabase con rotación en dos direcciones

Las pruebas son evaluadas en términos de la métrica exactitud, además de realizarse una comparación en tiempo de procesamiento de las imágenes.

Exactitud (Basso, 2015)

Porcentaje general de los datos clasificados correctamente. Se refiere a la dispersión del conjunto de valores, cuanto menor es la dispersión mayor es la exactitud. Se representa por la proporción entre el número de predicciones correctas (tanto positivas como negativas) y el total de predicciones (ver ecuación 2).

$$Exactitud = \frac{VP + VN}{VP + VN + FN + FP} \quad (2)$$

En donde:

- VP es la cantidad de positivos que fueron clasificados correctamente como positivos por el modelo.
- VN es la cantidad de negativos que fueron clasificados correctamente como negativos por el modelo.
- FN es la cantidad de positivos que fueron clasificados incorrectamente como negativos.
- FP es la cantidad de negativos que fueron clasificados incorrectamente como positivos.

Resultados

Prueba 1

Para las pruebas con imágenes con mala iluminación (Oscuras), se realizaron pruebas con el banco de imágenes *FEI FaceDatabase*, tomando imágenes con diferentes grados de oscuridad, haciendo un total de 200 imágenes.

Los resultados de exactitud expresados en porcentaje (figura 8), muestran que el algoritmo *Haar-like* de OpenCV tiene un mejor desempeño en imágenes oscuras en comparación con los algoritmos *HoG* y *MMOD* de Dlib.

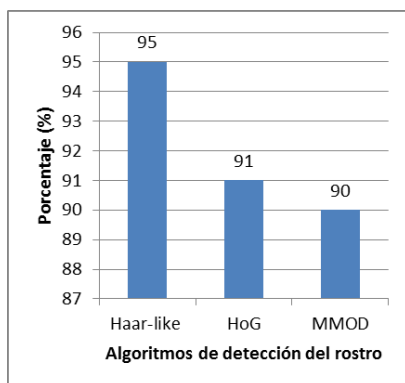


Fig. 5 Resultados de los algoritmos en las bibliotecas de OpenCV y Dlib aplicados a imágenes oscuras.

En la figura 9 se muestra un ejemplo de la detección del rostro con los algoritmos *Haar-like* de OpenCv, *HoG* y *MMOD* de Dlib, en donde se observa que para la misma imagen oscura el algoritmo MMOD no detecta un rostro mientras los otros dos si logran detectarlo.



Fig. 6 Ejemplo de los resultados de la detección del rostro por algoritmo, aplicado a imágenes oscuras

Prueba 2

Las pruebas con imágenes en entornos no controlados, se realizaron con el banco de imágenes propio, tomando imágenes con diferente resolución, iluminación y posición del rostro frente a la cámara, haciendo un total de 600 imágenes para las pruebas.

Los resultados de exactitud expresados en porcentaje (figura 10), muestran que el algoritmo MMOD de Dlib tiene un porcentaje de 100% seguido del algoritmo HoG de la misma librería, dejando en último lugar a Haar-like de OpenCV. Con este resultado se observa que el desempeño de la librería Dlib con el algoritmo MMOD tiene mejor robustez ante este tipo de aspectos presentes en imágenes reales.

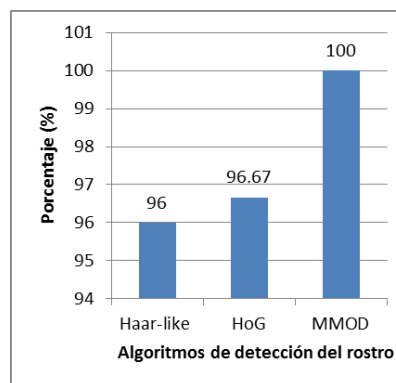


Fig. 7 Resultados de los algoritmos en las bibliotecas de OpenCV y Dlib aplicados a imágenes de entornos no controlados

En la figura 11 se muestra un ejemplo de la detección del rostro con los algoritmos *Haar-like* de OpenCv, *HoG* y *MMOD* de Dlib, en donde se observa que para la misma imagen el algoritmo *Haar-like* no detecta un rostro mientras los otros dos si logran detectarlo.



Fig. 8 Ejemplo de los resultados de la detección del rostro por algoritmo, aplicado al banco de imágenes propio

Prueba 3

Las pruebas con imágenes con oclusión parcial del rostro (lente, barba y bigotes), se realizaron con el banco de imágenes *Faces94*, teniendo un total de 39 imágenes para la prueba.

Los resultados de exactitud expresados en porcentaje (figura 12), muestran que los tres algoritmos obtienen 100% de exactitud demostrando robustez en este escenario.

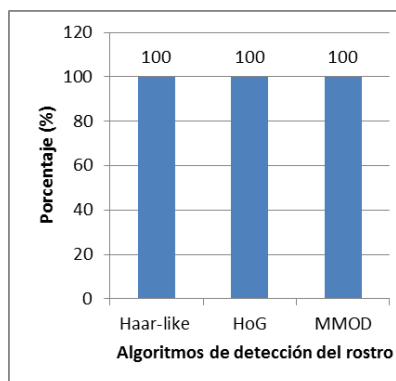


Fig. 9 Resultados de los algoritmos en las bibliotecas de OpenCV y Dlib aplicados a imágenes con oclusión parcial

En la figura 13 se muestra un ejemplo de la detección del rostro con los algoritmos *Haar-like* de OpenCv, *HoG* y *MMOD* de Dlib, en donde se observa que para la misma imagen los tres algoritmos logran detectar el rostro, este resultado se obtiene en todas las imágenes de esta prueba.

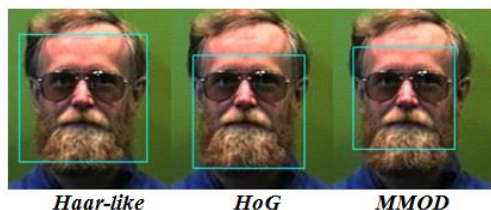


Fig. 10 Ejemplo de los resultados de la detección del rostro por algoritmo, aplicado a imágenes con oclusión parcial

Prueba 4

Las pruebas con rotación en el rostro, se realizaron con el banco de imágenes *FEI FaceDatabase*, tomando imágenes con rotación del rostro en dos direcciones haciendo un total de 800 imágenes para pruebas.

Los resultados de exactitud expresados en porcentaje (figura 14), muestran que el algoritmo *MMOD* de la librería Dlib tiene un porcentaje de 100% seguido del algoritmo *HoG* de la misma librería. Con este resultado se observa que la robustez de la librería Dlib con el algoritmo *MMOD* es mejor ante este tipo de imágenes.

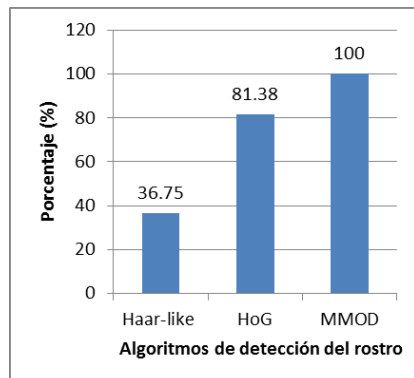


Fig. 11 Resultados de los algoritmos en las bibliotecas de OpenCV y Dlib aplicados a imágenes con rotación del rostro

En la figura 15 se muestra un ejemplo de la detección del rostro con los algoritmos *Haar-like* de la librería OpenCv, *HoG* y *MMOD* de la librería Dlib, en donde se observa que para la misma imagen los algoritmos de la librería Dlib logran detectar correctamente el rostro. El análisis de los resultados mostró que el algoritmo *Haar-like* de OpenCV funciona bien cuando el rostro se encuentra perfectamente de frente, en caso contrario, aún con ligeras rotaciones no lo detecta. Por lo cual no es una buena opción para sistemas con imágenes no controladas.

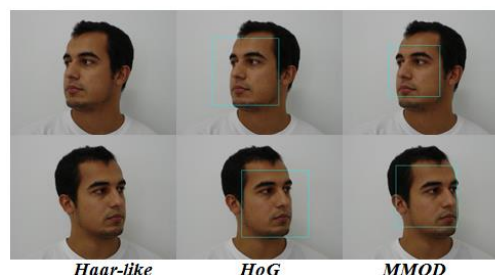


Fig. 12 Ejemplo de los resultados de la detección del rostro por algoritmo, aplicado a imágenes con rotación en dos direcciones

Prueba de tiempo

En la Tabla I, se observa que el promedio de tiempo por imagen con el algoritmo *Haar-like* de la librería OpenCV es menor que los tiempos de la librería Dlib. Además, se observa que con el algoritmo *MMOD* la variación del tiempo de procesamiento de la imagen está ligada a la dimensión de la misma, esto se hace evidente con la diferencia de tiempos entre la prueba 3, en la cual las imágenes manejan una dimensión de 180 x 200 y las pruebas 1, 2 y 4, con resoluciones de 640 x 480 hasta 1280 x 720.

Tabla 1 promedio de tiempos de procesamiento por imagen expresado en segundos

Numero de. prueba	Algoritmos		
	Haar-like	HoG	MMOD
Prueba 1	0.06948617	0.51004901	8.67379994
Prueba 2	0.08131874	0.51439847	10.7581652
Prueba 3	0.03541051	0.43243667	1.13869905
Prueba 4	0.06536804	0.51019406	8.84115105

4. DISCUSIÓN

Después de analizar los resultados obtenidos en las diferentes pruebas se puede observar que:

- La robustez que muestra el algoritmo *Haar-like* de la librería OpenCV es buena en la mayoría de los escenarios mostrando un porcentaje superior al 95%, excepto en las imágenes con rotación, debido a que se observa que en estas, es el que tiene menor porcentaje respecto a los otros dos algoritmos. Sin embargo, se contrasta con el tiempo de procesamiento por imagen que es menor, dando como resultado un algoritmo que tiene buen desempeño en un sistema en tiempo real, pero con ciertas limitaciones como lo es la rotación del rostro.
- El algoritmo *HoG* de la librería Dlib tiene un buen desempeño en los cuatro casos de prueba manteniendo un porcentaje por arriba del 80 %, el porcentaje más bajo se tiene en la prueba rotación del rostro; sin embargo, a pesar de ello el porcentaje se considera aceptable. En contraste con el tiempo si bien no es el más bajo tampoco supera el segundo por imagen, dejando a este algoritmo como una buena opción para sistemas en tiempo real que se requiera mayor exactitud en la detección del rostro.

- El algoritmo *MMOD* de la librería Dlib tiene resultados muy buenos en las pruebas 2, 3 y 4, obteniendo un 100% de exactitud mientras que en la prueba 1 alcanza un 90%. Esto indica que es el algoritmo con mayor robustez ante entornos no controlados, sin embargo, el costo en tiempo es muy elevado debido a que el tiempo de procesamiento por imagen es proporcional a las dimensiones de las mismas, siendo una muy buena opción para sistemas que requieran de una gran precisión, pero una mala opción para sistemas en tiempo real.

5. CONCLUSIÓN

Los tres algoritmos evaluados en este estudio muestran ventajas ante diferentes problemas de los entornos no controlados, no obstante, el tiempo de procesamiento por imagen es un factor determinante al momento de decidir cual se debe utilizar de acuerdo a las necesidades del sistema que se desea realizar.

El algoritmo *HoG* de la librería Dlib demuestra tener un buen equilibrio entre la exactitud de detección del rostro en entornos no controlados y el tiempo de procesamiento por imagen, siendo una buena opción para sistemas de tiempo real.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), así como al CONACYT por el apoyo brindado para realizar esta investigación.

REFERENCIAS

- Alegre, E., Pajares, G., & Junio, E. (2016). *Conceptos y Métodos en visión por computador*.
- Basso, D. (2015). Propuesta de Métricas para Proyectos de Explotación de Información. In *Revista Latinoamericana de Ingeniería de Software* (Vol. 2, p. 157). <https://doi.org/10.18294/relais.2014.157-218>
- Belongie, S., Malik, J., & Puzicha, J. (2002). Shape matching and object recognition using shape contexts. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine In*, 24 No 4, pp 509-522.
- Dahmane, M., & Meunier, J. (2011). Emotion recognition using dynamic grid-based HoG features. *IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition and Workshops*, 884–888. <https://doi.org/10.1109/FG.2011.5771368>
- Dalal, N., & Triggs, B. (2010). Histograms of Oriented Gradients for Human Detection. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 886–893.
- Hembury, G. A., Borovkov, V. V., Lintuluoto, J. M., & Inoue, Y. (2003). Deep Residual Learning for Image Recognition Kaiming. *Chemistry Letters*, 32(5), 428–429. <https://doi.org/10.1246/cl.2003.428>
- Intel. (2017). OpenCV. Retrieved from <https://www.opencv.org/>

- King, D. (2015). dlib C++ Library. Retrieved from [Www.Dlib.Net](http://www.dlib.net)
- King, D. (2019). Documentacion Dlib. Retrieved from <https://github.com/davisking/dlib-models>
- King, D. E. (2009). Dlibml: A Machine Learning Toolkit. *Journal of Machine Learning Research*, 10, 1755–1758. <https://doi.org/10.1145/1577069.1755843>
- King, D. E. (2015). Max-Margin Object Detection. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1502.00046>
- Libor, S. (2007). Collection of facial images: Faces94. Retrieved from <http://cswwww.essex.ac.uk/mv/allfaces/faces94>
- Lowe, D. G. (1999). Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. *Iccv*, 99 No 2, 1150–1157.
- Rainer Lienhart, & Jochen Maydt. (2002). An Extended Set of Haar-like Features for Rapid Object Detection. *Proceedings. International Conference on Image Processing*, 1, 0–3.
- Thomaz, D. C. E. (2012). FEI Face Database. Retrieved from <https://fei.edu.br/~cet/facedatabase.html>
- Viola, P., & Jones, M. (2005). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features, (July 2014), I-511-I-518. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2001.990517>
- Wilson, P., & Fernandez, J. (2006). Facial feature detection using Haar classifiers. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 21(4), 127–133.

Red Neuronal Convolutiva y de Filtrado para la Supresión de Lluvia y Niebla en Imágenes de Conducción

Antonio Luna Álvarez, Dante Mújica Vargas

Tecnológico Nacional de México / CENIDET
Cuernavaca Morelos, México
{jesus.luna18ce, dantemv}@cenidet.edu.mx

Resumen: En este artículo se presenta una estrategia de supresión de lluvia y niebla presente en imágenes utilizadas para la autoconducción mediante un modelo de Red Neuronal Convolutiva con capas de Filtro Guiado. Se demostró la efectividad de la red para el mejoramiento de las imágenes frente a los métodos más utilizados en la literatura.

Palabras clave: Redes Neuronales Convolutivas, Supresión de lluvia, Supresión de niebla, Autoconducción de vehículos.

1. INTRODUCCIÓN

Para que un vehículo pueda autoconducirse es necesario un sistema de control y un módulo de percepción. Para el sistema de control la técnica más utilizada y que se ha mostrado como la más efectiva es el uso de las redes neuronales de aprendizaje profundo Tian et al. (2018); Bojarski et al. (2017). Existen variedad de modelos diseñados para realizar dicha tarea, estos dependen del módulo de percepción, que en la mayoría trabajan con la fusión de sensores infrarrojos, GPS y sobre todo cámaras Chen et al. (2016). El uso de imágenes de entrenamiento es indispensable, sin embargo en la etapa operacional se encuentra con una de las mayores dificultades en esta tarea; las condiciones climáticas Sivak and Schoettle (2015). La mayoría de los modelos de la literatura son capaces de realizar el control del vehículo solamente en las condiciones climáticas con los que fueron entrenados, lo que provoca que la autonomía sea descartada cuando se presenta lluvia u otras condiciones climáticas en el camino.

Se han propuesto diversos métodos para la supresión de lluvia y niebla en imágenes para resolver el problema de visibilidad. Las técnicas más comunes son basadas en filtros de difuminado y clasificación no supervisada local Du et al. (2018); Jin et al. (2018), así como métodos de agrupamiento no local Kim et al. (2013); Berman et al. (2016) y sistemas difusos Patil and Havaldar (2016). Otra solución es utilizar técnicas basadas en regresión no lineal en los espacios de color de una imagen Luo et al. (2015); Bui and Kim (2017) y filtros bilaterales Yu et al. (2010). Las propuestas anteriores reportan buenos resultados para la limpieza de una imagen, sin embargo el tiempo de respuesta es variable. El objetivo en este documento es lograr que un método sea operativo en

tiempo real y sea compatible un sistema que realice la autoconducción. En este documento se ofrece una solución basada en el Filtro Guiado He et al. (2012); He and Sun (2015) expresado como una capa de filtrado en una Red Neuronal Convolutiva. Se ha demostrado que este filtro tiene la capacidad de realizar el mejoramiento de la imagen en videos Lin and Wang (2012), lo cual indica que es apto para operar en tiempo real.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Filtro Guiado

Derivado de un modelo lineal local, calcula la salida de filtrado al considerar el contenido de una imagen de referencia (*ground truth*) He et al. (2012). Se puede utilizar como operador de suavizado para preservar los bordes como el filtro bilateral Tomasi and Manduchi (1998). El suavizado de este filtro transfiere la información de la referencia a la imagen a procesar, lo que permite aplicaciones como el desempaño. En el algoritmo se define un proceso de filtrado de traslación lineal variante que implica una imagen de guía y y una imagen de entrada x , obteniendo como salida una imagen $\tilde{x}$. La salida filtrada en el pixel i es expresada como una media ponderada:

$$\tilde{x}_i = \sum_{j=0}^J \omega_{ij}(y) x_j \quad (1)$$

i y j son índices de pixel. El filtro ω está en función de la imagen de guía y y es independiente de x . El filtro guiado es impulsado por un modelo lineal local:

$$\tilde{x} = a_k y_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (2)$$

donde i es el índice de un píxel, y k es el índice de una ventana cuadrada local ω con un radio r . Dada la imagen x , minimizando el error de reconstrucción entre x y $\tilde{x}$ da:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} i_i x_i - \mu_k \bar{x}_k}{\sigma_k^2 + \epsilon} \quad (3)$$

$$b_k = \bar{x}_k - a_k \mu_k \quad (4)$$

μ_k y σ_k son la media y la varianza de y en la ventana k , y ϵ es un parámetro de regularización que controla el grado de suavidad. La salida de filtrado se calcula mediante la Ecuación (5), donde $\tilde{a}_i$ y $\tilde{b}_i$ representan la media de a y b respectivamente en la ventana ω centrada en i .

$$\tilde{x}_i = \tilde{a}_i y_i + \tilde{b}_i \quad (5)$$

2.2 Red Neuronal Convolutiva

Estas redes realizan la operación de convolución de señales en dos dimensiones utilizando filtros (llamados *kernel*) que aprenden a en el entrenamiento. Para extraer las características más importantes, el filtro realiza la convolución 2D a la imagen de entrada:

$$y_{n_1, n_2} = \sum_{k_2=0}^{M-1} \sum_{k_1=0}^{N-1} x_{k_1, k_2} w_{n_1+k_1, n_2+k_2} \quad (6)$$

donde N y M son las dimensiones de la imagen, n_1 y n_2 representan los índices del píxel central y cumplen $0 \leq n_1 \leq M-1$, $0 \leq n_2 \leq N-1$. k_1 y k_2 los índices del kernel. Para entrenar las capas convolucionales, se utiliza la retropropagación del error ∂L . Esto es muy similar a la retropropagación para una red perceptrón multicapa, la diferencia es que las conexiones de peso están dispersas, ya que las diferentes áreas de entrada comparten los mismos pesos para crear un mapa de características.

3. RED CONVOLUCIONAL CON FILTRO GUIADO

Este modelo es construido a partir de una arquitectura totalmente convolutiva basada en la propuesta de Wu et al. (2018). Su es recibir como entrada un conjunto de imágenes con obstrucciones climáticas y como salida una imagen mejorada a partir del filtrado aplicado con el paso de las capas convolucionales y dos filtros guiados.

Como se muestra en la Figura 1, el modelo recibe como entrada dos tipos de imágenes con distinta obstrucción por cada iteración, además del respectivo *ground truth*. El proceso de filtrado hacia adelante inicia por la capa $C1$ que convoluciona la imagen de entrada X mediante la operación mostrada en la Ecuación (6). $C1$ se conforma $k = 3$ filtros w de dimensión 3×3 y bias b , rectificados por la función Unidad Lineal Rectificada $\sigma(x) = \max(0, x)$:

$$C1_{i,j}^k = \sigma \left(\sum_{d=0}^2 \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^2 w_{d,m,n}^k * X_{i+m, j+n}^d + b_{d,m,n}^k \right) \quad (7)$$

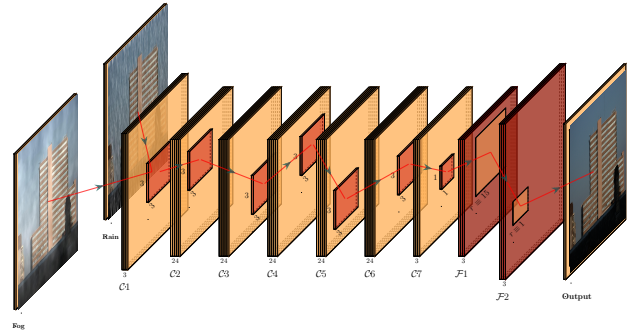


Figura 1. Modelo neuronal propuesto.

donde i y j los índices centrales de la ventana de convolución y d los índices de mapas de características de entrada, que en esta capa representa los canales de color de X . En este modelo no existen capas de reducción o *pooling*, por lo que el tamaño de los mapas de características se mantiene de 160×320 de entrada a salida. En la capa $C2$ se expande el número de filtros a $k = 24$ de tamaño 3×3 operando los 3 mapas obtenidos en $C1$ mediante:

$$C2_{i,j}^k = \sigma \left(\sum_{d=0}^2 \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^2 w_{d,m,n}^k * C1_{i+m, j+n}^d + b_{d,m,n}^k \right) \quad (8)$$

de la capa $C2$ se obtiene como salida 24 mapas de características, estos son propagados como entrada a la capa $C3$ que de igualmente está conformada por 24 filtros de 3×3 .

$$C3_{i,j}^k = \sigma \left(\sum_{d=0}^{23} \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^2 w_{d,m,n}^k * C1_{i+m, j+n}^d + b_{d,m,n}^k \right) \quad (9)$$

Este proceso es repetido hasta la capa $C6$ manteniendo 24 mapas de 160×320 . La capa $C7$ tiene la tarea de hacer la reducción a 3 mapas que representan los canales de color RGB para la imagen de salida. La capa tiene $k = 3$ filtros de tamaño 1×1 , por lo que se simplifica la Ecuación (10).

$$C7_{i,j}^k = \sigma \left(\sum_{d=0}^2 w_d^k * C6_{i,j}^d + b_d^k \right) \quad (10)$$

La capa $F1$ aplica el Filtro Guiado mostrado en la Subsección 2.1 expresado como una capa de la red. El algoritmo es resumido en una capa de la red e interpretado con la Ecuación (11), donde la función $f(x, r)$ está dada por la Ecuación (1) y que r representa el radio de la ventana de filtrado. La salida de esta capa es la imagen mejorada conservando el mismo tamaño:

$$\mathcal{F}1 = \left[\frac{f\left(\frac{S_{xy}}{\sigma^2(C7)+\epsilon}, 15\right)}{N} * C7 + f\left(\bar{y} - \frac{f\left(\frac{S_{C7y}}{\sigma^2(C7)+\epsilon}, 15\right)}{N} * C7, 15\right) \right]^T \quad (11)$$

donde S representa la covarianza entre la entrada y el *ground truth* y , $\sigma^2(x)$ es la varianza de la entrada y N es una matriz utilizada para calcular la media de la entrada. Para la capa $\mathcal{F} \in$ se opera de la misma manera, sin embargo se utiliza el parámetro $r = 1$, por lo que se hace el filtrado por cada píxel. Estas capas son autosupervisadas ya que dependen de la imagen de referencia para realizar el filtrado, por ello no tienen parámetros entrenables, el resto del modelo es entrenado con el método ADAM de Kingma and Ba (2014) para la retropropagación del error.

4. EXPERIMENTACIÓN

4.1 Datos

La base de datos utilizada fue creada a partir del simulador de vehículos autoconducidos Udacity, se grabó la conducción y se agregó lluvia y niebla a las imágenes artificialmente a partir de 5 máscaras. Cuenta con 27,500 instancias con su respectivo *ground truth*, siendo un total de 33,000 imágenes. Cada una tiene un tamaño de 160×320 en formato RGB .jpg con peso de 13.3 kB cada una y un peso neto de 378.7 MB. Se observa una muestra de los tipos de instancias en la Figura 2.

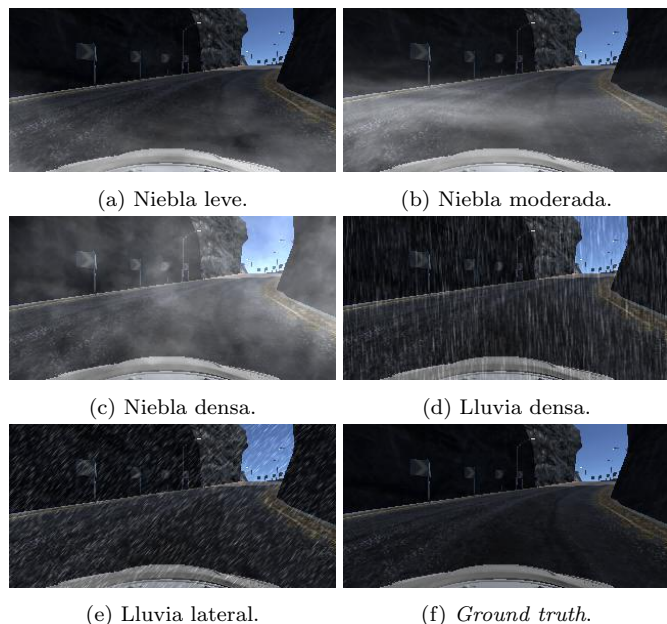


Figura 2. Muestra de la base de datos propuesta.

4.2 Evaluación

Para realizar una evaluación completa de los resultados es necesario medir la similitud entre la imagen obtenida y el *ground truth*, así como el ruido que presenta el resultado.

Para evaluar los resultados se toma como primera métrica el Error Cuadrático Medio (12), esta distancia mide la disimilitud entre la imagen obtenida y el *ground truth*, donde un valor de 0 indica imágenes idénticas.

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{i,j} - y_{i,j})^2 \quad (12)$$

Debido a la necesidad de medir la cantidad de ruido en la imagen de salida, se utiliza como segunda métrica la Proporción Máxima de Señal a Ruido Hore and Ziou (2010), esta define la relación entre la máxima intensidad posible de una imagen y el ruido que afecta a su representación fidedigna. Se requiere del MSE y la máxima intensidad de color en cada canal. Los valores que adopta están entre 30 y 50 dB, siendo mayor cuanto mejor es la codificación.

$$PSNR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\max(x)}{MSE} \right) \quad (13)$$

Otra métrica que se frecuente en las publicaciones de los métodos de limpieza de ruido es el Índice de Similitud Estructural Wang et al. (2004), esta es una métrica de calidad conocida que se utiliza para medir la similitud entre dos imágenes, tendiendo a 1 cuando sea mayor la similitud.

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C1)(2\sigma_{xy} + C2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C2)} \quad (14)$$

donde μ_x y μ_y son medias de x y y , σ_x^2 y σ_y^2 las varianzas, σ_{xy} la covarianza entre x y y , y $C1 = (k_1, L)^2$, $C2 = (k_2, L)^2$ estabilizan la división, L es el rango de intensidad de píxeles y las constantes $k_1 = 0.01$ y $k_2 = 0.03$.

5. RESULTADOS

Para contrastar los resultados se probó con 4 métodos: el Método 1 pertenece al de filtros guiados en serie propuesto por Zheng et al. (2013), el Método 2 es la descomposición por capas basado en modelos de mezcla gaussiana de Li et al. (2016), el Método 3 basado en un canal de oscuridad acelerado de Tan et al. (2014) y el Método 4 combinando Filtro Guiado y canal de oscuridad de He et al. (2010). Los métodos 1 y 2 fueron implementados en el entorno de desarrollo Matlab 2018b, los métodos 3, 4 y la red neuronal en el lenguaje Python 3.5 y el framework Tensorflow 1.1.0 (GPU), apoyado por las librerías CUDA 8.0 y CuDNN 5.6. Esta implementación fue probada en un equipo con un procesador Intel Core i7-7700 @ 3.60 GHz quad-core, 16 GB de memoria RAM y un GPU Titan X con 3072 CUDA-cores y 12 GB RAM dedicada. El 85% de los datos fueron utilizados para entrenar, el 15% equivalente a 4,125 imágenes fueron utilizadas para evaluar los métodos. De manera resumida se muestra la media de los 4,125 resultados obtenidos en esta experimentación en la Tabla 1, donde se agrega una columna de tiempo de respuesta por imagen.

Tabla 1. Resultados cuantitativos.

Método	MSE	PSNR	SSIM	Tiempo (seg)
Método 1	0.0260	19.0834	0.7520	0.4936
Método 2	0.0254	18.7149	0.6795	34.0661
Método 3	0.0299	28.0692	0.4109	0.5009
Método 4	0.0281	16.9980	0.5392	0.1525
Propuesta	0.0030	30.5017	0.8776	0.4572

Acorde a los resultados mostrados en la Tabla 1, se demostró que el modelo neuronal adaptado presenta los mejores resultados en todas las métricas de calidad. En resumen, el modelo presenta una mejoría en MSE en un 11.01%, una disminución de ruido del 52.73% con base en la métrica PSNR y una mejoría de calidad según el valor de SSIM del 28.2%. Lo ideal es que el modelo presentará el menor tiempo de respuesta para poder operar en tiempo real junto a un sistema de control del vehículo, sin embargo el Método 4 que presenta menor tiempo de respuesta sacrifica la calidad mostrando las peores métricas. Los resultados son respaldados por la evaluación cualitativa de estos métodos mostrada en la Figura 3, donde se comparan muestras obtenidas en los métodos para cada tipo de obstrucción. En la comparación de las imágenes se observa como la imagen obtenida del modelo neuronal presenta menor difuminación y la condición climática es retirada con éxito, sin afectar la calidad de la imagen.

De igual manera los resultados son respaldados al aplicar la significancia estadística a los resultados de los experimentos Kline (2013), bajo el nivel de $\alpha = 0.05$ sobre las métricas de error, se obtuvo un contraste de hipótesis $p = 0.0224$, concluyendo que $p > \alpha \implies H_a$, los resultados son estadísticamente significativos.

6. CONCLUSIONES

En este documento se mostró un modelo de red neuronal convolucional adaptado con capas de filtro guiado para la supresión de lluvia y niebla presente en imágenes de un simulador de vehículo autoconducido. La experimentación demostró que este modelo realizó la supresión y mejorando en promedio 30.64% más que los métodos de comparación. Como trabajo futuro se pretende que este modelo sea utilizado como capas de limpieza y extracción de características en un modelo que realice la autoconducción, de esta forma el modelo final realice limpieza y control como un solo proceso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a CONACYT, así como al Tecnológico Nacional de México / CENIDET por el apoyo económico otorgado para la realización del proyecto 5628.19-P "Sistema embebido para asistencia de conducción basado en Lógica Difusa Tipo-2".

REFERENCIAS

- Berman, D., Avidan, S., et al. (2016). Non-local image dehazing. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 1674–1682.
- Bojarski, M., Yeres, P., Choromanska, A., Choromanski, K., Firner, B., Jackel, L., and Muller, U. (2017). Explaining how a deep neural network trained with end-to-end learning steers a car. *arXiv preprint arXiv:1704.07911*.
- Bui, T.M. and Kim, W. (2017). Single image dehazing using color ellipsoid prior. *IEEE Transactions on Image Processing*, 27(2), 999–1009.
- Chen, X., Kundu, K., Zhang, Z., Ma, H., Fidler, S., and Urtasun, R. (2016). Monocular 3d object detection for autonomous driving. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2147–2156.
- Du, S., Liu, Y., Ye, M., Xu, Z., Li, J., and Liu, J. (2018). Single image deraining via decorrelating the rain streaks and background scene in gradient domain. *Pattern Recognition*, 79, 303–317.
- He, K. and Sun, J. (2015). Fast guided filter. *arXiv preprint arXiv:1505.00996*.
- He, K., Sun, J., and Tang, X. (2010). Single image haze removal using dark channel prior. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 33(12), 2341–2353.
- He, K., Sun, J., and Tang, X. (2012). Guided image filtering. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 35(6), 1397–1409.
- Hore, A. and Ziou, D. (2010). Image quality metrics: Psnr vs. ssim. In *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*, 2366–2369. IEEE.
- Jin, X., Chen, Z., Lin, J., Chen, Z., and Zhou, W. (2018). Unsupervised single image deraining with self-supervised constraints. *arXiv preprint arXiv:1811.08575*.
- Kim, J.H., Lee, C., Sim, J.Y., and Kim, C.S. (2013). Single-image deraining using an adaptive nonlocal means filter. In *2013 IEEE International Conference on Image Processing*, 914–917. IEEE.
- Kingma, D.P. and Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.
- Kline, R.B. (2013). *Beyond significance testing: Statistics reform in the behavioral sciences*. American Psychological Association.
- Li, Y., Tan, R.T., Guo, X., Lu, J., and Brown, M.S. (2016). Rain streak removal using layer priors. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2736–2744.
- Lin, Z. and Wang, X. (2012). Dehazing for image and video using guided filter. *Appl. Sci*, 2, 123–127.
- Luo, Y., Xu, Y., and Ji, H. (2015). Removing rain from a single image via discriminative sparse coding. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 3397–3405.

- Patil, V.S. and Havaladar, R. (2016). Haze removal and fuzzy based enhancement of image. In *2016 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC)*, 1–3. IEEE.
- Sivak, M. and Schoettle, B. (2015). Road safety with self-driving vehicles: General limitations and road sharing with conventional vehicles.
- Tan, Z., Bai, X., Wang, B., and Higashi, A. (2014). Fast single-image defogging. *Fujitsu Sci. Tech. J.*, 50(1), 60–65.
- Tian, Y., Pei, K., Jana, S., and Ray, B. (2018). Deeptest: Automated testing of deep-neural-network-driven autonomous cars. In *Proceedings of the 40th international conference on software engineering*, 303–314. ACM.
- Tomasi, C. and Manduchi, R. (1998). Bilateral filtering for gray and color images. In *Iccv*, volume 98, 2.
- Wang, Z., Bovik, A.C., Sheikh, H.R., Simoncelli, E.P., et al. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*, 13(4), 600–612.
- Wu, H., Zheng, S., Zhang, J., and Huang, K. (2018). Fast end-to-end trainable guided filter. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1838–1847.
- Yu, J., Xiao, C., and Li, D. (2010). Physics-based fast single image fog removal. In *IEEE 10th International Conference on Signal Processing Proceedings*, 1048–1052. IEEE.
- Zheng, X., Liao, Y., Guo, W., Fu, X., and Ding, X. (2013). Single-image-based rain and snow removal using multi-guided filter. In *International Conference on Neural Information Processing*, 258–265. Springer.

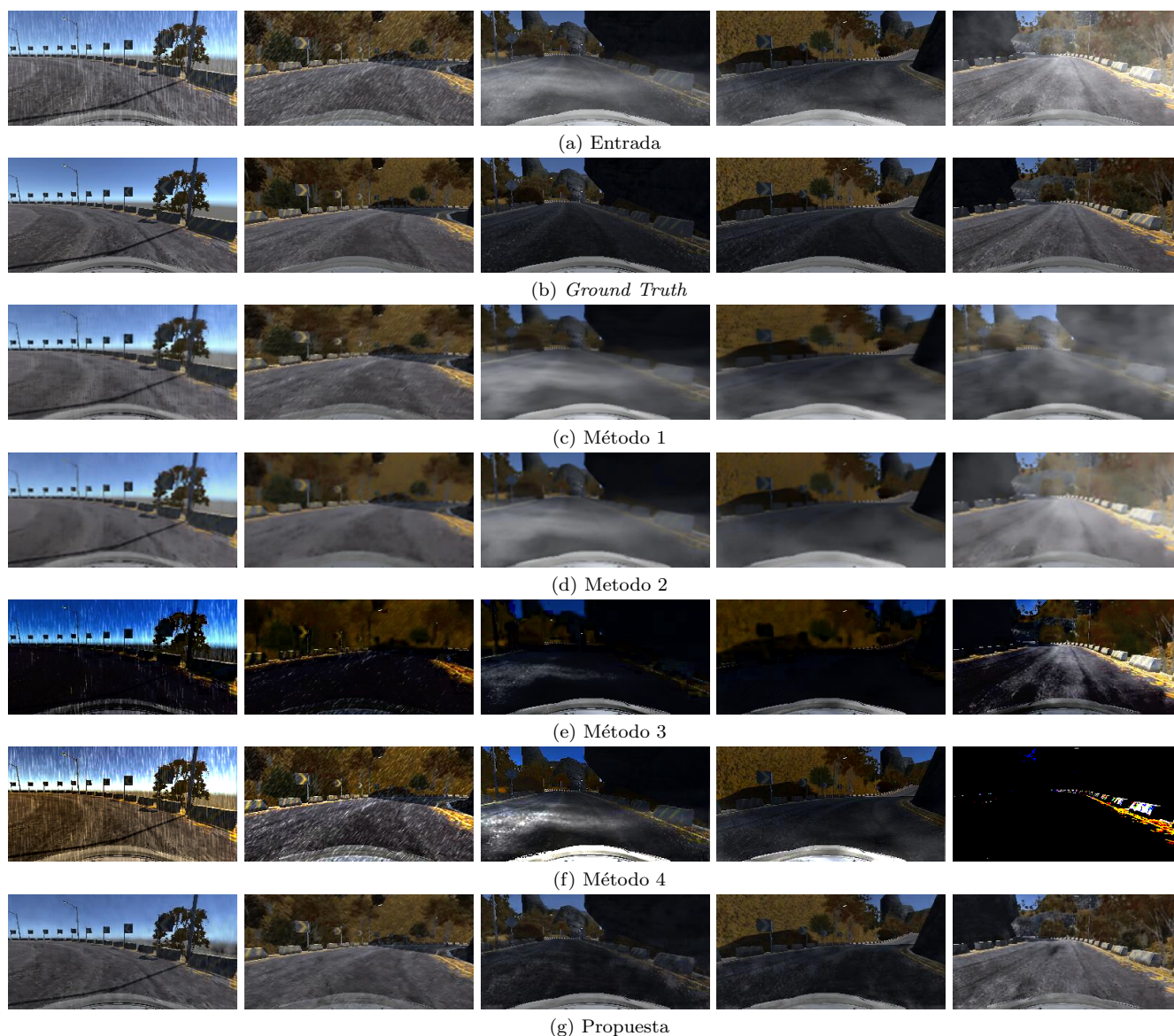


Figura 3. Comparación cualitativa.

Métricas UX mediante análisis de seguimiento ocular

**Derick A. Lagunes-Ramírez *, Gabriel González-Serna*, Máximo López-Sánchez*, Dante Mujica-Vargas*,
Noe Castro-Sánchez***

** Departamento de Ciencias Computacionales, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos
México (Tel: +52 777 3637770;
{derick.lagunez18ca, gabriel, maximo, dantemv, ncastro}@cenidet.edu.mx)*

Resumen: Al día de hoy los costos de realizar estudios del comportamiento con seguimiento ocular (SO) se han reducido y la tecnología es cada vez más adoptada en diferentes campos, entre ellos la evaluación de la experiencia de usuario (UX) que se centra en identificar los aspectos de usabilidad negativos durante las pruebas realizadas a un producto digital. Las métricas generadas a partir del análisis del SO de un usuario que evalúa un producto digital aportan información objetiva para las evaluaciones de la UX. En este trabajo se describen las métricas UX generadas a partir del análisis de SO: Mapas de calor, mapas de rutas sacádicas, áreas de interés y análisis del parpadeo, cada una de estas métricas permiten identificar aspectos positivos y/o negativos de usabilidad relacionados con el producto digital que se está evaluando.

Palabras clave: Seguimiento ocular, interacción humano-computadora, evaluación de la experiencia de usuario, UX, mapa calor, rutas sacádicas.

1. INTRODUCCIÓN

En el pasado era complicado realizar estudios que analizaran el movimiento ocular de las personas, los dispositivos que se utilizaban eran primitivos, con grandes cámaras de video que necesitan apuntar a los ojos del usuario que debía mantener la cabeza inmóvil con la ayuda de un reposacabezas. El reciente avance digital ha mejorado la precisión y la usabilidad de los sensores de seguimiento ocular (Ho, 2014) y al día de hoy la tecnología se ha simplificado considerablemente para estar al alcance de todos, lo cual ha permitido que las investigaciones con esta tecnología aumenten de manera significativa.

El seguimiento ocular (eye-tracking) analiza el movimiento de los globos oculares de un usuario mientras se encuentra observado un estímulo visual (una imagen, un video, una aplicación móvil, una página web o un objeto convencional). Observar estos movimientos, puntos de visión, fijaciones, sácadas (desplazamientos rápidos de entre 30 a 120 milisegundos de los ojos entre dos puntos de fijación) y parpadeos, proporciona información sobre el comportamiento, la atención y el estado cognitivo de usuarios. Los estudios del seguimiento ocular se realizan en varios campos científicos, como la medicina, la evaluación de la experiencia de usuario, entre otros. Las señales de movimiento ocular se han utilizado ampliamente en la investigación de la Interacción Humano Computadora (HCI por sus siglas en inglés) para el análisis y la evaluación de la usabilidad, ya que pueden proporcionar una forma natural y eficiente de observar el comportamiento de los usuarios (Lu, et al., 2015).

La experiencia de usuario (UX por sus siglas en inglés) es el proceso que permite identificar el conjunto de emociones y percepciones que tiene el usuario final al utilizar un producto digital, normalmente los diseñadores y expertos de UX tratan de que los usuarios finales tengan una percepción positiva de los productos que utilizan, una mala experiencia con un producto digital puede provocar perder usuarios finales. Por otro lado, los datos que se obtiene de métodos tradicionales para evaluar la UX se ven fácilmente afectados por el entorno, la dificultad de las comparaciones entre productos, emociones falsas y opiniones subjetivas. Por lo tanto, los resultados de una encuesta de este tipo no proporcionarían datos objetivos (Guo, et al., 2016).

En este artículo se describen las métricas UX obtenidas a partir de los datos de seguimiento ocular del usuario que utiliza un producto digital (software standalone, páginas web, entre otros), estas métricas se pueden utilizar para enriquecer el proceso de UX en conjunto con datos fisiológicos multimodales que permiten identificar con mayor precisión estados emocionales del usuario durante el proceso de evaluación.

2. OBTENCIÓN DE DATOS DEL SEGUIMIENTO OCULAR

Existen dos tipos de sensores que pueden extraer la información del movimiento ocular de un usuario, 1) el primero utiliza cámaras de video y analizar el movimiento de los ojos. 2) el segundo utiliza tecnología infrarroja para procesar la reflexión de la luz en la pupila del usuario (ver Figura 1)

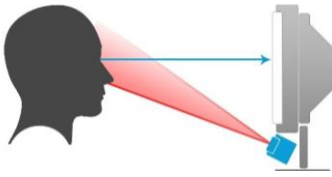


Figura. 1. Esquema de funcionamiento del seguimiento ocular con un sensor infrarrojo.

La reflexión de la luz sobre la pupila es registrada por un sensor que calcula la posición en coordenadas (x,y) del punto que representan la mirada del usuario en el plano espacial de la pantalla. Los datos en este trabajo fueron obtenidos con un sensor de seguimiento ocular infrarrojo.

3. MÉTRICAS DEL SEGUIMIENTO OCULAR

Las métricas del seguimiento ocular se basan en puntos de visión, son datos básicos obtenidos de los sensores del movimiento ocular. Un punto de visión (1) es un conjunto que contiene tres elementos: una coordenada x , una coordenada y y una estampa de tiempo t .

$$\text{punto de visión} = \{x, y, t\} \quad (1)$$

Las coordenadas en el punto de visión representan un punto en el plano de visión del usuario, comúnmente este plano es la pantalla o monitor donde está colocado un sensor de seguimiento ocular, pero también puede representar el plano de visión en lentes con tecnología de seguimiento ocular. La variable t registra la etiqueta de tiempo en la que el usuario miraba el punto (x,y) .

Con el punto de enfoque del usuario se obtienen las coordenadas de fijación visual, Las fijaciones se representan como muestras discretas de puntos estables donde mira el ojo (Borys & Plechawska Wójcik, 2017). Los puntos de observación se agregan según un área y un intervalo de tiempo específicos. El área de agregación suele ser de unos 20 a 50 píxeles, en un intervalo de tiempo entre 200 y 300 ms (Holmqvist, et al., 2010). Los puntos de fijación son la base para obtener mapas de calor, mapas de rutas sacádicas y áreas de interés.

Un punto de fijación se obtiene calculando la diferencia entre la velocidad de un primer punto de visión al siguiente o como grupos de puntos consecutivos dentro de una dispersión específica, o separación máxima (Salvucci & Goldberg, 2000). Y se representan como un conjunto de cinco elementos (2): coordenada x , coordenada y , tiempo de inicio t_i , tiempo de fin t_f y duración de la fijación d .

$$\text{punto de fijación} = \{x, y, t_i, t_f, d\} \quad (2)$$

A continuación, se definen diferentes métricas del seguimiento ocular:

3.1 Mapas de atención

Los mapas de atención son formas de representar la atención visual de un usuario, dos de los mapas de atención más utilizados, ya que son fáciles de interpretar, son los mapas de calor y los mapas de rutas sacádicas.

3.1.1 Mapas de calor

Los mapas de calor son una representación de la atención visual de un usuario o de un conjunto de usuarios, se utilizan gamas de colores para representar temperatura, temperaturas altas (rojo) indican mayor tiempo de atención en esa área (azul = frío, verde = tibio y rojo = caliente) la concentración de fijaciones de los usuarios sobre la imagen capturada de la interfaz del producto digital (ver Figura 2).



Figura. 2. Mapa de calor: Realizado con los datos de seguimiento ocular de una prueba de evaluación UX.

Para realizar un mapa de calor se debe tratar cada pixel disponible en la imagen de la captura como un espacio en un arreglo de dos dimensiones, utilizando el conjunto de puntos de fijaciones se aumentará la intensidad de un pixel (i, j) relacionado con la coordenada (x, y) de cada uno de los puntos de fijación (en varias iteraciones) y además, se aumenta el valor de los pixeles alrededor de éste en una menor medida utilizando α (3), normalmente, utilizando un kernel gaussiano (Duchowski, et al., 2012), mientras más alto sea el valor del pixel se le asignará un color más caliente.

$$\text{intensidad pixel}(i, j) = \exp - \frac{(x-i)^2 + (y-j)^2}{2\alpha^2} \quad (3)$$

Al final se procesa el arreglo como una imagen con los colores de temperatura y se coloca sobre la imagen capturada durante la prueba.

3.1.2 Mapas de rutas

Los mapas de rutas (ver Figura 3), al igual que los de calor, sirven para representar la atención visual de un usuario o de un conjunto de ellos, se definen como una secuencia de fijaciones alternas y sácadas (Holmqvist, et al., 2010). Los elementos visuales de los mapas de rutas son tres: círculos para representar una fijación y el diámetro del círculo que representa la duración de la fijación. Cada círculo está numerado, para representar la secuencia en el que ocurrieron las fijaciones. Finalmente, el último elemento es un conjunto de vectores que unen los círculos, esto representa la ruta que siguieron los ojos para llegar a cada una de las fijaciones.



Figura.3. Mapa de rutas: Realizado con los datos de seguimiento ocular de una prueba de evaluación UX

Para generar el mapa de rutas se debe utilizar el conjunto de puntos de fijación para obtener el conjunto de sácadas. Las sácadas describen un movimiento ocular rápido de una fijación a otra. Suelen durar entre 30 y 80 ms y son el movimiento más rápido que puede realizar el cuerpo humano (Holmqvist, et al., 2010). Representan el movimiento de transición entre dos fijaciones y se describen con cinco elementos (4): el punto x de la primera y segunda fijación, el punto y de la primera y segunda fijación y la duración de la sácada d (que es calculada restando el tiempo de fin de la primera fijación con el tiempo de inicio de la segunda fijación).

$$sacada = \{x_1, y_1, x_2, y_2, d\} \quad (4)$$

Una vez obtenido el conjunto de sácadas se procesa la imagen de la prueba para sobreponer los puntos de fijación en orden con las sácadas que los unen de forma que el par de coordenadas de la primera fijación forma el origen de la flecha y el par de coordenadas de la segunda fijación forma el final del trazo de la flecha.

3.2 Áreas de interés

Otra de las métricas del seguimiento ocular son las áreas de interés también conocidas como AOI's o ROI's (Areas Of Interest, y Regions Of Interest, por sus siglas en inglés). Esta métrica es obtenida mediante algoritmos de agrupamiento, el principio es obtener n número de clústeres de forma automática utilizando todo el conjunto de puntos de visión que fueron capturados durante una prueba de seguimiento ocular. Al agrupar los puntos se obtiene de forma dinámica un conjunto de clústeres a los cuales pertenecen n puntos de visión, el centro de cada clúster representa también el centro del área de interés mientras que los demás puntos se utilizan para determinar el área que abarca la región de interés (ver Figura 4).



Figura. 4. Áreas de interés: Realizado con los datos de seguimiento ocular de una prueba de evaluación UX.

Uno de los algoritmos de agrupamiento que obtiene un número dinámico de clústeres de manera automática y que ha sido utilizado para obtener las áreas de interés con datos de seguimiento ocular es el algoritmo Meanshift (Fuhl, et al., 2018; Santella & DeCarlo, 2004).

3.3 Frecuencia del parpadeo

Una métrica interesante del seguimiento ocular es el cálculo de la frecuencia del parpadeo del usuario durante la evaluación UX,

en diversos estudios del estado del arte (Zagermann, et al., 2018; Sakai, et al., 2017; Zagermann, et al., 2016; Mallick, et al., 2016; McIntire, et al., 2014; Chen, et al., 2011; Smilek, et al., 2010) el número de parpadeos se correlaciona con la carga cognitiva del usuario que realiza una tarea visual. Esto demuestra que la frecuencia de los parpadeos se puede utilizar para obtener información acerca de la carga cognitiva que le genera un estímulo y para obtener una idea general de su nivel de atención.

Los estudios demuestran que, si la frecuencia de parpadeos es baja, el usuario se enfrenta a una carga cognitiva alta y prestan más atención a las tareas, por ejemplo, al ver una película o jugar un videojuego. Por otro lado, una frecuencia de parpadeo alta denota lo contrario, una carga cognitiva baja y falta de atención o aburrimiento.

Para capturar los parpadeos del usuario con el sensor de seguimiento ocular de tipo infrarrojo, se utilizan los tiempos entre las capturas del sensor para determinar si ocurrió o no un parpadeo. Los parpadeos se consideran como el cierre total de los párpados en los dos ojos y duran aproximadamente de 100 a 150 ms bajo condiciones normales (Chen, et al., 2011), cualquier tiempo mayor significa que el usuario apartó la mirada del área del sensor o realizó lo que se conoce como un microsueño. Este método de captura fue probado en laboratorio, donde se tomó un video y la captura de los datos oculares de seis personas mientras miraban un video, al comparar el conteo de parpadeos utilizando los datos del sensor y el conteo manual de los parpadeos en el video, se obtuvo una eficiencia de 93.29% de capturas efectivas de parpadeos (ver Tabla 1).

Tabla 1. Resultados de la prueba de captura de parpadeos con sensor infrarrojo.

#	Conteo manual	Conteo con los datos del sensor	Porcentaje de parpadeos detectados correctamente
1	18	18	100.00 %
2	5	5	100.00 %
3	27	24	88.88 %
4	11	10	90.90 %
5	15	15	100.00 %
6	10	8	80.00 %
		Promedio:	93.29 %

Para obtener la frecuencia de parpadeo de una persona basta con realizar la sumatoria de los parpadeos cada minuto y dividir entre el número de minutos que duró la prueba.

4. APORTES A LAS EVALUACIONES DE UX

Las técnicas de visualización permiten a los investigadores analizar diferentes niveles y aspectos de los datos de seguimiento ocular registrados de forma exploratoria y cualitativa. Ayudan a

analizar el aspecto espacio-temporal de los datos de seguimiento ocular y sus relaciones con los datos (Blascheck, et al., 2014).

Los mapas de atención revelan las secciones del producto digital que más observaron los usuarios, los elementos más observados pueden ser interpretados como más llamativos para los usuarios o como elementos difíciles de comprender. Un sitio web complejo distraerá la atención de los usuarios y activará más fijaciones en consecuencia. Pero los efectos de la complejidad del sitio web pueden ser sensibles a la existencia de otros factores, como la complejidad de la tarea (Wang, et al., 2014). Observar más tiempo un elemento representa más atención, pero no representa una percepción positiva o negativa del elemento del sitio web, el mapa de atención puede ser apoyado por cuestionarios de percepción para cada usuario y/o de sensores fisiológicos como de electroencefalografía, que puedan detectar estados mentales positivos o negativos.

Otro de los usos de los mapas de atención es observar si algunos de los elementos del sitio web, como menús, imágenes, publicidad o información importante, están siendo observados por el usuario final. Los mapas de calor pueden mostrar si una página web es exitosa para ayudar a los usuarios a encontrar puntos de entrada importantes de manera efectiva y si anima a los usuarios a inspeccionar la página a fondo (Djamasbi, 2014). Los diseñadores del software pueden utilizar esta información para cambiar el diseño del producto en función de la atención que se desee para cada elemento del sitio web.

En el caso específico de los mapas de rutas se puede observar el camino que sigue la mirada del usuario, esto permite identificar desde dónde comienza a navegar el usuario en el sitio web (elemento de entrada), el tiempo que permanece la mirada en la sección y el orden de los cambios entre cada sección después de la primera, de modo que se puede observar qué secciones se visualizan en función de haber visto otra anteriormente.

Algunos de los datos que pueden ser analizados para los mapas de atención son el número de fijaciones y su duración, estos datos representan la carga cognitiva sobre un elemento o en toda la prueba. Y el tiempo a la primera fijación, que representa el tiempo que le toma al usuario realizar su primera fijación cuando es expuesto a un nuevo estímulo, determina qué tan rápido encuentra algo que le llama la atención.

Los mapas de atención deben ser interpretados por un experto evaluador de la UX, quien decidirá, en conjunto con respuestas de cuestionarios de evaluación y datos de sensores fisiológicos, si los elementos observados generan una percepción positiva o no en el usuario.

Las áreas de interés proporcionan información acerca de las secciones específicas de la interfaz de la página web que están recibiendo más atención visual de parte del usuario y en consecuencia realizar los análisis similares a aquellos que se hacen en los mapas de atención (tiempo de permanencia, número de fijaciones entre otras). Además, estas secciones pueden ser aisladas del resto para generar nuevas áreas de interés y mapas

de atención para estudiar el comportamiento centrado en el límite de estas regiones.

En este trabajo se describe cómo crear áreas de interés dinámicas utilizando algoritmos de agrupamiento, sin embargo, también se pueden definir áreas de interés manualmente seleccionando áreas específicas de la interfaz para obtener datos de comportamiento por cada una, por ejemplo, un diseñador quiere observar el comportamiento visual de sus usuarios solo en la sección de publicidad de su página web.

Finalmente, el análisis de los parpadeos también puede aportar a la evaluación de la UX, un histograma de parpadeos por minuto que muestra si la frecuencia de parpadeo aumenta o se reduce. Un aumento en la frecuencia de los parpadeos puede indicar falta de interés en el contenido del producto digital mientras que una reducción de la frecuencia del parpadeo puede significar que el usuario está interesado, concentrado y/o prestando atención a los contenidos del producto.

5. CONCLUSIONES

Las métricas obtenidas a partir de los datos del seguimiento ocular son una forma de observar el comportamiento de la atención visual del usuario y este comportamiento puede aportar ciertos datos útiles para evaluar la experiencia de los usuarios cuando utilizan productos digitales. En especial con uso de métricas como los mapas de atención, áreas de interés y el análisis del parpadeo proporcionan información sobre la percepción que genera en el usuario a un nivel cognitivo todo el contenido o partes aisladas del producto digital.

Al considerar estas métricas y el estado cognitivo se puede realizar una evaluación de la UX más objetiva que ayudará a mejorar los niveles de satisfacción y aceptación de los productos digitales ya desarrollados o en desarrollo.

REFERENCIAS

- Blascheck, T., Kurzhals, K., Raschke, M., Burch, M., Weiskopf, D. & Ertl, T. (2014). State-of-the-art of visualization for eye tracking data. *Eurographics Conference on Visualization (EuroVis)*. pp. 1-20
- Borys, M. & Plechawska Wójcik, M. (2017). Eye-tracking metrics in perception and visual attention research. *European journal of medical technologies*, pp. 11-23.
- Chen, S., Epps, J., Ruiz, N. & Chen, F. (2011). Eye activity as a measure of human mental effort in HCI. *IUI 2011: 15th International Conference on Intelligent User*. pp. 315-318.
- Djamasbi, S. (2014). Eye tracking and web experience. *AIS transactions on human-computer interaction*. pp. 37-54.
- Duchowski, A., Price, M., Meyer, M. & Orero, P. (2012). Aggregate gaze visualization with real-time heatmaps. *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications*. pp. 13-20.
- Fuhl, W., Kuebler, T., Brinkmann, H., Rosenberg, R., Rosentiel, W. & Kasneci, E. (2018). Region of interest generation algorithms for eye tracking data. *Proceedings of the 3rd workshop on eye tracking and visualization*. pp. 1-9.
- Guo, F., Liu, W., Liu, C. & Zhang, X. (2016). Can eye-tracking data be measured to assess product design?: visual attention mechanism should be considered. *International journal of industrial ergonomics*. pp. 229-235.
- Ho, h. (2014). The effects of controlling visual attention to handbags for women in online shops: evidence from eye movements. *Computers in human behavior*, pp. 146-152.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H. & van de Weijer, J. (2010). Eye tracking: a comprehensive guide to methods and measures. UK: Oxford University Press.
- Lu, Y., Zheng, W., Li, B. & Lu, b. (2015). Combining eye movements and EEG to enhance emotion recognition. *Proceedings of the Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2015)*. pp. 1170-1176.
- Mallick, R., Slayback, D., Touryan, J., Ries, A. & Lance, B. (2016). The use of eye metrics to index cognitive workload in video games. *2016 IEEE Second Workshop on Eye Tracking and Visualization (ETVIS)*, pp. 60-64.
- Mcintire, L., McKinley, R. A., Goodyear, C. & McIntire, J. P. (2014). Detection of vigilance performance using eye blinks. *Applied ergonomics*. pp. 354-362.
- Sakai, T., Tamaki, H., Ota, Y., Egusa, R., Inagaki, S., Kusunoki, F., Sugimoto, M. & Mizoguchi, H. (2017). Eda-based estimation of visual attention by observation of eye blink frequency. *International Journal on Smart and Intelligent Systems*. pp. 296-307.
- Salvucci, D. D. & Goldberg, J. H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. *Proceedings of the 2000 symposium on eye tracking research & applications*. pp. 71-78
- Santella, A. & DeCarlo, D. (2004) Robust clustering of eye movement recordings for quantification of visual interest. *Proceedings of the eye tracking research & applications symposium on eye tracking research & applications*. pp. 27-34
- Smilek, D., Carriere, J. & Cheyne, A. (2010). Out of mind, out of sight: eye blinking as indicator and embodiment of mind wandering. *Psychological science*. pp. 1-4.
- Wang, Q., Yang, S., Liu, M., Cao, Z. & Ma, Q. (2014). An eye-tracking study of website complexity from cognitive load perspective. *Decision support systems*. pp. 1-10.
- Zagermann, J., Pfeil, U. & Reiterer, H. (2016). Measuring cognitive load using eye tracking technology in visual computing. *Proceedings of the sixth workshop on beyond time and errors on novel evaluation methods for visualization, BELIV '16*, pp. 78-85.
- Zagermann, J., Pfeil, U. & Reiterer, H. (2018). Studying eye movements as a basis for measuring cognitive load. *Extended abstracts of the 2018 CHI conference*. Montréal, pp. 1-6.

Mapeo Sistemático de herramientas web para la creación de un chatbot

Millán-Olivares Laura*, González-García Moisés **,
Nimrod González-Franco ***, Noé Alejandro Castro-Sánchez****

CENIDET, Cuernavaca, Morelos;

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490

*email: {*ana.millan18ca, **moises, ***nimrod, ****ncastro} @cenidet.edu.mx*

Resumen: En el mundo, las empresas invierten en mecanismos que les ayuden a mejorar servicios basados en TICs para incrementar su productividad. Uno de estos mecanismos son los chatbots, que son agentes conversacionales con el objetivo de mantener una conversación de manera natural. En este artículo se reporta la búsqueda y hallazgos acerca de herramientas que faciliten la creación de estos agentes conversacionales con reconocimiento de voz, la revisión de la literatura estuvo centrada en artículos del 2013 al 2018, escritos en el idioma inglés y produjo la identificación de nueve herramientas más populares dentro de la literatura, pero solo tres de ellas son las más utilizadas por la facilidad, tecnología y documentación disponible dentro de la red.

Palabras Claves: Chatbot, Mapeo sistemático, Reconocimiento de Voz, Elicitación de Requerimientos, modelo de dominio

1. INTRODUCCIÓN

El avance de Internet y de las nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicación, ha sido el origen de importantes cambios que impactaron no sólo en la vida cotidiana de los individuos, sino también en organizaciones e instituciones sociales (Litwin, 2005). En consecuencia, estos cambios desembocaron en un paradigma que produjo modificaciones significativas en la forma de relacionarnos, de trabajar e incluso de enseñar y aprender.

En el mundo, el sector salud y computacional ofrecen sus servicios a una gran cantidad de clientes diariamente y a medida que un servicio es requerido por más clientes, las empresas invierten en mecanismos de inteligencia artificial (IA) que les ayuden a mejorar estos servicios. El potencial que tiene la IA, para mejorar la productividad en las empresas es evidente, debido a su exactitud y rapidez al realizar una tarea. Por esta razón, los robots que llevan conversaciones (chatbots), soportados por técnicas de IA, pueden facilitar que las empresas mejoren la eficiencia (dado que realizan su tarea con la menor cantidad de recursos) y eficacia (logran el objetivo esperado) de su proceso de atención al cliente (Quintana, 2018).

Debido al incremento de las necesidades de los clientes, la industria de la computación ha incentivado la creación y exploración de diferentes entornos y plataformas web que pueden involucrar la IA, en particular a los chatbots.

Por ello, se requiere la investigación de plataformas web que ayuden a la creación de chatbots. Según (Sameera, 2015), un chatbot es un programa informático que tiene la capacidad de mantener una conversación con humanos usando el lenguaje natural.

En este reporte se exponen los resultados obtenidos de la elaboración de un estudio de mapeo sistemático sobre las plataformas web más populares para la creación de un chatbot. Con el fin de conocer qué herramientas se utilizan más y clasificar la información más importante de cada una de ellas. Y de esta manera, seleccionar la herramienta que posibilite su aplicación en investigaciones de la ingeniería de software, específicamente en la etapa de análisis dentro del ciclo de desarrollo de software.

El artículo se divide en las siguientes secciones: Metodología de Investigación (sección 2), donde se describe los pasos que se llevaron a cabo durante el estudio; Resultados (sección 3), se presentan los resultados obtenidos en la aplicación del estudio, representados en una tabla; a continuación, se presentan las Conclusiones (sección 3), y finalmente la Bibliografía (sección 4).

2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con (Petersen, 2008) un Estudio de Mapeo Sistemático (EMS), es un estudio secundario que tiene como objetivo construir un esquema de clasificación y estructurar un campo de interés de la ingeniería de software. La metodología para realizar un EMS, es la más adecuada para llevar a cabo el estudio requerido ya que se cuenta con tópicos de ingeniería de software con un espectro bastante amplio. Estos tópicos requieren estudiarse de forma combinada con el fin de evidenciar, su uso y los posibles trabajos futuros que puedan identificarse a partir de la información resultante.

Para llevar a cabo el estudio de mapeo sistemático, es necesario definir un objetivo, que se convertirá en las preguntas de investigación, las cuales guiarán la siguiente parte del estudio. Se tomó en cuenta la metodología descrita en (Petersen, 2008), la cual consiste en las actividades siguientes: (1) Definir preguntas de investigación, (2) Selección de fuentes, (3) Selección de artículos, (4) Inclusión y Exclusión de los artículos.

Es importante mencionar que se tiene que seguir el protocolo para evitar cualquier atraso que pueda presentarse durante la aplicación del estudio. En este caso, se fijaron objetivos en términos de alcance y tiempo. Donde el alcance se establece mediante las preguntas de investigación. A continuación, se describe cada proceso del mapeo sistemático.

A) Definir Preguntas de Investigación

En la ingeniería de software la etapa de Análisis es una de las más importantes dentro de un proyecto para obtener un resultado exitoso, puesto que en ella se elabora el modelo del problema (negocio) y a partir de este se especifican los requerimientos del software (solución).

De este modo, el modelo se obtiene mediante entrevistas entre los profesionales de la computación y los clientes (expertos en su área). De acuerdo a lo mencionado, se pretende automatizar la parte de la entrevista entre el experto en computación y el cliente mediante un chatbot con reconocimiento de voz, para mantener la comunicación en un lenguaje natural entre ambas personas, sin importar los tecnicismos de cada individuo.

Según lo anterior, la pregunta principal que se plantea es:

¿Existe alguna plataforma o marco (Framework) que ayude a automatizar el dominio de “creación de agentes inteligentes conversacionales mediante el habla” a través de alguna plataforma que integre el reconocimiento de voz?

Esta pregunta busca obtener la mayor evidencia posible sobre la implementación o aplicación de cualquier plataforma o Framework relacionada con la creación de un chatbot para conocer sus características y así elegir el que mejor se adapte a nuestras necesidades. La idea principal es encontrar todas las plataformas posibles, conocer sus tendencias, ventajas y

desventajas, compararlas entre ellas, en el contexto del dominio del problema y en el dominio de requerimientos.

A su vez, esta pregunta principal, para realizar la búsqueda, se dividió en tres preguntas secundarias. Estas preguntas se representan en la Tabla 1.

Tabla 1. Preguntas de Investigación

ID	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	EXPLICACIÓN
RQ1	¿Qué herramientas se utilizan para el reconocimiento de voz?	Se requiere adquirir las principales herramientas que integren el reconocimiento de voz.
RQ2	¿Qué metodología se utiliza para la creación de chatbots?	Se requiere evidenciar las metodologías a seguir para generar un chatbot
RQ3	¿Qué metodología se utiliza para realizar la Elicitación de requerimientos?	Se requiere conocer las metodologías que ayuden a empezar la etapa de análisis, para crear las preguntas adecuadas para el chatbot

B) Selección de Fuentes

Las fuentes utilizadas en el estudio fueron las siguientes bibliotecas digitales: *IEEE*, *ACM Digital Library*, *Science Direct* y *JSTOR*. El criterio de selección de estas bases de datos, fue básicamente la disponibilidad para el acceso, ya que son de acceso libre, para la búsqueda y revisión del resumen.

C) Selección de Artículos

En este apartado se muestra la estrategia de búsqueda que se utilizó para llevar a cabo este EMS.

1. Palabras claves

A partir de las preguntas de investigación se obtuvieron las siguientes palabras claves: Reconocimiento de voz, Elicitación de requerimientos, Chatbot, Framework, Herramienta y Metodología.

2. Sinónimos

Se buscaron y generaron sinónimos a las palabras claves, en idioma inglés, pues la mayoría de la bibliografía se redacta en dicho idioma. Los sinónimos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.- Palabras claves y sus sinónimos

PALABRAS CLAVES	SINÓNIMOS
Speech Recognition	Voice, Communication, conversation, dialogue, talk Processing,
Elicitation of requirements	N/A
Chatbot	N/A
Framework	Frame
Tool	IDE
Methodology	Method

3. Cadenas de Búsqueda

Se construyeron las siguientes cadenas (SQ, *Search Question*) de búsqueda con las palabras clave obtenidas y se utilizaron algunos de los operadores lógicos: OR para sinónimos o alternativas y AND para combinar las palabras:

SQ principal: ((platform OR Framework) AND (create) AND ((conversational agent) OR (chatbot) AND (recognition OR processing) AND (voice OR speak)))

SQ1: ((tools OR (IDE's)) AND ((recognition OR processing) AND (voice OR speak)))

SQ2: ((methodology OR method) AND (create) AND (chatbot))

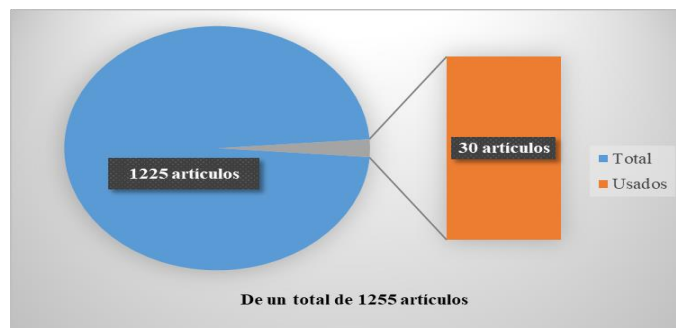
SQ3: (methodology AND (elicitation of requirements))

4. Generación de la búsqueda en las librerías digitales seleccionadas

A continuación, se muestran los resultados que arrojó cada cadena de búsqueda, en cada una de ellas se aplicó el filtrado de inclusión y exclusión que se describen en la sección D.

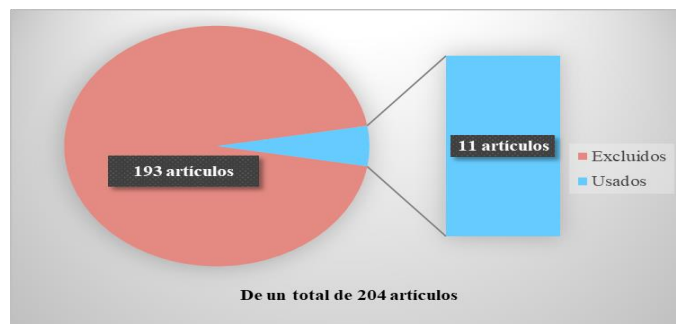
El resultado que arrojó la **cadena uno** fue un total de **1255 artículos (100%)**, a todos estos se les aplicaron los criterios dejando un total de **30 artículos (2.39%)** útiles para esta investigación. Esto se evidencia con la Gráfica 1.

Gráfica 1.- Artículos que mencionan una metodología para el reconocimiento de voz



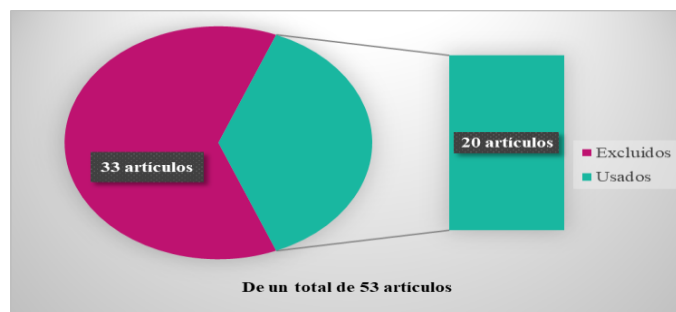
En segundo lugar, tenemos el resultado de la **cadena dos** con un total de **204 artículos (100%)** de los cuales se le aplicaron los criterios de inclusión y exclusión y solo **11 artículos** fueron útiles (**4.9%**). Donde nueve artículos hablan de metodología (4.41%) y dos tratan acerca de la creación de chatbot (0.98%). Y los resultados se representan en la Gráfica 2.

Gráfica 2.- Artículos que mencionan una metodología para la creación de chatbot



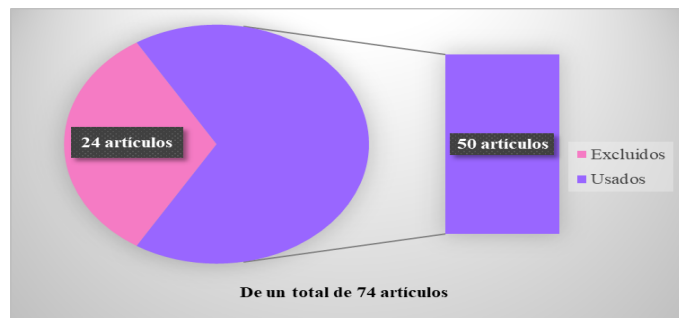
En tercer lugar, se muestran los resultados que arrojó la **cadena tres**, se encontraron **53 artículos (100%)** de los cuales con los criterios solo **20 artículos** fueron útiles (37%). Se puede visualizar los resultados en la Gráfica 3.

Gráfica 3.- Artículos que mencionan la Elicitación de Requerimientos



Y, por último, la **cadena principal** arrojó un total de **74 artículos (100%)**, a los cuales con los criterios solo fueron útiles **50 artículos (67.56%)**. En la Gráfica 4 se pueden observar los artículos obtenidos.

Gráfica 4.- Artículos que mencionan plataformas para la creación de chatbot con reconocimiento de voz



D) Inclusión y Exclusión de los artículos

Como último punto de la selección de los artículos, se fijaron criterios de inclusión que se muestran a continuación en la

Tabla 3, y los criterios de exclusión se muestran en la Tabla 4, con lo que se descartaron aquellos artículos no relevantes y los que no respondían ninguna pregunta de investigación.

Tabla 3.- Criterios de Inclusión

TIPO	CRITERIOS
INCLUSIÓN	○ Artículos publicados entre los años 2013 y 2018.
	○ Artículos que estén escritos en el idioma inglés.
	○ Artículos publicados en revistas y conferencias.
	○ Artículos que tengan acceso al resumen, palabras claves y conclusiones.
	○ Artículos que evidencien las herramientas para la creación de chatbot.
	○ Artículos que hablen del reconocimiento de voz en aplicaciones para chatbot.

Tabla 4.- Criterios de exclusión

TIPO	CRITERIOS
EXCLUSIÓN	○ Artículos incompletos.
	○ Artículos que no estén accesibles por las bases de datos seleccionadas.
	○ Artículos que aborden alguna herramienta o metodología, pero sin ninguna relación o una relación poca clara.
	○ Artículos que no presenten un objetivo claro que sea

identificable.

- Artículos que no incluyen ninguna característica del reconocimiento de voz en herramientas para chatbot.

3. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del estudio de mapeo sistemático, el cual se enfocó a dar una aproximación de todas las herramientas existentes para la creación de un asistente inteligente conversacional, basado en las preguntas de investigación.

Se obtuvieron nueve aplicaciones más utilizadas y mencionadas dentro de la literatura, algunas de las características que se pueden tomar en cuenta para comparar las herramientas de creación de chatbots son: la tecnología que aplica, por ejemplo: redes neuronales, procesamiento de lenguaje natural (PLN), aprendizaje automático o aprendizaje basado en reglas por mencionar algunas; la disponibilidad de la documentación en internet; el idioma; el lenguaje de programación que soporta, licencia etc. Para este caso se tomaron en cuenta las siguientes características y se muestran en la Tabla 5, donde la “x” muestra la característica con la que cuenta la herramienta y “—” es aquella característica que no incluye.

Tabla 5.- Herramientas Web

Criterios Nombre	Voz	Idioma Español	Licencia Gratuita	Interoperabilidad	Sin límite de interacciones
IBM Watson	X	X	X	X	--
AgentBot (aivo)	X	X	X	--	--
Twyla	--	--	--	X	--
Pypestream	--	X	--	--	X
Live Agent	X	X	--	X	--
Wit.ai	X	X	X	--	--
Chatfuel	--	X	X	--	--
Dialogflow	X	X	X	X	X
Microsoft Language Understanding Intelligent Service (LUIS)	X	X	--	--	--

4. CONCLUSIONES

Este artículo aporta un panorama general sobre el estudio de las herramientas más utilizadas que ayudan a la creación de un chatbot. Para proporcionar esta visión general se realizó un estudio de mapeo sistemático, con el cual se logró obtener una clasificación de herramientas web basadas en una serie de preguntas de investigación, con las cuales se pudo conocer la diversidad de herramientas que soportan un objetivo único, crear un chatbot. Cualquier herramienta se puede utilizar, pero todo dependerá de las necesidades de cada desarrollador y las características que se esté buscando cumplir con la herramienta. Esta clasificación proporcionó datos importantes obtenidos de la búsqueda, dejándonos conocimientos y demostrando que el tema de los chatbots es muy prometedor y con grandes posibilidades de utilización en la industria de la computación y cualquier área donde se emplee. Por lo tanto, se debe seguir estudiando.

Respondiendo a la pregunta principal de este estudio, la herramienta que mejor se adapta a las necesidades de esta investigación es la herramienta ofrecida por Google llamada DialogFlow, la cual nos da la disponibilidad de crear chatbots mediante el reconocimiento de voz, entre sus ventajas se encuentra que no se debe pagar por usar sus servicios, no limita el número de interacciones lo que se adecua muy bien a esta investigación para la etapa de pruebas y despliegue. También, se ejecuta en una plataforma en la nube de Google, además, permite conectarse a cualquier plataforma externa. Por ejemplo: Facebook, Asistente de Google, Messenger, entre otros. Asimismo, nos brinda la libertad de poder monitorear el proceso de nuestra conversación y así lograr retroalimentar nuestro chatbot, especialmente donde el chatbot no sabe que responder o preguntar en este caso, lo cual nos beneficia mucho para un continuo mantenimiento a lo largo del tiempo.

Dentro de los artículos más relevantes que arrojó el estudio se encontró el de (V. Serban I, 2017) el cual nos habla de un chatbot de aprendizaje de refuerzo profundo llamado MILABOT, fue creado para competir con Alexa de Amazon. MILABOT es capaz de conversar con humanos mediante pláticas pequeñas, este chatbot está creado con redes neuronales, PLN y aprendizaje automático entre otras tecnologías. También se encuentra el artículo de (Litvak. C, 2016) que nos habla de que el desarrollo de modelos de requisitos en lenguaje natural facilita la interacción entre todos los involucrados, aunque contribuye a generar ambigüedades, pero que al saber usarlo se puede mejorar la calidad de los mismos. Por otro lado, encontramos a (A. Lezcano, L. 2015) y a (Orr, K. 1981) el cual son diagramas y metodologías respectivamente para lograr la calidad que debe cumplir el sistema que se va a desarrollar, por eso, es importante conocerlas.

REFERENCIAS

- Litwin, E., 2005. *'Tecnologías educativas en tiempos de Internet'*.: Buenos Aires: Amorrortu, pp.113-138.
- Petersen, K. F. R. M. S. a. M. M., 2008. *'Systematic mapping studies in software engineering'*. Proceedings of the 12th international conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering, Vol. 2, n° 1, pp. 68-77.
- Quintana E, R. J., 2018. *'Chatbot para consultas sobre trámites administrativos en la Municipalidad de Surco'*. Repositorio Institucional – UTP, Vol. 1, n° 1, pp. 2-15.
- Sameera A, A.-K., 2015. *'Survey on Chatbot Design Techniques in Speech Conversation Systems'*. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 6, n° 7, pp. 1-9.
- V. Serban I, 2017. *'A Deep Reinforcement Learning Chatbot'*. Institute for Learning Algorithms: Montreal, pp. 1-40
- Litvak, C. S. |. H. G. D. S. |. D. J. H., 2016. *'Procesamiento de Lenguaje Natural para Estudiar Completitud de requisitos'*, San Justo. Buenos Aires: Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas, UNLAM. pp. 1-5.
- A. Lezcano, L.*, J. A. G. y. C. A. V., 2015. *'A Model for the Identification of KAOS Elements (Knowledge Acquisition Automated Specification) from the Specification of Requirements in Natural Language'*. vol. 26, n° 6, pp. 5-10.
- Orr, K. T., 1981. *'Structured Requirements Definition. In: Structured Requirements Definition'*. United States of America, pp. 61-135.
- Alemany, L. A. i., 2005. *'Herramientas Libres para Procesamiento del Lenguaje Natural'*, Córdoba, pp. 4-12.
- Asif M., A. W. L. S., 2017. *'Intent-Context Fusioning in Healthcare Dialogue-based Systems using JDL Model'*. Springer Link, pp. 61-72.
- Michiels, E., 2017. *'Modelling Chatbots with a Cognitive System Allows for a Differentiating User Experience'*. PoEM Doctoral Consortium, pp. 70-78.
- Silva F, A. C. N. P., 2013. *'Information Fusion for Context Awareness in Intelligent Environments'*. Springer Link, pp. 262-261.
- Yannick E., R. C. B. F. D. M. R., 2003. *'Conceptual Decoding for Spoken Dialog System'*. Geneva, Switzerland, EUROSPEECH, pp. 617-620.

Heurística para la generación de preguntas y respuestas a partir de la estructura HTML

Juan Jesus Sandoval Villanueva * Alberto Iturbe Herrera **
Noé Alejandro Castro-Sánchez ***

* *juan.sandoval18ce@cenidet.edu.mx*

** *iturbe@cenidet.edu.mx*

*** *ncastro@cenidet.edu.mx*

*Tecnológico Nacional de México, CENIDET, Interior Internado
Palmira, 62490 Cuernavaca, México*

Resumen La divulgación de la información en formatos electrónicos se ha venido propagando rápidamente en las últimas décadas. Por lo tanto, en el ámbito educativo es necesario crear herramientas que ayuden a la comprensión de dicha información. Se sabe que los cuestionarios son una forma de analizar las lecturas y evaluar el conocimiento. Por lo tanto, la actividad de generar cuestionarios automatizados es una aplicación con mayor impacto. Actualmente no existen herramientas que sean autónomas por completo, la mayoría de estas dependen de un usuario para la generación de preguntas y/o análisis de respuestas. Este trabajo propone una heurística para la generación automática de preguntas sin que estas dependa del usuario, únicamente el usuario debe ingresar un tema e inmediatamente las preguntas serán generadas con un conjunto de respuestas de opción múltiple.

Keywords: Procesamiento de Lenguaje Natural, Heurística, Pregunta-respuesta, Extracción de Información, Recuperación de Información.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las herramientas para la generación de preguntas y respuestas autónomas no están siendo atendidas ni investigadas en el ámbito de automatización de cuestionarios, dejando así un amplio campo de investigación. Como se muestra en el trabajo de Binda (2006) el problema de estas herramientas radica en que la mayoría depende de un usuario que proporcione la estructuración correcta de las preguntas y respuestas para poder generar los cuestionarios.

Asimismo, en la investigación de Salazar Blanco (2015) se menciona que, una forma de como generar exámenes automáticos es mediante bancos de preguntas y respuestas, los cuales, han sido automatizados únicamente en la generación de cuestionarios a partir de un conjunto limitado de preguntas y las respuestas a partir de su banco previamente generado por un usuario.

Además, Galli (2011) expresa que las aplicaciones actuales se enfocan en un dominio específico, motivo por el cual al tratar de ser utilizadas para un dominio distinto es necesario realizar ajustes en las configuraciones. Estos son algunos de los problemas que se desean eliminar con la propuesta de solución en esta investigación.

Actualmente, la mayoría de las herramientas de generación automática de pregunta-respuesta son implementa-

das en plataformas *e-learning* y siendo esta un área donde podría ser aplicada esta heurística.

De acuerdo a Galli (2011), esto se debe a que los cuestionarios son instrumentos de evaluación semi-formales, es decir, que son ejercicios que pueden realizarse dentro y fuera del aula, permitiendo tomar información básica para evaluar actitudes de los participantes y detectar niveles de dominio en atención a los objetivos.

Por lo tanto, la heurística que se propone en este trabajo se enfoca en generar preguntas y respuestas a partir de información extraída en formato HTML (del inglés *HyperText Markup Language*) de una WIKI específicamente Wikipedia. Motivado por el hecho de que la forma más común de difundir información sobre un tema en específico y orientado a la educación, es mediante páginas web en el formato ya mencionado, más concretamente WIKIS y enciclopedias virtuales.

Por tal motivo, se seleccionó el paradigma de la web semántica como fundamento para esta heurística, la cual, tiene como principal aportación la generación de un estándar de extracción de información relevante. Según Motz et al. (2006), esto se consigue a partir de etiquetas específicas en el HTML, las cuales, otorgan información acerca del contexto a la información que muestran.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Para poder generar este trabajo, se decidió seccionar en tres temas diferentes la búsqueda de trabajos relacionados, con el fin de ayudar en las diferentes secciones del método de solución, a continuación, se menciona cuáles fueron.

2.1 Determinantes

Para la generación de preguntas es indispensable conocer sobre los determinantes, estos son aquellas palabras que se ubican delante del nombre o sustantivos y sirven para delimitar el significado general de dicho nombre. Existen diferentes clases, por ejemplo, demostrativos, posesivos, numerales, interrogativos entre otros. Para esta investigación solo servirán los determinantes interrogativos, que son: qué, cuánto, cuántos, cuál y cuáles.

Analizando distintos artículos que ayuden a su buen uso, destaca el libro *Nueva Gramática de la Lengua Española* Española (2009), que aporta las bases del cómo identificar reglas y normas de los determinantes en general.

Además, Delgado Torrico (2016) expone que los demostrativos y los posesivos constituyen, junto con los artículos, la clase transversal de los determinantes o determinativos. En un sentido amplio, la clase de determinante abarca también a los cuantificadores pronominales, puesto que también estos convierten al sustantivo en una expresión referencial y lo legitiman como argumento de un predicado.

También definidas como palabras déicticas son aquellas cuyo significado depende de la localización tempo espacial de los interlocutores. Tal y como se muestra en tabla 1 de Delgado Torrico (2016). Para esta investigación, el determinante utilizado para la generación de preguntas es el interrogativo *qué*.

Tabla 1. Cruce de propiedades gramaticales

	PRONOMBRE	DETERMINANTE	ADVERBIO
Relativos	el libro que lees	cuyo libro	cundo quieras
Interrogativos	¿ Qué lees?	¿ Qué libro lees?	¿ Cómo estás?
Exclamativos	¡ Qué dices!	¡ Qué cosas dices!	¡ Cuánto trabajas!

2.2 Web semántica

Con respecto a la web semántica dentro del trabajo *De la web actual a la web semántica* por Piñeres Melo (2008), describe a la Web semántica como: "Una Web extendida, dotada de mayor significado en la que cualquier usuario en Internet podrá encontrar respuestas a sus preguntas de forma más rápida y sencilla gracias a una información mejor definida".

Por otro lado, al dotar a la Web de más significado y, por lo tanto, de más semántica, se pueden obtener soluciones a problemas habituales en la búsqueda de información gracias al uso de una infraestructura común, mediante la cual, es posible compartir, procesar y transferir información de forma sencilla.

Así mismo, esta Web extendida y basada en el significado, se apoya en lenguajes universales que resuelven los problemas ocasionados por una Web carente de semántica en la que, en ocasiones, el acceso a la información se convierte en una tarea difícil y frustrante.

Esto nos dice que la web semántica es útil para la extracción de información con estructura y de fácil comprensión tanto como para la computadora como para el humano y así poder agilizar tareas, como por ejemplo la automatización de cuestionarios.

Otro aporte de Piñeres Melo (2008), que sustenta al método de solución utilizado en este trabajo es, que mediante la información de cursos en español transmitidos a través de páginas HTML, tratan de dar un enfoque para el marcado semiautomático de metadatos de objetos de aprendizaje de las páginas web del curso y su posterior extracción en paquetes SCORM.

Esto se identifica como el primer paso para reciclar las páginas web del curso con todo el potencial de la Web semántica. La cuestión clave del enfoque propuesto por Piñeres Melo (2008) es evitar tanto como sea posible el marcado manual de metadatos.

2.3 Respuestas de opción múltiple

El trabajo *Consideraciones sobre el Examen de Preguntas de Opciones Múltiples (Multiple choice)* de Salazar Blanco (2015), describe la forma correcta de crear exámenes con respuesta de opción múltiple, del cual, se enfatizan las siguientes recomendaciones.

Para que haya una pregunta con respuestas de opción múltiple deben existir los siguientes elementos:

- **Tallo:** pueden ser sentencias o una pregunta
- **Opciones:** respuestas
- **Distractores:** respuestas incorrectas

Dentro de este tema se debe dejar en claro que para haber respuestas de opción múltiple el tallo debe estar bien redactado y con las siguientes condiciones:

- Sólo debe contener información relevante y necesaria, siendo su enunciado conciso y claro.
- Se debe evitar el uso de palabras o expresiones confusas que lleven a errores de interpretación.
- Su contenido no debe ser repetido en las preguntas.

En cambio, para las respuestas se debe tener la siguiente estructura:

- Debe tener una sola respuesta correcta.
- Cuando haya más de una opción correcta, se requerirá en el tallo seleccionar "la mejor respuesta".
- Deben evitarse las preguntas negativas como "cuál de las siguientes no es..." o "todas las siguientes excepto".

3. MÉTODO DE SOLUCIÓN

En esta sección se describen las herramientas utilizadas y los módulos desarrollados para dar solución a esta tarea.

Las fases que integran el método de solución fueron: definición de un corpus, extracción de datos y generación de preguntas.

3.1 Definición del corpus

La primera etapa fue la conformación de un corpus para poder generar pruebas y tener una fuente de información. Para la generación del corpus se utilizó Wikipedia. Esta plataforma fue elegida debido a la gran cantidad de información de la que dispone, la variedad de temas, aunado al hecho de que actualmente es considerada una de las wikis de mayor relevancia en internet.

Este sitio ofrece una API en el lenguaje de programación Python, la cual, permite extraer diferentes tipos de datos como: enlaces, imágenes, ubicaciones geográficas e información en formatos de texto plano y HTML. Este último formato se utilizó como método de extracción con el objetivo de obtener la información de un tema con el etiquetado correspondiente.

Debido a que la información disponible en esta plataforma es abundante, se definieron 10 temas del área de ciencias computacionales con la finalidad de hacer pruebas y comprobar la funcionalidad del método, los temas son:

- Lenguaje de programación
- Matemáticas discretas
- Teoría de la computación
- Inteligencia artificial
- Ingeniería de software
- Ciencias de la computación
- Sistemas distribuidos
- Base de datos
- Red neuronal artificial
- Diagrama de flujo

Esta información es utilizada como entrada para realizar la extracción de información.

3.2 Extracción de datos

En la versión 5 de HTML se encuentran nuevas etiquetas, las cuales, permiten identificar los fragmentos de información en los textos de mayor importancia o con información relevante, es decir, generar páginas semánticas. Un ejemplo es la etiqueta `<<ARTICLE>>`, la cual, indica que todo el texto dentro de esta es independiente al resto de la información, por lo tanto, es posible generar preguntas acerca de ese bloque de información dado que la respuesta se encontrará en esa misma sección.

Sin embargo, no todas las páginas implementan el paradigma de la web semántica, motivo por el cual, las etiquetas `"h"`, `"ul"` y `"ol"` que corresponden a títulos y listas ordenadas respectivamente, fueron utilizadas para realizar la extracción de información relevante. Esto puede apreciarse en la Figura 1.

Posteriormente, esta información es almacenada en un archivo de tipo JSON (del inglés *JavaScript Object Notation*), este permite guardar la información tomando en cuenta la jerarquía de esta, es decir, los subtítulos y listas

```
<h2>
  <span id="Clasificaci.C3.B3n_de_los_lenguajes_de_programaci.C3.B3n"></span>
  <span class="mw-headline" id="Clasificación_de_los_lenguajes_de_programación">Clasificación de
    los lenguajes de programación</span>
  <span class="mw-editsection"></span>
</h2>
<p></p>
<ol></ol>
<p></p>
<h3>
  <span id="Clasificaci.C3.B3n_hist.C3.B3rica_o_por_generaciones"></span>
  <span class="mw-headline" id="Clasificación_histórica_o_por_generaciones">Clasificación
    histórica o por generaciones</span>
  <span class="mw-editsection"></span>
</h3>
<p></p>
<p></p>
<ul>
  <li>
    <b>Primera Generación</b>
    " Los primeros ordenadores se programaban directamente en "
    <a href="/wiki/C3.B3digo_de_m3.A4quina" class="mw-redirect" title="Código de máquina">
      código de máquina</a>
    " (basado en "
    " en su denominación no implica que el lenguaje sea menos potente que un "
    " , sino que se refiere a la reducida "
  </li>
  <li>
    <b>Segunda generación</b>
    " Los "
    <a href="/wiki/Lenguaje_simb3lico" class="mw-redirect" title="Lenguaje simbólico">
      lenguajes simbólicos</a>
    " , así mismo propios de la máquina, simplifican la escritura de las instrucciones y las hacen
      más legibles. Se refiere al lenguaje "
    <a href="/wiki/Ensamblador" title="Ensamblador">ensamblador</a>
    " ensamblado a través de un macroensamblador. Es el lenguaje de máquina combinado con una se
      de poderosas macros que permiten declarar estructuras de datos y de control complejas."
  </li>
  <li>
    <b>Tercera Generación</b>
    " == $0
```

Figura 1. HTML de la página "Lenguaje de programación"

son añadidos como nodos hijo del título, denominado nodo principal. Esto permite realizar la identificación y generación de preguntas con mayor facilidad.

A continuación, se muestra la estructura del JSON acerca de un tema determinado.

```
{ "Nombre": "Clasificacion de los lenguajes de
  programacion",
  "Subtitulos": [ { "NombreSub": "Clasificacion
    historica o por generaciones",
    "lista": [ { "punto": "Primera Generacion",
      { "punto": "Segunda generacion",
      { "punto": "Tercera Generacion",
      { "punto": "Cuarta generacion",
      { "punto": "Quinta generacion" } ] ] ] }
```

3.3 Generación de preguntas

Una vez guardados los datos en JSON se procede a la creación de las preguntas, para esto es necesario obtener información gramatical de los datos como: el género y el número, es decir, si el dato es masculino o femenino y si es plural o singular con la finalidad de estructurar una pregunta congruente.

Posteriormente, comienza a estructurarse la pregunta utilizando los determinantes interrogativos. Tomando en cuenta esto, se generó una plantilla como se muestra en la Figura 2.

En la Figura 2 se muestran las reglas definidas, en las cuales, `<<t>>` corresponde al título y `<<st>>` corresponde a cada uno de los puntos de las listas o subtítulos. Por otra parte, mixto se encarga de generar tallos de los cuales no lograron identificarse los puntos o subtítulos, esto pretende disminuir los errores de incongruencia.

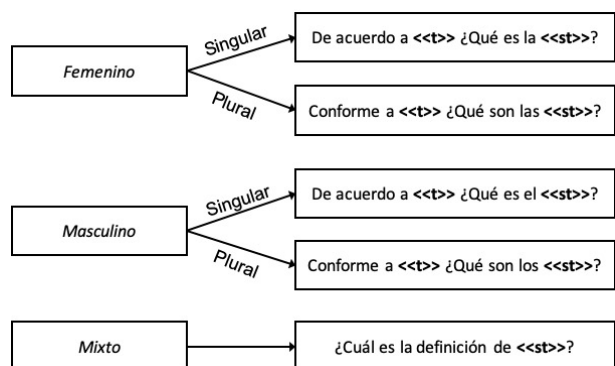


Figura 2. Diagrama de clasificación de género y número gramatical

De esta forma se generan tallos mayormente concisos y claros, lo cual permiten realizar búsquedas de la respuesta correcta con mayor facilidad.

3.4 Generación de respuestas

Como se observa en la Figura 2 se realizan preguntas de un tema en específico, por ejemplo: en el tema **Lenguaje de programación** se genera el tallo: *De acuerdo a la Clasificación de los lenguajes de programación ¿Qué es la Clasificación por propósito?*.

Tomando en cuenta esto, para extraer la respuesta correcta se realiza una búsqueda con el término: *Clasificación de los lenguajes de programación* dentro de las etiquetas (**h1**). Una vez identificado se convierte en nodo padre y dentro de él se encuentran sus nodos hijos.

Posteriormente, el nuevo nodo hijo *Clasificación por propósito*, debe encontrarse dentro de las etiquetas (**ol**, **ul** ó **h2**). Una vez identificado, este se convierte en nodo padre para buscar dentro de sus nodos hijos la primera etiqueta **<<p>>**, que pasa a ser la respuesta correcta.

Previo a haber generado las preguntas y su respectiva respuesta correcta, se generan las respuestas incorrectas (distractores). Esto se realiza de forma aleatoria tomando tres respuestas de otras preguntas. Es necesario mencionar que, debido a que pueden generarse varias preguntas a partir de un mismo título debido a los subtítulos o listas, estas tienden a parecerse entre sí, con esto se evitará la obviedad de la respuesta correcta.

4. RESULTADOS

A partir del corpus extraído de Wikipedia con 10 temas, se obtuvieron los resultados que se observan en la tabla 2, la cual, muestra solo la precisión dejando en futuros trabajos la cobertura, este se debe a la complejidad que está implicada debido a la cantidad de preguntas posibles que un ser humano puede generar, dado que es prácticamente ilimitada.

En la sección de preguntas correctas fueron consideradas todas aquellas que tuviesen coherencia en relación a la concordancia de género y número, teniendo como base la el diagrama de la Figura 2, por ejemplo, una pregunta correcta es la siguiente: *Conforme a <<t>> ¿Que son las*

Tabla 2. Resultados del método

Tema	Preguntas		Opciones	
	Correctas	Erróneas	Correctas	Erróneas
Lenguaje de programación	16	0	16	0
Matemáticas discretas	15	0	15	0
Teoría de la computación	9	0	5	4
Inteligencia artificial	0	0	0	0
Ingeniería de software	0	0	0	0
Ciencias de la computación	5	0	5	0
Sistemas distribuidos	0	0	0	0
Base de datos	11	0	10	1
Red neuronal artificial	15	0	13	2
Diagrama de flujo	0	0	0	0

Funciones? Donde la concordancia de género la podemos ver en *las* que define a *Funciones* como femenino plural dejando de este modo una pregunta sintácticamente correcta.

Por otra parte, en la sección opciones correctas se analizaron las respuestas distractoras y la correcta. En el caso de las distractoras se verificó que no tuviese repeticiones. Sin embargo, el mayor problema se encontró en verificar que las respuestas correctas realmente fueran las correctas, debido a que en algunos casos dentro de la etiqueta **<<p>>** se realiza una breve introducción del tema y en otras ocasiones se desviaba del contexto.

Por último, se tiene que tomar en cuenta que los resultados en la tabla 2 varían en la selección de respuestas distractoras, dado que al ser extraídas de forma aleatoria, cada ejecución será diferente a pesar de ingresar el mismo tema.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Con base en los resultados se determinó que es necesario implementar herramientas como identificadores de definiciones en el módulo de respuestas correctas para mejorar los elementos generados. Debido a que las etiquetas **<<p>>** no siempre hacen referencia al término en cuestión o en otros casos, se encuentran subtítulos o puntos que vuelven obvia la respuesta correcta.

Este problema puede ser solucionado implementando la búsqueda de una posible definición del subtítulo o punto dentro del etiquetado **<<p>>**.

Además, se comprobó que, si se aplica el paradigma de web semántica a las páginas como Wikipedia o enciclopedias similares, es posible crear instrumentos de evaluación como cuestionarios y exámenes totalmente autónomos que se basen en el etiquetado HTML.

Asimismo, en este artículo se hace referencia a la creación de cuestionarios solo siguiendo las reglas de concordancia de género y número sobre el enunciado. Sin embargo, existen trabajos como el de Rivera Jiménez (2017) que son herramientas que ayuda a evaluar cuestionarios para verificar si se están realizando mediante el nivel de lenguaje de la semántica.

6. AGRADECIMIENTO

Este trabajo fue apoyado parcialmente por el gobierno de México (beca CONACYT, SNI, TecNM 7346.19-P).

REFERENCIAS

- Binda, M.d.C. (2006). Consideraciones sobre el examen de preguntas de opciones múltiples (multiple choice). *Revista Argentina de Radiología*.
- Delgado Torrico, A. (2016). ¿determinante o pronombre? las clases transversales en la nueva gramática de la lengua española de la rae. *marcoELE. Revista de Didáctica Español Lengua Extranjera*.
- Española, R.A. (2009). *Nueva gramática de la lengua española*, volume 2. Espasa Libros.
- Galli, Amanda Roiter, H.D.M.D.S.S.A.N.G.A.A.G.H.B.C. (2011). Evaluación de la calidad de las preguntas de selección múltiple utilizadas en los exámenes de certificación y recertificación en cardiología en el año 2009. *Revista Argentina de Cardiología*.
- Motz, R., Sosa, R., and Rodriguez, A. (2006). Recycling course web pages for the semantic web. In *2006 Fourth Latin American Web Congress*, 82–90. doi:10.1109/LA-WEB.2006.31.
- Piñeres Melo, Marlon Alberto Bonilla Botia, I.A. (2008). De la web actual a la web semántica. *PROSPECTIVA*.
- Rivera Jiménez, Jesús Flores Hernández, F.A.H.A.M.G.A. (2017). Evaluación de reactivos de opción múltiple en medicina. evidencia de validez de un instrumento. *Investigación en Educación Médica*.
- Salazar Blanco, Olga Francisca Marcela Vélez, C.T.J.J. (2015). Evaluación de conocimientos con exámenes de selección múltiple: ¿tres o cuatro opciones de respuesta? experiencia con el examen de admisión a posgrados médico-quirúrgicos en la universidad de antioquia. *Iatreia*.

El Problema del Camino más Corto Resuelto con una Alternativa basada en Redes Neuronales

Oliver Espinosa-Meneses . Manuel Mejía-Lavalle . José Ruiz . Gerardo Reyes

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Mor. 62490, México
e-mail: {oliver.espinosa18ce, mlavalle, josera, greyes} @ cenidet.edu.mx

Abstract: Las Redes Neuronales Artificiales Pulsantes han sido empleadas para resolver problemas de en el campo de la Optimización de Trayectorias, específicamente en el problema de la ruta más corta. Sin embargo, existen modelos de Redes Neuronales Pulsantes que necesitan un gran número de iteraciones antes de encontrar la ruta más corta entre un punto y otro. En este artículo se presenta una variante de Red Neuronal Pulsante para resolver el problema de la ruta más corta de manera eficiente. Esta variante cuenta con una velocidad dinámica de propagación de auto-onda, la cual se ajusta de manera heurística para evitar iteraciones donde no hay cambios en la Red. Para mostrar la eficiencia del modelo, se realizan experimentos y se comparan los resultados contra los obtenidos por otros modelos de Redes Neuronales Pulsantes. Para la comparativa se utilizan modelos que emplean una velocidad de auto-onda estática y modelos con una velocidad de auto-onda dinámica.

Palabras clave: Red Neuronal Pulsante, Problema del camino más corto, Optimización, Auto-Onda dinámica.

1. INTRODUCCIÓN

El problema del camino más corto o *Shortest Path* (SP, por sus siglas en inglés) es uno de los problemas más estudiados de la Optimización de Trayectorias. El objetivo de resolver el problema del camino más corto es encontrar el camino de menor costo entre una fuente dada y un destino en una red determinada, es decir, encontrar la ruta más corta en un grafo de un vértice a otro. Aquí, el "más corto" significa que el costo total que se correlaciona con la ruta debe ser el menor Ma et al (2011).

De acuerdo con la Teoría de Grafos, en un grafo ponderado $G = (V, E)$, donde la distancia entre los vértices v_i y v_j es w_{ij} , se requiere encontrar el camino más corto entre un vértice de inicio s y un vértice meta g . En grafos con pocos nodos la solución podría resultar sencilla, pero con grafos de mayor magnitud, la complejidad computacional se vuelve alta. Los algoritmos tradicionales generalmente tienen complejidad exponencial, siendo un problema NP.

Existen numerosos algoritmos para solucionar el problema del camino más corto. Desde las soluciones exhaustivas como la Búsqueda en anchura o la Búsqueda en Profundidad, hasta las soluciones con mayor eficiencia como el *Branch & Bound* Morrison et al (2016), el algoritmo A* Thulasiraman et al (2016), Dijkstra (1959) y el algoritmo Bellman-Ford Cherkassky et al (1959). El problema del camino más corto tiene diversas aplicaciones en la robótica, las telecomunicaciones, el transporte, la teoría de juegos, las redes de computadoras, búsquedas web, entre otros.

Desde el trabajo original de Hopfield et al (1985), se han realizado diversas investigaciones utilizando las Redes Neuronales Artificiales (RNA) para resolver problemas de optimización combinatoria. En el presente artículo se propone utilizar el enfoque de las RNA para resolver el problema SP, en particular de las *Pulse-Coupled Neural Network* (PCNN, por sus siglas en inglés). Las PCNN son redes no supervisadas, forman una red auto organizada que no requiere entrenamiento. Las PCNN son capaces de emular el comportamiento de las neuronas corticales como se observa en las cortezas visuales de los mamíferos Eckhorn et al (1990).

Ha aumentado el interés en el uso de PCNN para diversas aplicaciones, como el reconocimiento de objetivos Ranganath et al (1990), el procesamiento de imágenes Gu et al (1999), el reconocimiento de patrones Muresan (1999) y reducir el efecto de ruido gaussiano Ortiz et al (2016). Algunas investigaciones recientes muestran que la dinámica espacio temporal de las PCNN proporciona una buena capacidad computacional para resolver algunos problemas de optimización. En 1999, Caulfield y Kinser (1999) presentaron la idea de utilizar la onda automática en PCNNs para encontrar la solución al problema del laberinto. Su modelo puede encontrar la ruta más corta rápidamente y con el mínimo esfuerzo, donde la solución está relacionada con la longitud de la ruta más corta e independiente de la complejidad del gráfico de la ruta. Sin embargo, se necesitan muchas neuronas para encontrar la ruta más corta en grandes laberintos o gráficos, ya que una neurona corresponde a una unidad de longitud de ruta. Posteriormente Qu et al (2007) presenta el modelo *Modified Pulse-Coupled Neural Network* (MPCCN), el cual tiene un costo computacional menor. El número de iteraciones de la MPCNN es proporcional a la longitud del

camino más corto. Ma et al (2011) publicaron el modelo *Auto-Wave Neural Network* (AWNN), el cual aprovecha la característica de auto-onda de las PCNN para resolver el problema de SP. Paredes-Cano et al (2018) presentaron una mejora del modelo AWNN además de una técnica para explicitar el conocimiento generado por la Red Neuronal. Los modelos mencionados anteriormente sugieren que la velocidad de la onda debe mantener una velocidad constante. Posteriormente se presentaría un modelo llamado *Self-adaptive autowave pulse-coupled neural network* (SAPCNN) Li et al (2013). Este modelo puede ajustar la velocidad de propagación de la onda automáticamente de acuerdo con el estado actual de la red. Adicionalmente los resultados indican que el modelo logra calcular el camino más corto con menor cantidad de iteraciones.

En este artículo se propone el modelo *Self-adaptive autowave modified pulse-coupled neural network* (SAM-PCNN), el cual es un modelo modificado de PCNN que es capaz de adaptar la velocidad de onda de manera más eficiente que la SAPCNN. Los resultados de la experimentación muestran que el modelo SAM-PCNN tiene mayor eficiencia que los modelos que cuentan con una velocidad constante de onda, además de que también supera al modelo SAPCNN, el cual cuenta con una velocidad dinámica auto-onda.

El artículo se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se hace una breve revisión de los modelos de PCNN para optimización de trayectorias. En la Sección 3 se hará una descripción del modelo propuesto SAM-PCNN. En la Sección 4 se describen los experimentos y los resultados obtenidos. En la Sección 5 se discuten los resultados y en la sección 6 se concretan las conclusiones y el trabajo futuro.

2. MODELOS DE PCNN PARA OPTIMIZACIÓN DE TRAYECTORIAS

2.1 Auto-Wave Neural Network

Se analizaron diferentes modelos de PCNN para su implementación, el primero de ellos es el modelo AWNN (*Auto-Wave Neural Network*, por sus siglas en inglés) presentado en Ma et al (2011). Dicho modelo está diseñado para resolver el problema de la ruta más corta. Utiliza como entrada la matriz de adyacencias de un grafo ponderado. En la Figura 1 se muestra una neurona de este modelo, el cual está compuesto por la capa de recepción, de enlace y de pulsos. La capa de enlace está formada por la combinación de W y F . La matriz U representa la capa de enlace mientras que la capa de pulsos está compuesta por el umbral E y la salida Y .

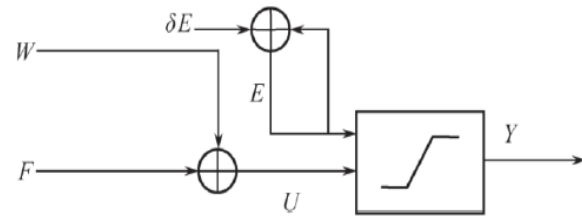


Figura 1. Modelo de la neurona *Auto-Wave Neural Network* Ma et al (2011).

Cada neurona recibe como entrada información de la matriz de adyacencia W y además recibe un valor F del costo adicional en caso de continuar por cierta ruta: sumando W y F se obtiene el valor U que es el costo total incurrido por algún camino hasta un momento dado determinado por el umbral dinámico E . En cada época el parámetro E se incrementa por un valor constante δE : si el costo acumulado en U es igual o supera al umbral E , entonces la neurona se activa tomando la salida Y el valor de “1”, de otra manera la salida de la neurona será cero.

Dado un problema con n nodos, la Red Neuronal tendrá entonces tantas neuronas como $n \times n$. El efecto de auto-onda se obtiene precisamente al ir realizando incrementos en el tiempo del umbral E . Las siguientes ecuaciones resumen el comportamiento de la neurona AWNN.

$$F_i[n] = F_h[n] + W_{hi} \quad (1)$$

$$U_{ij}[n] = F_i[n] + W_{ij} \quad (2)$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } E[n] \geq U_{ij}[n] \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3)$$

$$E[n] = E[n-1] + \delta E \quad (4)$$

Se seleccionó el modelo AWNN por que cuenta con un mecanismo sencillo y fácil de comprender. Dicho modelo es un buen candidato para comenzar a entender la manera en que las Redes Neuronales Pulso Acopladas son empleadas en problemas de optimización de trayectorias.

2.2 Auto-Wave Neural Network Explicit

Este modelo de PCNN surge a partir de un artículo realizado en CENIDET Paredes-Cano et al (2018). Es una extensión del modelo AWNN presentado en Ma et al (2011). Para hacer más eficiente el proceso los autores proponen un valor inicial de E como el costo menor del nodo de inicio a sus siguientes nodos. Esta modificación permite que desde la primera interacción pulse por lo menos una neurona.

Adicionalmente se propone un método para recuperar la ruta calculada por la Red Neuronal. La explicitación del conocimiento es un sub-tema dentro de las RNA y se debe a que, en el surgimiento de la tecnología, existía la crítica de que aunque los paradigmas neuronales daban buenos resultados, no era posible acceder al conocimiento que de manera automática el algoritmo había generado. Se decía entonces que las RNA eran

algoritmos de caja negra. Sin embargo, con el tiempo, han surgido propuestas exitosas para precisamente transparentar el conocimiento oculto entre las neuronas, de tal manera que el usuario tenga acceso a, por ejemplo, las reglas de producción que se generan de manera automática como resultado de la actividad interna de la RNA. En ese sentido, en Paredes-Cano et al (2018) se logra rescatar el camino óptimo o de menor costo, extrayendo el conocimiento que queda oculto en la capa de salida Y de la RNP propuesta.

La capa de salida Y es básicamente una matriz de tamaño $n \times n$ con valores de ceros y unos. La ruta se recupera de manera inversa, saltando del nodo final al nodo inicial. En la matriz de salida Y , el nodo final se encontrará en la columna i con el mismo número que el nodo meta. En esa columna se buscará el valor “1” y ahí donde aparezca se tomará el valor del renglón j . Con ese valor de renglón se entrará nuevamente a la matriz Y pero ahora buscando en la columna con valor j , el valor “1” y repitiendo el proceso hasta llegar al nodo inicial. Al final los valores j así recuperados definirán la ruta de costo mínimo.

2.3 Self-Adaptive Autowave Pulse-Coupled Neural Network

El modelo SAPCNN Li et al (2013) propaga la onda de forma dinámica según el estado de la red. Esto representa una mejora, pues la mayoría de los métodos sugieren que la onda automática de los modelos PCNN debe mantener una velocidad constante para encontrar los caminos más cortos. En la Figura 2 se muestra el diagrama del modelo.

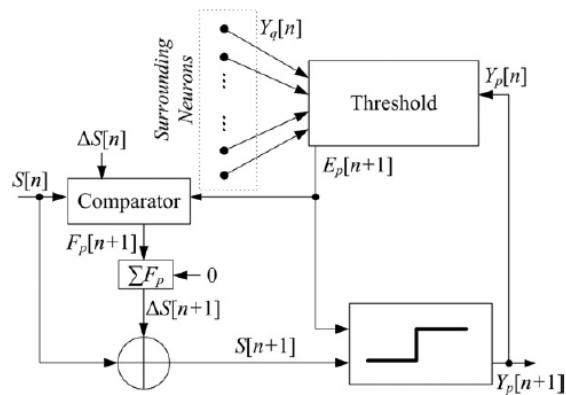


Figura 2. Diagrama del modelo SAPCNN Li et al (2013)

En el diagrama se puede ver que las salidas de la matriz de pulsos Y son las entradas de la neurona, las cuales se reciben el umbral $E[n]$. La actividad interna $S[n]$, la cual se incrementa por $\Delta S[n]$ en cada iteración. $\Delta S[n]$ puede adquirir diferentes valores dependiendo del *comparator* como aparece en el diagrama de F_p que a su vez depende de la relación que existe entre el umbral $E[n + 1]$ y $S[n] + \Delta S[n]$. En las ecuaciones (5) a (9) se puede encontrar una descripción más detallada del comportamiento de este modelo.

$$Ep[n + 1] = \begin{cases} V_E \text{ if } Y_p[n] = 1 \\ \min(S[n] + W_{qp}[n], Ep[n]) \text{ if } Y_p[n] = 0 \\ E_p \text{ de otra manera} \end{cases} \quad (5)$$

$$F_p[n + 1] = \begin{cases} N \text{ if } E_p[n + 1] < S[n] + \Delta S[n] \\ -1 \text{ if } E_p[n + 1] = S[n] + \Delta S[n] \\ 0 \text{ de otra manera} \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta S[n] \begin{cases} \gamma \text{ if } F_m > 0 \\ \Delta S[n] + \gamma \text{ si } F_m = 0 \\ \Delta S[n] \text{ de otra manera} \end{cases} \quad (7)$$

$$S[n + 1] = S[n] + \Delta S[n] \quad (8)$$

$$Y_p[n + 1] = \begin{cases} 1 \text{ if } S[n + 1] \geq Ep[n + 1] \\ 0 \text{ de otra manera} \end{cases} \quad (9)$$

Este modelo está diseñado para resolver el problema del camino más corto, sin embargo, los autores reportan que también puede ser usado para la planeación de trayectorias para robots móviles.

2.4 Variante propuesta Self-Adaptive Autowave Modified Pulse-Coupled Neural Network (SAM-PCNN)

El objetivo del modelo SAM-PCNN que aquí se propone es resolver el problema del camino más corto o *Shortest Path* (SP, por sus siglas en inglés) en un grafo ponderado no dirigido en la menor cantidad de iteraciones. Cuenta con una velocidad de onda dinámica que puede adaptarse dependiendo del estado de la red. Sin embargo, a diferencia de la SAPCNN Li et al (2013), el modelo SAM-PCNN logra adaptar la velocidad de onda de manera exacta en cada iteración, logrando eliminar las iteraciones donde no hay cambios en la Red.

El diagrama del modelo propuesto se presenta en la Figura 3. Se puede apreciar que la neurona se alimenta de las salidas del resto de las neuronas y se retroalimenta de su propia salida para calcular el umbral. Posteriormente se calcula la velocidad dinámica de la auto onda, la cual ayuda a la actividad interna de la Red a alcanzar el umbral de por lo menos una neurona en cada iteración.

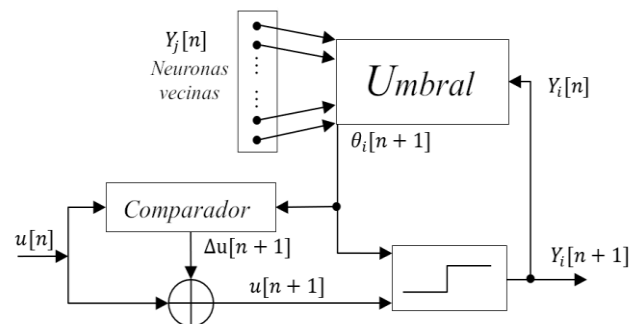


Figura 3. Diagrama de la neurona del modelo propuesto SAM-PCNN.

Para explicar con mayor claridad el modelo propuesto, es necesario definir las notaciones más relevantes del tema. Los índices i y j se refieren a diferentes neuronas. Para hacer referencia a los vecinos de la neurona i se utiliza R_i . W_{ij} es la distancia positiva diferente de cero que existe entre la neurona i y la neurona j sólo si $j \in R_i$, de lo contrario, W_{ij} es infinito. N es el número total de neuronas.

La descripción matemática del modelo SAM-PCNN es la siguiente: cada una de las neuronas tiene una salida binaria Y_i la cual se calcula de acuerdo con la Ecuación 10.

$$Y_i[n+1] = \begin{cases} 1 & \text{if } u[n+1] > \theta_i[n+1] \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (10)$$

Si $Y_i[n] = 1$, se dice que la neurona i ha pulsado en la iteración n , u es la actividad interna de la red y θ_i es el umbral de la neurona, el cual se calcula con la Ecuación 11.

$$\theta_i[n+1] = \begin{cases} V_\theta & \text{if } Y_i[n] = 1 \\ \min(u[n] + W_{ji}[n], \theta_i[n]) & \text{if } Y_i[n] = 0, Y_j[n] = i \text{ y } i \in R_j \\ \theta_i[n] & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (11)$$

$$V_\theta = NW_{max} \quad (12)$$

El umbral θ_i puede tomar tres valores diferentes dependiendo de las salidas de la Red. V_θ es un valor alto que el umbral toma cuando la neurona tiene una salida positiva. Se calcula con la Ecuación 12 multiplicando el número total de neuronas N por la máxima distancia de W . V_θ evita que la neurona pulse nuevamente. Si la neurona vecina j pulsa, se busca el valor mínimo entre $u[n] + W_{ji}[n]$ y el valor actual del umbral $\theta_i[n]$.

La parte novedosa de este modelo es la manera en que se comporta la actividad interna u . El mecanismo que permite que u incremente de manera dinámica de tal forma que pueda alcanzar el umbral de por lo menos una neurona en cada iteración, es el que se muestra en la Ecuación 13 y se muestra en el diagrama como Comparador.

En la expresión anterior se muestra que el incremento de u es Δu . Se calcula con la diferencia entre el valor mínimo de las x y u . Siendo x un elemento de los umbrales θ mayores que u . El cálculo de $u[n+1]$ se muestra en la Ecuación 14.

$$u[n+1] = u[n] + \Delta u[n+1] \quad (13)$$

En la Ecuación 14 se muestra el cálculo de W la representa la matriz de distancias. Cuando una neurona ha pulsado se modifican las distancias que llevan a esa neurona por el valor de V_θ .

$$W_{ji}[n+1] = \begin{cases} V_\theta & \text{if } Y_i[n+1] = 1 \text{ y } i \in R_j \\ W_{ji}[n] & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (14)$$

Si una neurona i es alcanzada por la auto-onda proveniente de una neurona j , se guarda la neurona j como el padre de la neurona i utilizando la notación R_i^P . Cuando la onda de disparo alcanza la posición de la neurona meta, la neurona meta se disparará y se determinará una ruta desde la meta a la neurona inicio moviéndose sucesivamente hacia el padre de cada neurona. Este será el camino más corto desde la neurona de inicio a la neurona meta.

2.5 Pseudocódigo SAM-PCNN

Para tener mayor claridad del funcionamiento del modelo propuesto, se presenta el siguiente pseudocódigo para mostrar los pasos de la red propuesta cuando se utiliza para resolver el problema del camino más corto. Aquí la neurona de inicio se representa con una s , la neurona meta se representa con una g . Uno de los aspectos importantes de este algoritmo y de las PCNN en general, es que se puede hacer en paralelo, lo que resulta en un cálculo más eficiente, especialmente con búsquedas de gran magnitud.

-
- 1) Inicializar la red: V_θ de acuerdo con la Ecuación 12, $n = 0$, $Y_i[0] = 0$, $u[0] = 0$, $\Delta u[0] = 0$, $Y_s[0] = 1$, $\theta_s[0] = V_\theta$.
 - 2) Para cada neurona i en la SAM-PCNN:
 - a. Calcular $\theta_i[n+1]$ de acuerdo con la Ecuación 11.
 - b. Calcular la velocidad de la auto-onda $\Delta u[n+1]$ de acuerdo con la Ecuación 13.
 - c. Calcular la actividad interna $u[n+1]$ de acuerdo con la Ecuación 14.
 - d. Calcular $Y_i[n+1]$ de acuerdo con la Ecuación 10.
 - e. Si $Y_i[n+1] = 1$.
 - i. Actualizar $W_{ji}[n+1]$ conforme la Ecuación 14.
 - ii. $\theta_i[n+1] = V_\theta$.
 - iii. Guardar los padres de las neuronas que han sido estimuladas
 - f. Si la neurona g ha pulsado ir a paso 3, de lo contrario $n = n + 1$ y regresar al paso 2.
 - 3) Explicitar la ruta generada buscando en el vector de neuronas padre desde la neurona g hasta que la neurona padre $R_i^P = s$.
-

3. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En esta Sección se presentan experimentos que permiten ilustrar de mejor manera la eficiencia del modelo SAM-PCNN. Para realizar los experimentos se estudiaron cuidadosamente y se implementaron los modelos de PCNN propuestos por Ma et al (2011), Paredes-Cano et al (2018) y Li et al (2013). La implementación de los algoritmos se hizo en C++ de manera secuencial, en un equipo de cómputo con un microprocesador i5-7200U de séptima generación @ 2.50 GHz 2.70 GHz con 8 GB

de memoria RAM. Para el registro del tiempo de procesamiento se presenta un tiempo promediado de 100 repeticiones.

Para el experimento se utilizó un grafo asimétrico con diez nodos y veinte aristas presentado en Li et al (2013) el cual se muestra en la Figura 4. Se buscaron 10 caminos diferentes dentro del grafo. Las búsquedas se originaron desde todos los nodos al nodo 10 y del nodo 10 al nodo 1. Para una mejor comparación, se realizan los mismos experimentos que es en Li et al (2013). En la Tabla 1 se presentan los resultados de cada uno de los algoritmos al realizar estas búsquedas.

Tabla 1. Resultado de las iteraciones por algoritmo del Experimento

Experimento	Ruta	Costo	Iteraciones			
			AWN	AWNNE	SAPCNN	SAM-PCNN
1	1-6-10	15	15	11	9	6
2	2-7-10	16	16	16	10	6
3	3-8-10	20	20	17	13	8
4	4-9-10	14	14	8	8	4
5	5-9-10	10	10	8	5	3
6	6-10	10	10	6	6	4
7	7-10	14	14	13	9	6
8	8-10	16	16	13	11	8
9	9-10	7	7	5	4	2
10	10-6-1	15	15	9	9	4
		Total	137	106	84	51
Diferencia con respecto a SAM-PCNN			+86	+55	+33	0

En la Tabla 1 se puede apreciar que los algoritmos AWNN Ma et al (2011) y AWNN Explicitada Paredes-Cano et al (2018), necesitan una mayor cantidad de iteraciones para el cálculo de la ruta. Al modelo AWNN Ma et al (2011) le toma una iteración por cada unidad de distancia. Es decir, si la distancia del camino más corto es 15 como en el ejercicio 1, requerirá de 15 iteraciones para resolver el problema. Al modelo AWNN Explicitada Paredes-Cano et al (2018) le toma menos iteraciones debido a que la velocidad de la auto onda es dinámica en la primera iteración y posteriormente se vuelve constante.

Al analizar los resultados del modelo SAPCNN Li et al (2013), es notorio que puede encontrar el camino más corto en menos iteraciones, ya que cuenta con una auto-onda que se propaga de manera dinámica dependiendo del estado de la Red, lo que le permite a su actividad interna cumplir fácilmente con las condiciones necesarias para generar pulsos en las neuronas de la Red. Sin embargo, a pesar del mecanismo dinámico de este modelo, aún existen iteraciones donde no hay cambios en la Red, es decir, iteraciones donde ninguna de sus neuronas pulsa.

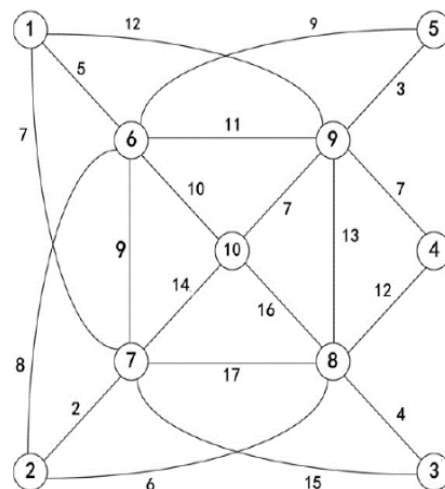


Figura 4. Grafo asimétrico con 10 nodos y 20 aristas Li et al (2013).

Por otro lado, el modelo propuesto SAM-PCNN presenta una menor cantidad de iteraciones para encontrar el camino más corto. El modelo cuenta con un mecanismo de auto onda que adapta su velocidad de manera heurística, lo cual le permite optimizar el número de iteraciones necesarias para el cálculo de la ruta. En total el modelo propuesto SAM-PCNN hizo 86 iteraciones menos que el modelo AWNN Ma et al (2011), 55 iteraciones menos que el modelo AWNN Explicitada Paredes-Cano et al (2018) y 33 iteraciones menos que SAPCNN Li et al (2013).

4. DISCUSIÓN

Encontrar la solución de la ruta óptima es un problema NP completo, incluso el muy citado algoritmo Dijkstra tiene complejidad algorítmica de $O(N^2)$, donde N es el número de nodos de un grafo G . Para los modelos de PCNN como el modelo AWNN Ma et al (2011), el cual cuenta con una velocidad constante de propagación, la complejidad algorítmica es $O(LN)$, donde L es equivalente a la distancia entre un nodo de inicio y el nodo más lejano. En el caso de los modelos SAPCNN Li et al (2013) y SAM-PCNN, los cuales cuentan con una velocidad dinámica de propagación, la complejidad algorítmica es $O(N)$, debido a que para cada iteración es necesario calcular los umbrales, la velocidad de la auto onda y la actividad interna. Tomando en cuenta que M es el número de iteraciones necesarias para encontrar la solución, la complejidad de ambos modelos es $O(MN)$. Sin embargo, para el modelo propuesto SAM-PCNN, el número de iteraciones es proporcional al número de neuronas cuya distancia al nodo de inicio sea menor que la distancia del nodo objetivo. Es decir, si se desea calcular el camino más corto del nodo A al nodo C , pero el nodo B es más cercano al nodo A , el número de neuronas más cercanas que C es 1 que se puede representar como P . En este caso M es igual a $P + 1$, pues en la primera iteración pulsará la neurona B y en la siguiente iteración pulsará la neurona C . Por lo tanto, la complejidad algorítmica

para el modelo propuesto SAM-PCNN puede re-escribirse como $O((P + 1)N)$.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se presentó el modelo SAM-PCNN para resolver de manera eficiente el problema del camino más corto. Para poder realizar la experimentación, fue necesario estudiar e implementar los modelos AWNN Ma et al (2011), AWNN Explicitada Paredes-Cano et al (2018) y SAPCNN Li et al (2013). Se mostró que el modelo propuesto no sólo es una buena alternativa para resolver este tipo de problemas, sino que además resulta ser más eficiente que otros modelos de PCNN que persiguen el mismo objetivo.

De acuerdo con los resultados del experimento 1, el modelo SAM-PCNN es hasta 39.28% más eficiente con respecto del modelo SAPCNN Li et al (2013) y hasta un 62.77% más eficiente que el modelo AWNN Ma et al (2011).

En esta investigación los algoritmos fueron implementados de manera secuencial, por lo que los resultados presentados pueden mejorar considerablemente con una implementación paralela. Esto último se tiene contemplado como parte del trabajo futuro relacionado con esta investigación, además de probar el modelo SAM-PCNN en otros ámbitos como la Planeación de Trayectorias Discretas para Robots Móviles.

REFERENCIAS

- Cherkassky B. V., Goldberg A. V., Radzik T. (1996). Shortest paths algorithms: theory and experimental evaluation, *Math. Programming* 73 (2) pp. 129–174.
- Caulfield H. J. y Kinser: Finding M. (1999). The shortest path in the shortest time using PCNNs, *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 10, n° 3, pp. 604–606.
- Dijkstra E. W. (1959). A note on two problems in connection with graphs, *Numer. Math.* 1(1) pp. 269–271.
- Eckhorn R., Reitboeck H. J., Arndt M. y Dicke P. W. (1990). Feature linking via synchronous among distributed assemblies: Simulations of results from cat visual cortex, *Neural Comput.*, vol. 2, pp. 293–307.
- Gu X., Yu D. y Zhang L. (1999). Image shadow removal using pulse coupled neural network, *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 16, n° 3, pp. 692–698.
- Hopfield J. J., Tank D. W. (1985). Neural computation of decisions in optimization problems. *Biol. Cybern.*, vol. 52, pp. 141–152.
- Li X., Ma Y. y Feng X. (2013). Self-adaptive autowave pulse-coupled neural network for shortest-path problem, *Neurocomputing*, vol. 115, pp. 63–71.
- Ma, Y., Zhan, K., & Wang, Z. (2011). *Pulse-Coupled Neural Networks. Applications of Pulse-Coupled Neural Networks*, pp. 447-465, Springer Heidelberg Dordrecht London New York.
- Morrison, D. R., Jacobson, S. H., Sauppe, J. J., & Sewell, E. C. (2016). *Branch-and-bound algorithms: A survey of recent*

- advances in searching, branching, and pruning. Discrete Optimization*, 19, pp. 79–102.
- Muresan R. C. (2003) Pattern recognition using pulse-coupled neural networks and discrete Fourier transforms, *Neurocomputing*, vol. 51, pp. 487–493.
- Ortiz E., Mejía-Lavalle M., Sossa H. (2016). Uso de redes neuronales pulsantes para mejorar el filtrado de imágenes contaminadas con ruido Gaussiano, *Research in Computing Science*, Vol 114, pp. 45–58.
- Paredes-Cano J. J., Mejía-Lavalle M., Mújica-Vargas D. y Reyes-Salgado G. (2018). Red Neuronal Pulsante Explicitada para el Problema del Camino más Corto, *IEEE ISBN 978-607-95255-8-3*.
- Qu H., Yi Z. (2007). A new algorithm for finding the shortest paths using PCNNs *Chaos, Solutions Fractals* vol. 33 (4) pp.1220–1229.
- Qu H., Yi Z., & Yang, S. X. (2013). Efficient Shortest-Path-Tree Computation in Network Routing Based on Pulse-Coupled Neural Networks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 43(3), 995–1010. doi:10.1109/tsmcb.2012.2221695.
- Ranganath S. H. y Kuntimad G. (1999). Object detection using pulse coupled neural networks *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 10, n° 3, pp. 615–620.
- Thulasiraman K., Arumugam S., et al. (2016). *Handbook of graph theory combinatorial optimization, and algorithms*. CRC Press.

Comparación de plataformas de desarrollo de agentes conversacionales^{*}

Julio Castañeda Torres^{*} Alberto Iturbe Herrera^{**}
Noé Alejandro Castro-Sánchez^{***}

^{*} Tecnológico Nacional de México / Cenidet, Interior internado
Palmira S/N, Col. Palmira, 62490 Cuernavaca, Morelos, México
(e-mail: juliocastaneda18ce@cenidet.edu.mx).

^{**} (e-mail: iturbe@cenidet.edu.mx)

^{***} (e-mail: ncastro@cenidet.edu.mx)

Resumen: Hoy en día existen distintas plataformas para el desarrollo de agentes conversacionales, las cuales son capaces de crear chatbots con una gran efectividad. Las plataformas de desarrollo cuentan con distintas arquitecturas que tienen diferentes formas de tratar la información, la principal diferencia de estas plataformas es la manera en la que se estructura la conversación, esta estructura puede influir en el flujo de la conversación. Estas herramientas de desarrollo al estar orientadas mayormente al idioma inglés, llegan a presentar algunos problemas cuando los mensajes que reciben contienen errores de ortografía o cuando la petición que se le realizó no se encuentra en la base de conocimiento. Cuando estas situaciones ocurren, los chatbot pueden llegar a responder de forma errónea y en el peor de los casos, no podrán entender lo que se le está pidiendo. En el presente trabajo se realiza una comparación de la plataforma Watson Assistant perteneciente a IBM y Dialogflow desarrollado por Google, con la finalidad de identificar cuál de estas dos plataformas tiene un mejor funcionamiento para el uso en conversaciones donde los errores ortográficos y las peticiones no previstas están involucradas, ambos agentes son probados con la misma conversación, que consta de saludos, despedidas y preguntas de cultura general. Los datos obtenidos de cada plataforma se evalúan mediante las mismas métricas para que de esta manera se pueda comprobar qué agente es más eficaz en el idioma español.

Keywords: Chatbots, Agentes Conversacionales, Watson Assistans, Dialogflow.

1. INTRODUCCIÓN

Los agentes conversacionales también conocidos como chatbots, son programas de computadora que emulan una conversación mediante texto, haciendo creer al usuario que está interactuando con otro ser humano. A. and John (2015) define a estos agentes como: *un software que tiene la habilidad de mantener una conversación con un usuario a través del uso del lenguaje natural*.

La relevancia de los chatbot comienza a raíz de la creación de ALICE (*Artificial Linguistic Internet Computer Entity*) siendo este uno de los primeros agentes en simular una charla real.

Anteriormente, el proceso para desarrollar agentes conversacionales era complicado y laborioso según lo mencionado por AbuShawar and Atwell (2015), debido a que era necesario recolectar diversas conversaciones de prueba,

además de realizar un etiquetado AIML (del inglés *Artificial Intelligence Mark-up Language*), el cual, se componía de patrones y plantillas.

Con la popularización de estos sistemas comenzaron a surgir diversas plataformas dedicadas al desarrollo de los mismos, facilitando en gran medida la creación de un chatbot, ya que solo se requería realizar el entrenamiento necesario para hacerlos funcionar.

Dentro de las plataformas que surgieron, destacan por su gran popularidad *Watson Assistant*, el cual, permite a los desarrolladores de software incorporar la inteligencia artificial ofrecida por IBM al desarrollo de chatbots. *Watson Assistant* utiliza *machine learning* (ML) y comprensión del lenguaje natural (NLU, del inglés *Natural Language Understanding*), los cuales, facilitan la creación de servicios, ya que solo se debe desarrollar la estructura de la conversación y su posterior entrenamiento.

Liu et al. (2019) mencionan que su propósito general es el diseño de asistentes virtuales (chatbots) centrados a un dominio específico y con un alcance predefinido.

^{*} Sponsor and financial support acknowledgment goes here. Paper titles should be written in uppercase and lowercase letters, not all uppercase.

Los asistentes diseñados en *Watson Assistant* pueden conversar y responder preguntas dentro de su dominio con respuestas predefinidas, escritas por el equipo de desarrollo.

Uno de sus principales competidores en la construcción de agentes conversacionales es *Dialogflow* perteneciente a Google, el cual es una plataforma con comprensión de lenguaje natural, interacción humano-computadora y módulos de aprendizaje automático, que facilita el desarrollo de interfaces de conversación basadas en texto y voz, como los son los chatbots y asistentes virtuales. Estas plataformas son algunas de las más usadas para esta tarea.

Actualmente, la mayoría de los chatbot que se desarrollan están siendo enfocados al área del comercio, funcionando de una manera informativa a preguntas y dudas triviales. Estos agentes llegan a presentar problemas cuando se les hacen preguntas muy concretas, cuando el entrenamiento no se realizó de la manera adecuada, cuando el mensaje contiene faltas de ortografía o preguntas que no se encuentran en la base de conocimiento del agente.

Para el desarrollo de este trabajo se entrenaron dos conversaciones idénticas, adaptadas a las plataformas mencionadas anteriormente, para que de ese modo los dos agentes cuenten con la misma base de conocimiento. La conversación con la cual se entrenaron ambos agentes está compuesta por un diálogo formal, la cual, contiene saludos y preguntas.

Las pruebas consistieron en realizar las preguntas a los agentes de manera informal, conservando el mismo significado que las formales, únicamente redactadas de distinta forma. De este modo se podrá conocer cuál de las dos plataformas presenta un mejor nivel de entendimiento y generalización a las variaciones que puede presentar una misma oración.

2. CASO DE ESTUDIO

Para este caso de estudio, se desarrollaron dos chatbots, uno en la plataforma de *Watson Assistant* y otro en *Dialogflow*, ambos con la misma temática orientada al idioma español. Estos agentes fueron entrenados con la misma conversación y las mismas respuestas para lograr una igualdad a la hora de obtener respuestas de estos.

Se evaluará cuál de las dos plataformas presenta un mejor desempeño en el idioma español, utilizando palabras con faltas de ortografía, así como paráfrasis en oraciones, con la finalidad de conocer cuál de los dos agentes tiene un mejor nivel de generalización y entendimiento.

El nivel de generalización y entendimiento se define como la capacidad de entender las oraciones que se reciben por parte del usuario, normalmente si alguna de estas oraciones de entrada no se encuentra en la base de conocimiento del chatbot, este no es capaz de proporcionar una respuesta acorde a lo solicitado.

Las plataformas antes mencionadas de acuerdo con el trabajo de Di Prospero et al. (2017) cuentan con módulos de clasificación y reconocimiento basados en ML, los cuales, hasta cierto punto son capaces de atenuar este problema a la hora de proporcionar una respuesta a la petición del usuario.

De este modo, a través de una prueba de confusión que consiste en realizar diversas peticiones que están relacionadas con la base de conocimiento, así como entradas las cuales no están contempladas, se busca conocer cuál de las dos plataformas puede lidiar y tener una mejor adaptación a preguntas que no conoce.

3. CARACTERÍSTICAS DE LAS PLATAFORMAS

3.1 *Dialogflow*

Singh et al. (2019) define a los agentes desarrollados en *Dialogflow* como módulos de comprensión del lenguaje natural (NLU). Singh et al. (2019) también destaca la importancia de considerar el esquema de funcionamiento: **la acción** que indique la interacción mediante los llamados del usuario; **la conversación** que se produce luego de que el usuario interactúa con el agente conversacional en cuestión; **el motor de inteligencia artificial (IA)** que se encarga de responder al usuario y mantener una conversación mediante algoritmos de procesamiento del lenguaje natural.

Componentes

Intents: se componen de frases de entrenamiento las cuáles pueden ser oraciones que el usuario pueda utilizar, las acciones y parámetros que es donde se extrae información relevante de las declaraciones del usuario y, por último, la respuesta, que es una declaración que se dice o que se muestra al usuario.

Entidades: son mecanismos que sirven para identificar y extraer datos útiles de las entradas de lenguaje natural, las entidades se usan para seleccionar información específica que menciona el usuario, desde direcciones a nombres de productos o cantidades con unidades.

Contexts: representan el estado actual de la solicitud de un usuario y permiten que el agente lleve información de un intent a otro.

3.2 *Watson Assistant*

Watson es un sistema de IA completo, en el cual se disponen de distintos componentes para cada necesidad específica. En el trabajo de Telang et al. (2018), mencionan que la arquitectura de Watson está basada en lo que IBM define como “*evidencia probabilística masivamente paralela*” o *DEEPQA*, en la cual se utilizan más de 100 técnicas diferentes para analizar el lenguaje natural. De este sistema destacan los siguientes puntos: el paralelismo masivo, expertos en áreas, valoración de confianza

dominante y la integración de conocimiento superficial y profundo.

Componentes

Intents: una intención es el objetivo final del usuario detrás de cada uno de sus mensajes. Es la acción que el usuario quiere comunicar.

Examples: son oraciones introducidas por el equipo de desarrollo como ejemplos de posibles entradas de texto por parte del usuario, las cuales el asistente debe reconocer como la intención en cuestión.

Entities: son palabras específicas que le dan a una oración un significado distintivo o especial. Con frecuencia son sujetos o el objetivo de la acción y tienden a ser sustantivos. Dialogo: es un conjunto de nodos (agrupados como un árbol ramificado múltiple) que representan todas las etapas posibles de una conversación entre el usuario y el asistente.

4. MÉTRICAS

En esta sección se describen las métricas utilizadas para evaluar este trabajo: prueba cualitativa y prueba de confusión. Descritas a detalle a continuación.

4.1 Prueba cualitativa

Las pruebas cualitativas según explica Shawar and Atwell (2007), se toman en cuenta las ventajas, características y mejoras que ofrecen las plataformas a la hora de ser utilizadas. Para motivos de la prueba se tomarán en cuenta las versiones gratuitas que ofrecen ambos servicios las cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características de las plataformas

	Planes	Canales
Watson Assistant	10,000 mensajes / mes 5 habilidades 100 nodos de diálogo	Texto y voz
Dialogflow	Mensajes ilimitado Diálogos ilimitados	Texto y voz

La tabla 2 muestra características generales de comprensión del lenguaje natural (NLU), utilizadas en la clasificación y reconocimiento de entidades además del reconocimiento basado en diccionarios.

Tabla 2. Comparación de características de clasificación y reconocimiento NLU

	Dialogflow	Watson Assistant
Intenciones basado en ML	Si	Si
Entidades basado en ML	No	Si
Entidades basado en diccionarios	Diccionario + expansión automática	Si
Diálogo basado en ML	Solo para preguntas y respuestas	No

4.2 Prueba de confusión

Esta prueba según explica Radziwill and Benton (2017) consiste en repetir una serie de preguntas en ambos motores de NLP, para poder medir su grado de asertividad al ser consultados con peticiones que contienen errores de ortográficos o frases parafraseadas, de esta manera se busca simular una situación real donde distintos tipos de personas interactúan con este tipo de agentes.

Para llevar a cabo esta prueba se realizaron la misma cantidad de preguntas de manera “incorrecta”, es decir, utilizando paráfrasis e introduciendo errores de ortografía, de esta manera se espera probar el comportamiento de ambos agentes al ser sometidos a preguntas que no conocen o no están dentro de la base de conocimiento, y evaluar si es capaz de entender el contexto detrás de las palabras (capacidad de generalización).

En la tabla 3 se muestran las peticiones que le realizaron al agente desarrollado en Dialogflow, así como la posible entrada a la que se refería el usuario y la respuesta proporcionada por el agente.

Tabla 3. Prueba de confusión con Dialogflow

Entrada del usuario	Entrada esperada	Respuesta del agente
Ola	Hola	Hola, buen día
Buenas	Buenas tardes/días	Hola, ¡bienvenido!
Qué onda	Hola/saludo	No entiendo
Que gusto de verte wey	Que gusto de verlo	Hola, ¡bienvenido!
Tanto tiempo sin verte	Saludo	No entiendo
Qué hay	Saludo	¿Cómo?
Holi	Hola	No he entendido a que te refieres.

En la tabla 4 muestra las peticiones que se realizaron a Watson Assistant, ambos agentes fueron entrenados con la misma base de conocimiento. Las peticiones que se presentan son las mismas que se le realizaron al agente de Google, para de este modo llevar a cabo una comparación.

Tabla 4. Prueba de confusión con Watson Assistant

Entrada del usuario	Entrada esperada	Respuesta del agente
Ola	Hola	No entendí el significado
Buenas	Buenas tardes/días	Hola, ¡bienvenido!
Qué onda	Hola/saludo	No entiendo
Que gusto de verte wey	Que gusto de verlo	Hola, buen día!
Tanto tiempo sin verte	Saludo	No entiendo
Qué hay	Saludo	Hola, bienvenido
Holi	Hola	No entendí el significado.

La tabla 5 muestra los mensajes de despedida realizados por los usuarios a la plataforma de Dialogflow. Estos mensajes se realizaron a ambas plataformas para conocer cual de las dos detectaba mejora la petición.

Tabla 5. Prueba de confusión con Dialogflow

Entrada del usuario	Entrada esperada	Respuesta del agente
Nos vemos	Despedida	¿Podrías repetirlo, por favor?
Me voy	Me tengo que retirar	Vuelve pronto
Ay luego	Hasta luego	Adiós
Ahí luego	Hasta luego	Nos vemos
Hay luego	Hasta luego	¿Podrías repetirlo, por favor?

En la tabla 6 se visualiza los mensajes de despedida a la plataforma Watson. En estos mensajes se puede apreciar

que el agente Watson fue capaz de encontrar una intención en cada en cada mensaje, sin embargo, confundió uno de los mensajes son un saludo, a pesar de que este se refería a una despedida.

Tabla 6. Prueba de confusión con Watson Assistant

Entrada del usuario	Entrada esperada	Respuesta del agente
Nos vemos	Despedida	Vuelve pronto
Me voy	Me tengo que retirar	Vuelve pronto
Ay luego	Hasta luego	Adiós
Ahí luego	Hasta luego	Adiós
Hay luego	Hasta luego	Hola, ¡bienvenido!

En esta sección se realizaron oraciones, a las cuáles se le agregaron errores ortográficos y algunas oraciones fueron parafraseadas con la finalidad de conocer cuál de los dos agentes puede lidiar mejor con este problema e interpretar mejor la oración. Los mensajes respondidos por Watson Assistant se encuentran en la tabla 7.

Tabla 7. Prueba con oraciones a Watson

Entrada del usuario	Entrada esperada	Respuesta del agente
¿Quién inventó el telescopio?	¿Quién inventó el telescopio?	No lo he entendido
La ciudad con más gente del mundo es?	Ciudad más poblada del mundo	Tokio
¿Quiénes escribieron el libro la odisea?	¿Quién escribió "la Odisea"?	Homero
¿Qué artista creó "la última cena"?	¿Quién pintó "la última cena"?	Leonardo da Vinci
¿Cuál es el océano más grande?	¿Cuál es el océano más grande?	El océano pacífico
¿De qué escritor es Hamlet?	¿Quién escribió "Hamlet"?	William Shakespeare
¿Qué es la energía nuclear?	definición de energía nuclear	Es energía contenida
¿Quién descubrió la penicilina?	¿Qué persona halló la penicilina?	Hola, ¡bienvenido!
Cual el nombre de la capital de Suecia	Capital de Suecia	Estocolmo
¿Cuál es la capital de México?	Capital de México	No lo he entendido

Las mismas oraciones aplicadas a Watson Assistant, se realizaron a la plataforma de Dialogflow para comprobar si existía alguna diferencia en la manera de interpretar dichas oraciones. Las respuestas proporcionadas por el agente Google se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Prueba con oraciones a Dialogflow

Entrada del usuario	Entrada esperada	Respuesta del agente
¿Quién inventó el telescopio?	¿Quién inventó el telescopio?	Juan Roget
La ciudad con más gente del mundo es?	Ciudad más poblada del mundo	Tokio
¿Quiénes escribieron el libro la odisea?	¿Quién escribió "la Odisea"?	Homero
¿Qué artista creó "la última cena"?	¿Quién pintó "la última cena"?	¿Disculpa?
¿Cuál es el océano más grande?	¿Cuál es el océano más grande?	El océano pacífico
¿De qué escritor es Hamlet?	¿Quién escribió "Hamlet"?	William Shakespeare
¿Qué es la energía nuclear?	definición de energía nuclear	No entiendo
¿Quién descubrió la penicilina?	¿Qué persona halló la penicilina?	No entiendo
Cual el nombre de la capital de Suecia	Capital de Suecia	Estocolmo
¿Cuál es la capital de México?	Capital de México	CDMX

5. RESULTADOS

Con las pruebas realizadas a ambas plataformas se obtuvieron la cantidad de mensajes que clasificaron y respondieron correctamente los agentes, los resultados obtenidos se ven reflejados en la tabla 9.

A continuación, se explica la función que tiene cada etiqueta utilizada dentro de las tablas de resultados.

R. Correcto: corresponde a los mensajes se respondieron de manera adecuado, es decir que se respondió lo que el usuario quería saber.

R. Incorrecta: esta etiqueta hace referencia a las preguntas que el agente respondió, pero no era lo que el usuario estaba solicitando.

No detectada: engloba a los mensajes que el agente no fue capaz de responder y por lo tanto no tuvo una respuesta para el usuario.

N/A: quiere decir que ninguna de las acciones anteriores es aplicable a la entrada del usuario.

Tabla 9. Resultados de la prueba de confusión

Plataforma	R. Correcto	R. incorrecta	No detectada
Dialogflow	13	N/A	9
Watson Assistant	14	2	6

El agente de Google obtuvo un total de **40.91 %** de margen de error al momento de detectar el tipo de intención que contenía cada frase, registró un total de **59.09 %** de mensaje respondidos correctamente.

El agente de Watson Assistant obtuvo un total de **63.64 %** de mensajes respondidos correctamente, un **9.09 %** donde el agente respondió de manera errónea a las peticiones realizadas, y finalmente **27.27 %** en los cuales no fue capaz de detectar alguna intención. En la imagen se puede apreciar gráficamente los resultados obtenidos de ambas plataformas. La representación gráfica de los resultados se encuentra en la figura 1.

Dialogflow presentó mayor cantidad de errores en los mensajes de bienvenida, fallando en un **57.14 %** con un **42.86 %** de aciertos.

En la prueba correspondiente a mensajes de bienvenida, **Watson** fue capaz de contestar correctamente a **42.85 %** de los mensajes, no pudo detectar el **57.14 %** de las intenciones contenidas dentro de los mensajes. Ambos agentes obtuvieron el mismo porcentaje en esta prueba, el total de mensajes recibidos por cada agente se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados de la prueba de "Bienvenida"

Plataforma	R. Correcto	R. incorrecta	No detectada
Dialogflow	3	N/A	4
Watson Assistant	3	N/A	4

Para la prueba con mensajes de despedida, el agente de Dialogflow, logró obtener un porcentaje de **60 %** de mensajes respondidos de forma correcta, ante un **40 %** de mensajes no detectados. En la tabla 11 se aprecia los mensajes que respondieron ambos chatbots.

El agente de IBM, logró obtener **80 %** de aciertos y un **20 %** donde confundió la petición y respondió de forma errónea. El chatbot fue capaz de detectar una intención por cada mensaje, por ese motivo no se registraron mensajes "No detectada".

Tabla 11. Resultados de la prueba de "Despedida"

Plataforma	R. Correcto	R. incorrecta	No detectada
Dialogflow	3	N/A	2
Watson Assistant	4	1	N/A

En la prueba realizada con oraciones y faltas de ortografía, el agente de Google obtuvo un **70 %** de respuestas correctas, con un **30 %** de mensajes no identificados, debido a la paráfrasis y errores ortográficos contenidos en las oraciones.

Los resultados de Watson, correspondientes a la prueba de oraciones se ven reflejados en la tabla 12, muestran un **70 %** de mensajes respondidos de manera correcta, un **10 %** de los mensajes se respondió de una manera equivocada, en el **20 %** de las peticiones no se pudo detectar intención alguna.

Tabla 12. Resultados de la prueba de oraciones

Plataforma	R. Correcto	R. incorrecta	No detectada
Dialogflow	7	N/A	3
Watson Assistant	7	1	2

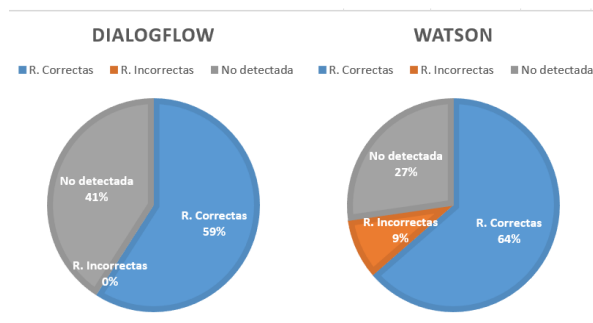


Figura 1. Diagrama de clasificación de género y numero gramatical

6. CONCLUSIÓN

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que Watson Assistant presenta una mejor respuesta ante peticiones que no se encuentran en su base de conocimiento. Dialogflow muestra un mejor comportamiento ante las faltas de ortografía debido a que utiliza diccionarios para solventar esa deficiencia.

Conociendo los dos puntos de vista obtenidos, es más confiables utilizar Watson Assistant, sobre todo en proyectos grandes, a pesar de eso Dialogflow puede funcionar de una manera adecuada al momento de la generalización y entendimiento si se le realiza el entrenamiento adecuado.

Es de suma importancia contar con variantes de diversas entradas ya que una oración se puede realizar de diferentes maneras, es complicado poder anticipar cuáles serán las variantes que utilizarán los usuarios al momento de interactuar.

Otro punto a considerar es la parte de la estructura de la conversación ya que por más frases de entrenamiento que se tengan, el correcto funcionamiento dependerá de la estructura que se determinó para la conversación, ya que, si no se realizan estos puntos de la manera correcta, el chatbot no será capaz de funcionar correctamente.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado parcialmente por el gobierno de México (beca CONACYT, SNI, TecNM 7346.19-P).

REFERENCIAS

- A., S. and John, D. (2015). Survey on chatbot design techniques in speech conversation systems. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 6. doi:10.14569/IJACSA.2015.060712.
- AbuShawar, B. and Atwell, E. (2015). ALICE Chatbot: Trials and Outputs. *Computación y Sistemas*, 19, 625 – 632.
- Di Prospero, A., Norouzi, N., Fokaefs, M., and Litoiu, M. (2017). Chatbots as assistants: An architectural framework. In *Proceedings of the 27th Annual International Conference on Computer Science and Software Engineering*, CASCON '17, 76–86. IBM Corp., Riverton, NJ, USA.
- Liu, X., Eshghi, A., Swietojanski, P., and Rieser, V. (2019). Benchmarking natural language understanding services for building conversational agents. *ArXiv*, abs/1903.05566.
- Radziwill, N.M. and Benton, M.C. (2017). Evaluating quality of chatbots and intelligent conversational agents. *CoRR*, abs/1704.04579.
- Shawar, B.A. and Atwell, E. (2007). Different measurements metrics to evaluate a chatbot system. In *Proceedings of the Workshop on Bridging the Gap: Academic and Industrial Research in Dialog Technologies*, NAACL-HLT-Dialog '07, 89–96. Association for Computational Linguistics, Stroudsburg, PA, USA.
- Singh, A., Ramasubramanian, K., and Shivam, S. (2019). *Introduction to Microsoft Bot, RASA, and Google Dialogflow*, 281–302. International Computer Science and Applications. doi:10.1007/978-1-4842-5034-1_7.
- Telang, P.R., Kalia, A.K., Vukovic, M., Pandita, R., and Singh, M.P. (2018). A conceptual framework for engineering chatbots. *IEEE Internet Computing*, 22(6), 54–59. doi:10.1109/MIC.2018.2877827.

Bioinformatic tools to predict protein structure of GPN proteins family

J. Juárez*. M.R. Guevara-Villa**. J. Newton***
F. Rojas*. K. Alatríste*. M. Martínez*.

*Universidad Politécnica Metropolitana de Puebla, Mexico
(e-mail: {jorge.jaime, franco.rojas}@metropoli.edu.mx; {ing.kiichi, mayabio308}@gmail.com)}

**Universidad Politécnica de Puebla, México
(e-mail: maria.guevara495@uppuebla.edu.mx)

*** Cornell University, USA, (e-mail: jmn38@cornell.edu)}

Abstract: We obtain the sequence of the GPN2 protein of the data bank and was used in the protein structure prediction server version 3 to obtain the possible structure of the unknown protein. After that we had use Pymol software to model the structure and identify the possible 3D conformation and finally with VISANT software we found the protein relation with GPN2 protein.

Keywords: protein structure prediction server, Pymol, visant, protein, GPN

1. INTRODUCTION

RNA polymerase II is the responsible of gene transcription that coding proteins into the DNA of the cellular nuclei, it has been studied [1] but its biogenesis is unknown [2]. The GPN proteins family is involved in that process [3-7]. Phylogenetical studies have found GPN2 in archea and is conserved in all cells ([8], [9], [10]) with unknown function ([11], [12]). The GPN protein has all motifs of the GTPases ([13]). Bioinformatic studies has found the GPN proteins family in the same interactions involved in the same metabolic route ([14]). The GPN proteins family have been found as subunits of RNA polymerase II and in the cellular division ([3], [8], [15], [16], [17], [18]). In this paper we shown how to used a protein structure prediction server and Pymol to model protein structure of the GPN proteins family with unknown structure and VISANT to know the protein interaction inside the cell ([19]).

2. METHODOLOGY

A. Template of GPN proteins family.

The sequence of the GPN proteins family was obtained in FASTA format of the UniprotKB data base, in this server we can get the templates of the genetic sequence from the name of the proteins. These templates were introduced into server predictor Protein Structure Prediction Software PS2 version 3.0 ([21], [22]) and we got a text file in PSE and PDB format with the information about of the molecular representation.

B Molecular modelling of GPN proteins family.

The template of the GPN proteins were used to create a 3D model structure of the proteins with PYMOL software and it can be used to known possible interactions between other proteins.

C Protein relationship with VISANT

VISANT software ([25], [26]) was used to look forward the interaction between GPN proteins family with other proteins included in the data base, besides VISANT can visualize the kind of experiments between the proteins probed.

3. RESULTS AND DISCUSSION

GPN1 protein crystal of *Pyrococcus abyssi* is the only structure known and has dimer form ([13]) and not in monomer form. We put the sequences of the GPN proteins family in the Protein Structure Prediction Server version 3.0 ([19]) and obtained the templates of the text files in PDB format, the server give us the information about the percentage protein similarity with other proteins like shown in figure 1 for GPN1, figure 2 for GPN2 and figure 3 for GPN3.

The figure 1 shown that GPN1 is the most weight protein of the three and more similar to 1yrbB protein in PSI-BLAST and IMPALA analysis. The server put the best template to 2qm8A that is a chaperone protein of *Methylobacterium extorquens*, ([28]).

Meanwhile the GPN2 and GPN3 had a great coincidence with 22 and 23 percent with the GPN of *Pyrococcus abyssi* with the template 1yrbB corresponding to archaea. This protein is a GTPase in dimer form ([13]). This similarity is probably due to the length of the protein for a better coincidence. GPN1 has 374, 1yrbB has 262, GPN2 has 310 and GPN3 has 284 amino acids, almost the same number or amino acid than archaea. This can explain his scores, GPN3 has the best score with 228 than GPN2 (225) or GPN1 (189). For that, we believe that the protein size is the most important parameter for the prediction of the structure of the proteins and is corroborate with error calculus by the servers where the worst error was for the GPN1 with 6x10-49 instead of GPN2 with 1x10-59 and GPN3 with 6x10-60.

(PS) ² : Protein Structure Prediction Server				
Structure Template(s)				
Automatic selected template				
Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
☒ 2qm8A	16	52	3e-07	alignment
From PSI-BLAST				
Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
☐ 1yrbB	27	189	6e-49	alignment
☐ 1g7sA	20	85	2e-17	alignment
☐ 1ionA	17	50	5e-07	alignment
☐ 1g3qA	18	50	7e-07	alignment
☐ 2p67A	33	42	1e-04	alignment
☐ 1skqA	17	42	2e-04	alignment
☐ 1wb1C	21	42	2e-04	alignment
☐ 1wb1B	21	41	3e-04	alignment
☐ 1f60A	15	41	3e-04	alignment
☐ 1vmaA	29	41	4e-04	alignment
From IMPALA				
Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
☐ 1yrbB	25	247	4e-66	alignment
☐ 2npiA	13	150	5e-37	alignment
☐ 1mkyA	18	52	2e-07	alignment
☐ 2qm8A	16	52	3e-07	alignment
☐ 2qu6A	14	46	1e-05	alignment
☐ 2e67A	15	46	2e-05	alignment
☐ 1egaB	17	43	1e-04	alignment
☐ 2h6B	13	43	1e-04	alignment
☐ 2h9A	13	43	1e-04	alignment
☐ 1z01I	22	43	1e-04	alignment

Figure 1. Information of GPN1 protein obtained from (PS)2-v3 Protein Structure Prediction Server ([19])

However, although the GPN proteins family were evolving of common ancestor of archaea, the best coincidence with was for GPN1 with 27 percent, maybe because is the same protein in different species.

The templates were studied with Pymol software ([23], [24]), the proteins model structure are showed in figures 4, 5 and 6. the structure were similar to GPN of *Pyrococcus abyssi* with a

fold structure of Rossman type, this mean that the proteins are composed alternating alpha helix and beta sheets. The structure that server cannot make prediction because it cannot be a coincidence in the data base were coloured in green.

(PS) ² : Protein Structure Prediction Server				
Structure Template(s)				
Automatic selected template				
Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
☒ 1yrbB	23	225	1e-59	alignment
From PSI-BLAST				
Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
☐ 1yrbB	22	187	2e-48	alignment
☐ 2p67A	22	42	1e-04	alignment
☐ 1g7sA	16	42	2e-04	alignment
☐ 2qm8A	44	40	3e-04	alignment
☐ 1wcv1	46	40	4e-04	alignment
☐ 1vmaA	33	39	8e-04	alignment
☐ 1hr6B	23	39	8e-04	alignment
☐ 1ionA	26	39	0.001	alignment
☐ 1ihuA	33	38	0.002	alignment
☐ 2ewwA	21	38	0.002	alignment
From IMPALA				
Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
☐ 1yrbB	23	225	1e-59	alignment
☐ 2npiA	11	137	3e-33	alignment
☐ 1xjcA	31	44	5e-05	alignment
☐ 2qm8A	30	44	5e-05	alignment
☐ 1wcv1	26	44	8e-05	alignment
☐ 2ozeA	15	43	8e-05	alignment
☐ 3c8uA	41	43	9e-05	alignment
☐ 1rz3A	38	42	2e-04	alignment
☐ 2ft1A	48	42	3e-04	alignment
☐ 1ionA	26	41	3e-04	alignment

Figure 2. Information of GPN2 protein obtained from (PS)2-v3 Protein Structure Prediction Server ([19])

At less 25 percent were predicted with the server, so in the pymol modelling we found that the server only had a poor structure predicted, the worst model was the GPN1 protein. The unknown structure coloured in green we hope that missed parts has a Rossman type.

The GPN2 and GPN3 have 5 beta sheets, instead the GPN1 only has 2 but with less size, comparing between the three proteins we are sure that the most no predicted structure (in our model has a green colour) the GPN2 has a beta sheet form. The server can predict the most of alpha helix of all three proteins like shown in the figures 4, 5 and 6.

These models with pymol software shown that GPN2 and GPN3 are very similar and the server could predict almost the all structures.

(PS)²: Protein Structure Prediction Server

Structure Template(s)

Automatic selected template

Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
☒ 1yrbB	23	226	6e-60	alignment

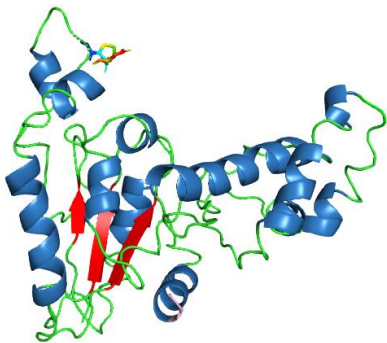
From PSI-BLAST

Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
☐ 1yrbB	23	192	5e-50	alignment
☐ 1g3qA	20	47	4e-06	alignment
☐ 1ionA	21	46	8e-06	alignment
☐ 2afhE	27	42	8e-05	alignment
☐ 2p67A	29	41	2e-04	alignment
☐ 1hn5B	30	40	4e-04	alignment
☐ 1g7sA	16	40	4e-04	alignment
☐ 1cp2A	19	39	6e-04	alignment
☐ 1wcv1	34	39	8e-04	alignment
☐ 2qm8A	32	39	0.001	alignment

From IMPALA

Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
☐ 1yrbB	23	226	6e-60	alignment
☐ 2npiA	11	144	2e-35	alignment
☐ 2e87A	14	44	3e-05	alignment
☐ 1ihuA	9	43	1e-04	alignment
☐ 1wcv1	22	37	0.008	alignment

Figure 3. Information of GPN3 protein obtained from (PS)2-v3



Protein Structure Prediction Server ([19])

Figure 4. Structure predicted for the GPN1 modelling with Pymol software

GPN1 has the unknown structure, maybe because phylogenetic studies shown that had a common ancestor from archaea ([8], [9], [10]) and the proteins were conserved in all eukaryotic cells, so we suppose that the evolution made many changes into structure of GPN1 but no many differences in GPN2 and GPN3 this is possible because GPN2 and GPN3 are complementary to GPN1 and maybe the function of these proteins is no so important like the GPN1 and this is the principal protein for

metabolism of the cell because if GPN1 is not expressed then the cell died.

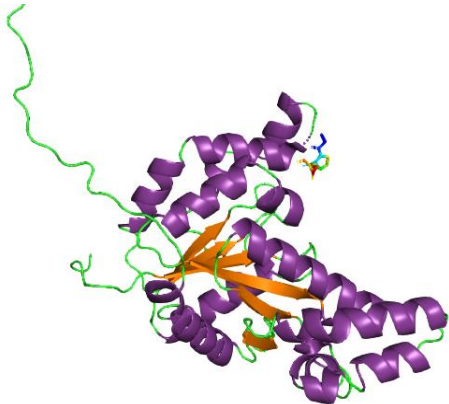


Figure 5. Structure predicted for the GPN2 modelling with Pymol software

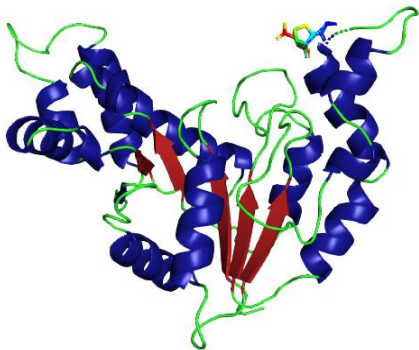


Figure 6. Structure predicted for the GPN3 modelling with Pymol software

We use the VISANT software to obtain a representation in a graph of the GPN proteins family interactions with other proteins reported in this data base (figure 7) and the proteins involved in the RNA polymerase II biogenesis (figure 8). GPN proteins have been found in the RNA polymerase II biogenesis, these proteins have unknown function and are essentials for the live cell. If these proteins are not expressed then the cell died. The software shown that GPN1 has 10 proteins interactions with GPN2 and 4 proteins with GPN3. GPN2 has 5 protein interaction with GPN3, and the three has interaction with one (figure 8). Eight proteins belong to RNA polymerase II biogenesis that interact with the family of GPN proteins. This interaction had not function demonstrated yet.

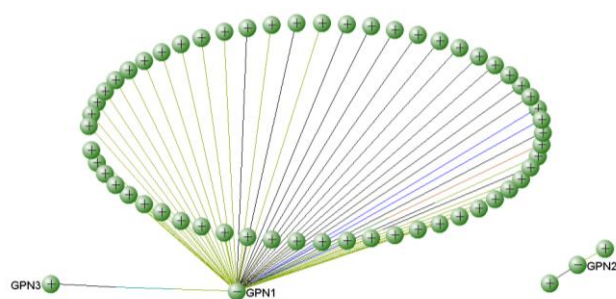


Figure 7. Graph about representation of GPN proteins interaction reported in data base VISANT

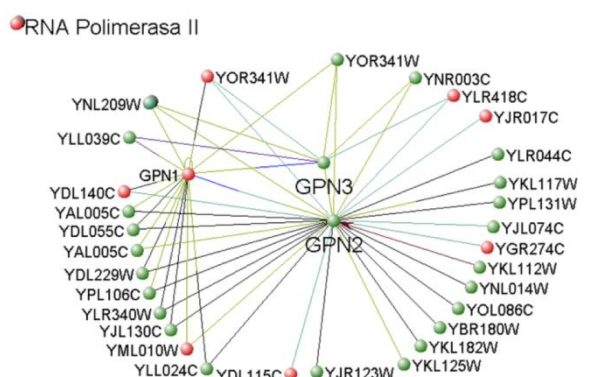


Figure 8. Graph about representation of GPN proteins interaction that belongs to RNA polymerase II biogenesis.

4. Conclusions

We studied the interaction between the proteins of the family GPN-Loop GTPases, these proteins are of unknown function and if they do not expressed then the cellular division stops and the cell died.

Actually, do not exist the structure known of this protein, we take the sequence of the three proteins and search the first prediction using Protein Structure Prediction Server version 3. This has made a best similitude with 1yrbB belong to archaea *Pyrococcus abyssi* with an error of 6×10^{-49} for GPN1, 1×10^{-59} for GPN2 and 6×10^{-60} for GPN3.

The data obtained with the server were studied with pymol software to predict the structure. GPN1 only could predict two beta-sheets of seven that had the GPN1 obtained experimentally and only four of seven alpha-helix. Another hand, GPN2 and GPN3 predicted five of seven beta-sheets and GPN2 had four alpha-helix but GPN3 had five of seven. The server could have the best prediction for GPN3.

VISANT software could give us the information about the other protein involved or that interact with the GPN-Loop proteins family and the most are of the RNA polymerase II biogenesis.

The server cannot predict all the structure of the proteins because experimentally does not exist in the data base.

This analysed can be used to understand the protein structure and interactions with other proteins to predict possible functions in metabolic pathway.

5. REFERENCES

- [1] P. Cramer, S. Baumli, S. Benkert, F. Brueckner, C. Buchen, G. E. Damsma, S. Dengl, S. R. Geiger, A. J. Jasiak, A. Jaehari, S. Jennebach, T. Kamenski, H. Kettenberg, C. D. Kuhn, E. Lehmann, K. Leike, J. F. Sydow, A. Vannini, "Structure of eukaryotic RNA polymerases". *Annu Rev Biophys*, 2008. 37: p. 337-352.
- [2] J. Niesser, D. Kostrewa, W. Mühlbacher, P. Cramer, "Structure of GPN-Loop GTPase Npa3 and implications for RNA polymerase II assembly". *Molecular and Cellular Biology*, 2016 (36): p. 820-831.
- [3] D. Forget, P. Cloutier, R. Al-Khoury, A. Bouchard, M. Lavallée-Adam, et al., "The protein interaction network of the human transcription machinery reveals a role for the conserved GTPase RPAP4/hGPN1 and microtubule assembly in nuclear import and biogenesis of RNA polymerase II". *Mol. Cell. Proteomics*, 2010 (12): p. 2827-39.
- [4] M. R. Calera, M. G. Araiza-Villanueva, C. A. Moreno-Aguilar, S. G. Peña-Gómez, F. Castellanos-Terán, et al., "Parcs/hGPN3 is required for the nuclear accumulation of RNA polymerase II". *Biochimica et Biophysica Acta*, 2011 (1813): p. 1708-16.
- [5] R. Sánchez-Olea, O. Barreto O, Q. Yang, X. Chi-jie, H. Zhu, et al., "Parcs Is a Dual Regulator of Cell Proliferation and Apaf-1 Function". *J. Biol. Chem*, 2008 (283): p. 24400-405.
- [6] S. Boulon S, C. Verheggen, D. Molle, S. Boireau, M. Georgieva, K. Azzag, M. C. Robert, Y. Ahmad, H. Neel, A. I. Lamond, E. Bertrand, "HSP90 and its R2TP/Prefoldin-like cochaperone are involved in the cytoplasmic assembly of RNA polymerase II". *Mol. Cell*, 2010 (6): p. 912-924.
- [7] J. Niesser, N., "Structure and function of the GPN-loop GTPase Npa3 and implications for RNA polymerase II biogenesis", in Fakultät für chemie und pharmazie der Ludwig-Maximilians-Universität München. 2015, Universität München: Germany.

- [8] B. Alonso, S. Meguellati, S. W. Chen, J. L. Pellequer, J. Armengaud, et al., "Eukaryotic hGPN-loop GTPases paralogs use a dimeric assembly reminiscent of archaeal hGPN". *Cell cycle*, 2013 (3): p. 463-472.
- [9] O. Matte-Tailliez, P. Forterre, "Mining archaeal proteomes for eukaryotic proteins with novel functions: the PACE case". *Trends Genet.*, 2000 (16): p. 533-36.
- [10] S" Lahmy, A. C. Schmit, G. Pelletier, M. E. Chaboute, M. Devi, "QQT proteins colocalize with microtubules and are essential for early embryo development in Arabidopsis", *The Plant Journal*, 2007 (50): p. 615-26.
- [11] G. Giaever, L. Ni, C. Connely, L. Riles, S. Véronneau, et al., "Functional profiling of the *Saccharomyces cerevisiae* genome". *Nature*, 2002 (418): p. 387-91.
- [12] K. Tarasov, C. R. Landry, S. Radinovic, Serna Molina MM, Shames I, et al., An in Vivo Map of the Yeast Protein Interactome. *Science*, 2008 (320): p. 1465-70.
- [13] S. Gras, B. Fernandez, P. Carpentier, F. Charrier-Savournin, S. Schmitt S, et al., "Structural insights into a new homodimeric self-activated GTPase family". *EMBO reports*, 2007 (8): p. 569-575.
- [14] B. Alonso, J. Armengaud, C. Godon, "A role for GPN-Loop GTPase yGPN1 in sister chromatid cohesion". *Cell Cycle*, 2011 (11): p. 1828-1837.
- [15] E. Moyroud, F. Ott, L. Yant, D. Posé, M. Monniaux, et al., "Prediction of regulatory interactions from genome sequences using a biophysical model for the Arabidopsis LEAFY transcription factor". *Plant Cell*, 2011 (23): p. 1293-1306.
- [16] S. Ben-Aroya, T. Kwok, K. A. O'Donnell, J. D. Boeke, P. Hieter, "Toward a comprehensive temperature-sensitive mutant repository of the essential genes of *Saccharomyces cerevisiae*". *Mol. Cell.*, 2008(30): p. 248-258.
- [17] C. Jeronimo, A. Bouchard, Q. Li, G. Chua, C. Poitras, et al., "Systematic Analysis of the Protein Interaction Network for the Human Transcription Machinery Reveals the Identity of the 7SK Capping Enzyme". *Mol. Cell.*, 2007 (27): p. 262-274.
- [18] S. W. Minaker, W. Ben-Aroya, P. Hieter, P. C. Stirling, "Biogenesis of RNA Polymerases II and III Requires the Conserved GPN Small GTPases in *Saccharomyces cerevisiae*". *Genetics*, 2013 (193): p. 853-864.
- [19] H. Tsun-Tsao, C. Chu-Huang, C. Chih-Sheng, L. Chi-Wen, C. Chih-Chieh, "(PS)2: protein structure prediction server versión 3,0". *Nucleic Acids Research*, 2015 (43): p. 338-342.
- [20] Z. lab, z. "What is FASTA format?" [cited 2018 23/july]; Available from: <https://zhanglab.ccmb.med.umich.edu/FASTA/>.
- [21] C. C. Chen, J. M. Yang, "(PS)2: protein structure prediction server", in *NAR*. 2006. p. W152-W157.
- [22] C. C. Chen, J. M. Yang, "(PS)2-v2: template-based protein structure prediction server. *BMC Bioinformatics*", 2009 (10): p. 366.
- [23] S. Pirhadi, D. R. Koes, "Open Source molecular modeling". *J Mol Graph model*, 2016 (69): p. 127-143.
- [24] E. H. Baugh, B. D. Weitzner, J. J. Gray, "Real-Time PyMOL Visualization for Rosetta and PyRosetta", *PLoS ONE*, 2011 (8): p. e21931.
- [25] Z. Hu Z, J. Wu, C. DeLisi, "VisANT: an online visualization and analysis tool for biological interaction data", *BMC Bioinformatics*, 2004 (17): p. 1-8.
- [26] Z. Hu, C. DeLisi, "VisANT: an integrative framework for networks in systems biology", *Brief Bioinform*, 2008 (4): p. 317-325.
- [27] R. González-González, G. R. Cristóbal-Mondrago, S. G Peña-Gómez, G. M. Montero-Mora, S. Lara-González, A. Hernández-Arana, D. A. Fernández-Velasco, M. R. Calera, R. Sánchez-Olea, "Human Gpn1 purified from bacteria binds guanine nucleotides and hydrolyzes GTP as a protein dimer stabilized by its C-terminal tail". *Protein Expression and Purification*, 2017 (132): p. 85-96.
- [28] P. A. Hubbard, T. Labunska, "Crystal structure and mutagenesis of the metallochaperone MeaB: insight into the causes of methylmalonic aciduria". *J.Biol.Chem.*, 2007 (282): p. 31308-31316.

Selección y caracterización de los mejores lenguajes de programación para el desarrollo de aplicaciones en Ciencia de Datos

Joaquín Pérez Ortega, Ricardo Gudiel López Pérez, Salomón García Paredes, Andrea Vega Villalobos

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México.
e-mail: {jperez, ricardo.lopez17ca, salomon, avega92}@cenidet.edu.mx

Resumen: En las últimas décadas la cantidad de datos ha crecido de manera exponencial en todo el planeta, lo cual ha generado la necesidad de procesarlos y analizarlos para obtener información relevante. Para resolver esta problemática, surgió un área multidisciplinaria denominada Ciencia de Datos. Los científicos de datos se encuentran dentro de los empleos mejor remunerados en varios países, requiriendo personas que cuenten con distintos conocimientos y habilidades, como el manejo de lenguajes de programación. En esta investigación se aborda el problema de seleccionar los mejores lenguajes de programación para desarrollar aplicaciones en Ciencia de Datos. Existe un gran número de lenguajes que se pueden utilizar, sin embargo, unos están más limitados que otros. Para determinar los lenguajes más relevantes, se revisaron resultados divulgados por empresas y publicaciones especializadas. Con base en el análisis de esta literatura, se determinó que los lenguajes dominantes son Python y R. Un objetivo complementario de este artículo es la difusión de las características más relevantes de ambos lenguajes. Finalmente, se presenta una guía de estudio para quienes deseen aprender dichos lenguajes.

Palabras clave: Ciencia de Datos, lenguajes de programación, Python, R, análisis de datos, librerías.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se generan grandes cantidades de datos en distintas áreas del conocimiento como ingeniería, medicina, finanzas, educación, transporte, a través de los dispositivos electrónicos, softwares, sensores, alarmas, y bases de datos. Estos datos pueden provenir de distintas instituciones, organizaciones o empresas públicas y privadas.

En este contexto emerge la Ciencia de Datos como un área de conocimiento que integra distintas disciplinas (sistemas de bases de datos, estadística, matemáticas, aprendizaje automático, computación, conocimiento de negocios, entre otros), permite extraer información y conocimiento relevante a partir del procesamiento y análisis de datos (Cao, 2017). Algunos de los principios de esta área son: trabajo organizado por etapas, descubrimiento de información desconocida a partir de otros datos, correlacionar los datos, descomponer un problema en subproblemas menores (Provost y Fawcett, 2013).

La Ciencia de Datos puede aplicarse en distintos dominios. Por ejemplo: política, educación, salud, negocios, transporte, comercio electrónico, finanzas, turismo, entre otras áreas. Facilitando que personas, empresas, instituciones y organizaciones, tomen decisiones importantes sobre distintas problemáticas, así como conocer hechos relevantes. Loukides (2011) señala la aportación que hizo google durante la epidemia de gripe porcina en 2009, rastreando el progreso de la epidemia

mediante el análisis de las búsquedas de temas relacionados con dicha enfermedad.

1.1 Demanda laboral de científicos de datos

En años recientes ha crecido la demanda de científicos de datos en varios países, convirtiéndose en uno de los empleos más solicitados y mejor remunerados por empresas que trabajan con una vasta cantidad de datos (Davenport y Patil, 2012). Entre las empresas más destacadas de Estados Unidos se encuentran Amazon, IBM, Walmart, Oracle, Google, Intel, Facebook, Netflix, con salarios entre 86 mil y 157 mil dólares al año¹.

Para trabajar con Ciencia de Datos se requieren habilidades matemáticas, estadísticas, analíticas, así como conocimiento en el manejo de bases de datos, procesamiento, modelado y visualización de información, experiencia sobre lenguajes de programación que hacen factible el desarrollo de aplicaciones en esta área. Por lo que conocer de estos lenguajes se torna importante.

1.2. Antecedentes en CENIDET

A partir del año 2016 se comenzaron a desarrollar tesis orientadas a consolidar una plataforma para el diseño y desarrollo de aplicaciones en Ciencia de Datos. Actualmente se ha concluido una tesis de maestría y están en desarrollo una tesis de doctorado y cuatro de maestría.

¹ <https://www.glassdoor.com>

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente existe un gran número de lenguajes de programación. Sin embargo, no todos son idóneos para el desarrollo de aplicaciones en Ciencia de Datos. Por ello, es necesario conocer y seleccionar aquellos lenguajes que tengan las características más favorables.

3. ENFOQUE DE SOLUCIÓN

Con base en investigaciones divulgadas por empresas y publicaciones especializadas se llevaron a cabo los siguientes criterios para resolver el problema descrito en la Sección 2:

1. Se seleccionaron los lenguajes de programación más empleados en el desarrollo de aplicaciones en Ciencia de Datos.
2. Se caracterizaron los lenguajes elegidos. En esta etapa se identificaron los rasgos distintivos de cada lenguaje.

A continuación, en la Sección 3.1 se mencionan los resultados estadísticos y trabajos de investigación publicados con el objetivo de determinar cuáles son los lenguajes de programación más empleados en el desarrollo de aplicaciones para Ciencia de Datos. En la Sección 3.2 se señalan cualidades relevantes de dichos lenguajes.

3.1 Selección de lenguajes de programación para el desarrollo de aplicaciones en Ciencia de Datos

Kaggle, una empresa dedicada al tratamiento de la información cuyo propietario es Google, realizó la siguiente pregunta a 15,222 científicos de datos: ¿Cuál es el lenguaje de programación que emplean regularmente en esta área? Los lenguajes de programación más utilizados: Python, con un índice de impacto del 54 %; y R del 13 %. Otra pregunta de la misma empresa a 18,788 científicos de datos fue la siguiente: ¿Qué lenguaje de programación recomendarías para una persona que quisiera ser un científico de datos? Se obtuvo que el 75 % recomendaría Python y 12 % R.

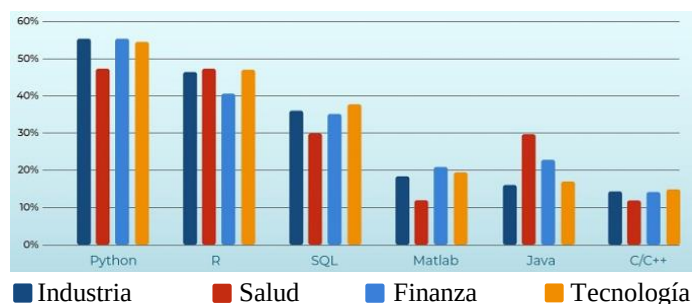


Figura 1 Lenguajes de programación usados en empresas industriales, de salud, financieras y tecnológicas.

KDnuggets, una revista oficial sobre Ciencia de Datos, muestra la investigación realizada a 1,001 perfiles de científicos de datos en el sitio web LinkedIn, sobre el uso de lenguajes de programación. El 54 % de estos científicos de datos empleaban Python, mientras que el 45 % usaban R. Asimismo Valchanov (2019) expresa que Python está tomando el dominio dentro de

las empresas industriales, financieras, tecnológicas y de salud, para el desarrollo de aplicaciones en Ciencia de Datos (ver Figura 1).

En la Tabla 1 se presentan investigaciones en las cuales los autores mencionan qué lenguajes de programación son los recomendados para el desarrollo de aplicaciones en Ciencia de Datos.

Tabla 1 Lenguajes de programación para el desarrollo de aplicaciones en Ciencia de Datos.

Autor (es)	Título	Lenguajes recomendados
Davenport & Patil (2012).	Data Scientist: The Sexiest Job of the 21st Century.	R y Python
Donoho (2015).	50 years of Data Science.	Python y R
Muenchen (2017).	The Popularity of Data Science Software.	Python y R
Siddiqui, Alkadri & Khan (2017).	Review of Programming Languages and Tools for Big Data Analytics	R
Challenger, Díaz & Becerra (2014)	El lenguaje de programación Python.	Python
Cass & Bulusu (2018).	Interactive: The Top Programming Languages, 2018.	Python, R, C, C++, C# y Java

Con base en lo anterior, se determinó que los lenguajes destacados para el desarrollo de aplicaciones en Ciencia de datos son **Python** y **R**. En la siguiente sección se mencionan sus características, enfatizando las ventajas que aportan para el procesamiento y análisis de datos.

3.2 Caracterización de los lenguajes seleccionados

Python cuenta con estructuras de datos eficientes y de alto nivel (por ejemplo, vectores, tuplas y *dataframes*). Su sintaxis y su tipado dinámico, junto con su naturaleza de lenguaje interpretado, permiten el *scripting* y desarrollo rápido de aplicaciones en diversas áreas (Rossum, 2009). Algunos casos de éxito en el uso de este lenguaje son Google, Yahoo, la NASA, Industrias Light & Magic y todas las distribuciones Linux.

Python tiene un enfoque de desarrollo orientado a objetos, aunque también tiene la posibilidad de ser imperativo o funcional, lo que hace factible que en algunos casos utilicen los tres enfoques de manera simultánea. Permite generar documentos de texto, imágenes, flujos de audio o de video, e incluso manipular archivos XML. Posibilita la ejecución de

comandos externos, utilizar recursos de la computadora y realizar programación en paralelo. Tiene la capacidad de comunicarse con dispositivos periféricos como impresoras 3D o servomotores (Chazallet, 2015).

Adicionalmente contiene librerías de funciones para el análisis de datos, algunas de ellas son las siguientes:

a) Numpy. Define una estructura para los datos. Puede crear arreglos de objetos multidimensionales. Contiene una amplia lista de funciones para realizar cálculos entre arreglos.

b) Pandas. Este paquete permite leer archivos de bases de datos y estructurarlos, de tal forma que, permite manipular y trabajar los datos.

c) Matplotlib. Esta librería es útil para visualizar datos y realizar gráficos en 2D.

d) Scipy. Es una colección de paquetes con algoritmos eficientes para temas como algebra lineal, representación de matriz dispersa, funciones especiales y funciones estadísticas básicas.

e) Scikit-learn. Se trata de una librería que ofrece funciones especializadas para las tareas de análisis y minería de datos, como el agrupamiento, la clasificación y la regresión.

R se ha convertido en uno de los lenguajes de programación más usados para Ciencia de Datos y una herramienta recurrente para empresas dedicadas al análisis de la información y en finanzas. Google, Facebook, Microsoft, Ford Motors, John Deere, Lloyds, entre otras entidades empresariales han utilizado este lenguaje de programación.

La librería más importante de R, en las tareas de análisis de datos, es *tidyverse* que contiene los siguientes paquetes:

a) Ggplot2: es útil para la visualización de datos mediante la creación de gráficos.

b) Tibble: crea una estructura de datos similar al *dataframe*, pero con algunas diferencias, como el despliegue del tipo de dato en cada columna y una función mejorada para imprimir resultados en pantalla.

c) Tidy: se trata de una herramienta para ordenar un conjunto de datos. Considera cada columna como una variable y cada fila como un objeto u observación (con características y valores propios).

d) Readr: ayuda en la importación de varios formatos de bases de datos, por ejemplo: csv, tsv, fwf, archivos de Excel, SPSS, Stata y SAS.

e) Dplyr: con este paquete es posible ordenar el despliegue de columnas y filas de un conjunto de datos, filtrarlos e incluso crear nuevos datos, a partir de los que ya existen.

En el sitio web oficial de desarrollo sobre R (r-project.org), se menciona que este lenguaje posee una amplia variedad de funciones para análisis de datos. Por ejemplo: modelos lineales, no lineales, pruebas estadísticas clásicas, análisis de series de tiempo, clasificación y agrupación.

4. GUIA DE ESTUDIO PARA PYTHON Y R

Esta sección contiene una guía de estudio para quienes deseen abordar en el conocimiento de Python o R y están enfocados en el desarrollo de aplicaciones en Ciencia de Datos.

4.1 Guía de Python

I. Entorno de desarrollo

- Instalación de la plataforma Anaconda.
- Uso del entorno Jupyter.

II. Conceptos básicos de Python.

- Listas.
- Tuplas.
- Ciclo *for*.
- Sentencias condicionales.
- Ciclo *while*.
- Dataframes*.

III. Librerías.

- Numpy.
- Pandas.
- Matplotlib.
- Scipy.
- Scikit-learn.

IV. Visualización de datos.

- Gráfico de barras.

4.2 Guía de R

I. Sintaxis de R.

- R como calculadora científica.
- Scripts.
- Objetos.
- Tipos de datos básicos.

II. Interfaz de RStudio.

- Consola, editor y función *View()*.
- Historial de comandos.
- Limpiar la consola.
- Uso de la tecla TAB.
- Ejecución de código.
- Ventanas: entornos, historial y archivos.
- Ventanas: paquetes, gráficos y ayuda.

III. Estructuras de datos en R.

- Vectores
- Función para comprobar tipo de datos.
- Coerción.
- Operaciones vectorizadas.
- Matrices.
- Filas, columnas y dimensión de una matriz.
- Nombre de filas, columnas y dimensiones.
- Álgebra matricial.
- Selección de elementos.
- Dataframes*.

IV. Estructuras de control.

- a. Estructuras condicionales.
- b. Estructuras iterativas.

V. Paquetes.

- a. Ggplot2
- b. Tibble.
- c. Tidy.
- d. Readr.
- e. Dplyr.

5. CONCLUSIÓN

En el ámbito de Ciencia de Datos, en esta investigación se muestra que Python y R son los lenguajes dominantes para el desarrollo de aplicaciones. R surgió como un lenguaje estadístico, lo cual justifica su amplio uso en esta área, en comparación con Python. Actualmente, los científicos de datos tienden a favorecer el uso de Python porque su curva de aprendizaje es menor, lo que hace factible desarrollar aplicaciones en menor tiempo. Ambos lenguajes son ampliamente utilizados para el desarrollo de aplicaciones en el área de salud, pero Python lleva la delantera en áreas como: industria, finanzas y tecnología. R permite importar una variedad más amplia de formatos de bases de datos. Finalmente, un objetivo complementario de este artículo fue la difusión de las características más relevantes de ambos lenguajes que hacen factible el desarrollo de aplicaciones en el área de Ciencia de Datos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dra. Leticia Sánchez Lima su apoyo en la corrección de estilo.

REFERENCIAS

- Cao, L. (2017). Data science: a comprehensive overview. *ACM Computing Surveys*, 50(3), pp. 43:8.
- Cass, S. and Bulusu, P. (2018). *Interactive: The Top Programming Languages 2018*. [En línea]. Obtenido de: <https://spectrum.ieee.org/static/interactive-the-top-programming-languages-2018> [Consultado: 15 Nov. 2018].
- Challenger Pérez, I., Díaz Ricardo, Y. and Becerra García, R. A. (2014). El lenguaje de programación Python. *Ciencias Holguín*, XX(2), pp. 1-13.
- Chazallet, S. (2015). *Python3 Los fundamentos del lenguaje*. 2nd ed. España: ENI.
- Davenport, T.H. and Patil, D.J. (2012). Data Scientist: The Sexiest Job of the 21st Century. *Harvard Business Review*, 90(10), pp. 70-76.
- Donoho, D. (2015). 50 years of Data Science. In: *Turkey Centennial Workshop*, Princeton, New Jersey, pp. 23.
- Hayes, B. (2019). *Programming Languages Most Used and Recommended by Data Scientists*. [En línea]. Obtenido de: <http://businessoverbroadway.com/2019/01/13/programming-languages-most-used-and-recommended-by-data-scientists/> [Consultado: 20 Feb. 2019]
- Kambatla, K., Kollias, G., Kumar, V. and Grama A. (2014). Trends in big data analytics. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 74(7), pp. 2561-2573.
- Loukides, M. (2011). *What is Data Science?* Sebastopol, CA: O'Reilly Media Inc.
- Malviya, A., Udhani, A. and Soni S. (2016). R-tool: Data analytic framework for big data. In: *2016 Symposium on Colossal Data Analysis and Networking (CDAN)*. Indore, India, pp. 1-5.
- Muenchen, R. A. (2017). *The Popularity of Data Science Software*. [En línea]. Obtenido de: <http://r4stats.com/articles/popularity/> [Consulta: 17 May. 2018].
- Provost, F. and Fawcett, T. (2013). Data science and its relationship to big data and data-driven decision making. *Big Data*, 1(1), pp. 51-59.
- Rossum, G. V. (2009). *El tutorial de Python*. [E-book] Python Software Foundation. Obtenido de: <http://python.org.ar/pyar/Tutorial>. [Consultado: 15 May, 2019].
- Shinde, P. P., Oza, K. S. and Kamat, R. K. (2017). Big data predictive analysis: Using R analytical tool. In: *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*. Palladam, India, pp. 1-4.
- Siddiqui, T., Alkadri, M. and Khan, N. A. (2017). Review of Programming Languages and Tools for Big Data Analytics. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(5), pp. 1112-1118.
- Tsai, C., Lai, C., Chao H. and Vasilakos, A. V. (2015). Big data analytics: a survey. *Journal of Big Data*, 2(1), pp. 1-32.
- Valchanov, I. (2019). *Who is a typical Data Scientist in 2019?* [Online]. Obtenido de: <https://www.kdnuggets.com/2019/03/typical-data-scientist-2019.html> [Consulta: 20 Feb. 2019].
- Wickham, H. and Grolemund G. (2017). *R for Data Science*. Sebastopol, CA: O'Reilly Media Inc.

Entornos Virtuales de Aprendizaje Inmersivo, análisis sobre sus características

Magdalena García-Martínez, Gabriel González-Serna
Máximo López-Sánchez, Noé Alejandro Castro-Sánchez, Olivia G. Fragoso-Díaz

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México

*e-mail: maría.garcía19ce@cenidet.edu.mx, gabriel@cenidet.edu.mx, maximo@cenidet.edu.mx,
ncastro@cenidet.edu.mx, ofragoso@cenidet.edu.mx*

Resumen: En la última década se ha observado un crecimiento significativo en las plataformas para gestión del conocimiento (LMS por sus siglas en inglés), estas plataformas ofrecen cursos virtuales que en su mayoría no cuentan con técnicas adecuadas para incentivar el aprendizaje o que ocasionan la deserción temprana de los estudiantes. Además, las plataformas convencionales de LMS no explotan adecuadamente las tecnologías emergentes que podrían mejorar su impacto, en particular la tecnología de realidad virtual inmersiva (RVI), que actualmente ya está al alcance de cualquier usuario. La fusión de los LMS y la tecnología de RVI ha generado nuevas plataformas denominadas Entornos Virtuales de Aprendizaje Inmersivo (EVAI). Este trabajo de investigación está enfocado en el análisis de los EVAI para identificar las principales características que permitan evaluar el grado de inmersión y de las técnicas de gamificación que se pueden emplear para impactar en el proceso de aprendizaje. El objetivo final de esta investigación es identificar elementos que permitan diseñar un método para evaluar la calidad de la experiencia de usuario.

Palabras clave: Realidad Virtual, inmersión, gamificación, aprendizaje.

1. INTRODUCTION

La revolución científica y tecnológica que han traído las computadoras, el internet, bases de datos, páginas web, smartphones, aplicaciones y un sinnúmero de creaciones tecnológicas, ha transformado en el transcurso de (aproximadamente) 30 años la producción, el comercio, las comunicaciones, el trabajo, la cultura, la política y por supuesto la educación. Desde sus inicios, la Web 2.0 permitió a los usuarios participar en actividades de aprendizaje colectivas y colaborativas a través de aplicaciones tales como blogs, wikis, sitios de redes sociales, juegos en línea, videos compartidos en línea y entornos virtuales inmersivos, imprimió dinamismo al aprendizaje y acercó a los estudiantes a la tecnología con nuevas estrategias pedagógicas y didácticas (Torres & Carrillo, 2019), por esta razón, es frecuente ver y sentir que la tecnología es parte importante de nuestra vida y que las competencias individuales relacionadas con el uso de tecnologías disruptivas se han convertido en una condición necesaria para el éxito profesional. La tecnología disruptiva es aquella que “*produce ruptura brusca*” y que conduce a la aparición de productos y servicios que utilizan preferiblemente una estrategia disruptiva a fin de competir contra una tecnología dominante (Howard, 2018), estas tecnologías permiten establecer un marco de innovación que las personas y organizaciones pueden

aprovechar para reinventarse y generar nuevos productos y servicios (Tavárez, 2019). Con base en lo anterior, se ha hecho una revisión sobre las tecnologías disruptivas que se introducen al sector educativo, observando que gracias a la incorporación de la realidad virtual y de elementos clásicos del juego conocidos como gamificación, se consigue una mayor motivación (AEFOL, 2017), logrando una experiencia del aprendizaje divertida y memorable, además de garantizar el acceso a la información y mejorar las estrategias educativas.

Sin embargo, la tecnología no asegura el aprendizaje, siendo éste un proceso activo en el que se construye el conocimiento y no un proceso pasivo de acumulación de información. En dicho proceso el alumno es el protagonista de su aprendizaje, y al contar con las herramientas adecuadas el estudiante puede ser capaz de aprender por sí solo de forma eficaz y eficiente. Por esta razón, los Entornos Virtuales de Aprendizaje (EVA) cumplen los requisitos anteriores que permiten personalizar la educación, motivar al alumno hacia el aprendizaje y las actividades, la clave de estos entornos de aprendizaje consiste no tanto en aprender sino en “aprender diferente”, adaptando las metodologías educativas y herramientas didácticas a las condiciones y habilidades de los estudiantes (Urquidí, Calabor, & Tamarit, 2019). En la actualidad, existe una gran demanda de entornos virtuales de aprendizaje, principalmente en áreas como la medicina, la arqueología y el entrenamiento militar. A

pesar de eso, no todos los entornos ofrecen las mismas herramientas, o permiten las mismas metodologías pedagógicas. Por ello, el proceso de selección de estos entornos es importante, por lo que se requiere conocer cuales son las características que atiendan el requisito de inmersión y gamificación en estos.

La Realidad Virtual (RV) es una rama de las ciencias de la computación que promete sumergir al usuario en un mundo generado por computadora, al mismo tiempo que intenta desvanecer la línea entre lo real y lo ficticio (Selzer, Larrea, & Castro, 2019). De acuerdo a (Rubio-Tamayo & Gertrudix, 2016), la realidad virtual puede ser inmersiva y no inmersiva, y se compone de 6 niveles de interacción mismos que deben garantizar el sentido de presencia o “la sensación de estar ahí”. La Tabla 1 muestra una descripción del tipo de inmersión.

Tabla 1 Clasificación de la realidad virtual. Elaboración propia.

Tipo de inmersión	Definición	Niveles de interacción
No inmersiva	Utiliza como único medio una computadora. En este caso la interacción se limita al manejo de objetos básicos como el teclado y el ratón	1.Vista e imagen 2.Sonido 3.Dimensión/Narrativa 4.Empatía/Identificación
Inmersiva	Se apoya de periféricos como cascos, guantes u otros dispositivos que capturan la posición y rotación de diferentes partes del cuerpo humano.	Bajo nivel 1.Vista e imagen 2.Sonido Alto nivel 3.Hápticas/ Táctiles 4.Movimiento, Cinética corporal, propiocepción 5.Dimensión/Narrativa 6.Empatía/Identificación

1.2 Gamificación en la educación

La Gamificación del Aprendizaje (GoL por sus siglas en inglés), consiste en el uso de elementos de juegos en el ámbito educativo, se utiliza para promover ciertos comportamientos de los estudiantes, motivándolos y convirtiéndolos en participantes activos en el proceso de aprendizaje (Baldeón, Rodríguez, Puig, & López, 2017).

En (Werbach & Hunter, 2012) se identifican tres categorías de elementos de juego: 1) Dinámica del juego: estructura implícita de un juego que determina cómo los jugadores interactúan en tiempo de ejecución, se componen de niveles de desbloqueo, el compromiso social y la programación de recompensas. 2)

Mecánicas del juego: son los procesos que determinan cómo se desarrolla el juego, cómo los jugadores pueden y no pueden tratar de lograr sus metas (desafíos), y lo que sucede cuando tratan de alcanzarlos, comprende sistemas de puntos, niveles, el acceso, el poder y las tablas de clasificación. 3) Los componentes del juego: son implementaciones específicas de la dinámica y la mecánica, e incluyen los avatares, las insignias, los puntos, las colecciones, las clasificaciones, los niveles, los equipos y los bienes virtuales.

2. ENTORNOS VIRTUALES DE APRENDIZAJE INMERSIVO (EVAI)

De acuerdo con una revisión preliminar de la literatura, se han encontrado lo siguientes entornos virtuales de aprendizaje considerados como inmersivos.

2.1 Second Life (SL)

Es un entorno desarrollado por Linden Lab, al que se puede acceder gratuitamente desde Internet. Sus usuarios, conocidos como "residentes", pueden acceder mediante el uso de uno de los múltiples programas de interfaz llamados visores, los cuales les permiten interactuar entre ellos mediante un avatar. Esta plataforma puede ser utilizada en sistema operativo Mac, Linux y Windows (LindenLab, 2003). Un ejemplo de su aplicación en educación es el aprendizaje de idiomas y lenguajes de programación con estudiantes de Ingeniería Informática de la Pontificia Universidad Católica del Perú (Villavicencio, 2016).

2.2 The Education Distric (TED)

The Education District es un mundo virtual 3D centrado en el desarrollo de competencias y habilidades mediante la colaboración y la gamificación usando como vehículo el contenido. Ofrece un entorno seguro y fácil de usar para todo tipo de usuarios, y un aprendizaje colaborativo que mediante encuentros online, permite realizar actividades educativas divertidas y útiles. Se puede utilizar en sistemas operativos como Mac, IOS y Windows. (VirtwayTeam, 2016).

2.3 Minecraft Education Edition (MEE)

Es una plataforma de aprendizaje basada en juegos con contenido alineado y características especiales diseñadas para uso en el aula. Ofrece infinitas oportunidades para la exploración, la narración y el aprendizaje digital, puede utilizarse en sistemas operativos como Mac y Windows (Minecraft, 2016). El objetivo de Minecraft Education Edition es proporcionar a los estudiantes un incentivo más a la hora de aprender conceptos nuevos, usando un elemento lúdico como un videojuego que puede hacer del aprendizaje algo más divertido, interesante y sobre todo, efectivo (Santos, 2016).

2.4 Classcraft, edición educativa de World of Warcraft

Es una herramienta para enseñar y aprender de manera diferente, aplicando técnicas de gamificación en el aula. Crea rol de juegos de diseñados para ser aplicados a lo largo de un curso o trimestre. El único requisito indispensable es disponer de una computadora y un proyector o pizarra digital interactiva con conexión a Internet (Paredes, 2018).

2.5 ENGAGE

ENGAGE es una plataforma de educación y capacitación corporativa en realidad virtual. Permite a los educadores y a las empresas organizar reuniones, presentaciones, clases y eventos con personas de todo el mundo. Usando la plataforma se puede crear capacitación y experiencias de realidad virtual en minutos. Las herramientas son muy fáciles de usar y no requieren experiencia técnica. Se puede elegir alojar sus sesiones de realidad virtual en vivo o grabarlas y guardarlas para que otros las experimenten más tarde. Se puede crear una amplia variedad de experiencias virtuales efectivas e inmersivas con una extensa biblioteca de objetos virtuales, efectos y ubicaciones virtuales disponibles en la plataforma. (ENGAGE Site).

3. COMPARATIVA Y ANÁLISIS

En la Tabla 2 se muestra un resumen de las características con las que cuentan los entornos virtuales de aprendizaje identificados en este estudio. Se consideran aspectos como el nivel educativo básico, medio, medio superior y superior. La existencia de escenarios de aprendizaje, contenidos curriculares, es decir, si la plataforma cuenta con cursos diseñados o se deben diseñar, el idioma, si el universo es cerrado o abierto, es decir existencia de elementos creados como salas o sin elementos, el costo, sistema operativo y si cuenta con técnicas de gamificación y compatibilidad con un visor de realidad virtual.

Tabla 2 Características de los entornos identificados

Plataforma	SL	TED	MEE,	Classcraft	Engage
Nivel educativo	Superior	Todos	Todos	Todos	Superior
Escenarios de aprendizaje	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Contenidos curriculares	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Idioma	Inglés Español	Inglés Español	Todos los idiomas	Todos los idiomas	Inglés
Tipo de universo	Cerrado	Cerrado	Abierto	Cerrado	Cerrado

Costo	Gratuito	Gratuito	5 US por cuenta	96 US	Gratuito
Sistema Operativo	Windows Mac Web	Windows Mac Mac/Ipad	Windows	Windows Web	Windows VIA Steam
Técnicas de gamificación	No	Sí	Sí	Sí	No identificado
Compatible con visor de RV	No	No	No	No	Sí

4. CONCLUSIONES

Con base en el estudio de los entornos virtuales de aprendizaje se puede concluir que no todos los entornos evaluados cumplen con las características que permitan evaluar el grado de inmersión y gamificación que se requiere para lograr un cambio en la forma de facilitar los contenidos para los objetivos de aprendizaje. Así mismo se puede proponer que las características que se describen en la Tabla 2, son aquellas que mínimamente los entornos inmersivos o EVAI debieran cumplir. En este sentido se identifica a *ENGAGE*, como la plataforma que más se acerca a cumplir con las características.

5. TRABAJOS FUTUROS

Una vez identificado un conjunto mínimo de requerimientos que deben cumplir los EVAI, se debe continuar con un proceso de investigación que establezca cómo medir la calidad de la experiencia del usuario en el proceso de enseñanza-aprendizaje cuando se emplean entornos virtuales inmersivos y gamificados. De igual forma se debe continuar con el estudio de entornos virtuales de aprendizaje que cumplan con el requisito de la inmersión y técnicas de gamificación que cumplan con el idioma español.

REFERENCES

- Baldeón, J., Rodríguez, I., Puig, A., & López, M. (2017). Evaluación y rediseño de una experiencia de gamificación en el aula basada en estilos de aprendizaje y tipos de jugador. En R. Contreras, & J. Eguia, *Experiencias de gamificación en las aulas* (págs. 95-111). Barcelona: incom uab.
- Comas-González, Z., Echeverri-Ocampo, I., Zamora-Musa, R., Velez, J., Sarmiento, R., & Orellana, M. (2017). Tendencias recientes de la Educación Virtual y su fuerte conexión con los Entornos Inmersivos. *Revista Espacios*.
- ENGAGE Site (2018). Obtenido de <https://engagevr.io/>
- Henrie, C., Halverson, L., & Graham, C. (2015). Measuring student engagement in technology-mediated learning: a

- review. *Computers & Education*, Vol. 90, pp. 36-53. doi:10.1016/j.compedu.2015.09.005.
- Howard, C. (2018). La tecnología disruptiva. *El Heraldo de México*.
- LindenLab. (2003). *Linden Lab To Open Source Second Life Software*. Obtenido de https://web.archive.org/web/20070110072300/http://lindenlab.com/press/releases/01_08_07
- Luengas, L. A., Rincón, D. A., & Galeano, K. J. (2010). Realidad virtual no inmersiva: instrumentos electrónicos de aplicación educativa. *Revista Visión Electrónica*, 94-105.
- Minecraft. (2016). Obtenido de <https://education.minecraft.net/>
- Paredes, M. (2018). *Classcraft, enseñar y aprender jugando*. Obtenido de Educación, Metodología, Tecnología, Innovación y Conocimiento: <https://enmarchaconlastic.educarex.es/117-pildoras-formativas/herramientas-2-0/2623-classcraft-ensenar-y-aprender-jugando>
- Rubio-Tamayo, J. L., & Gertrudix, M. (2016). Realidad Virtual (HDM) e interacción desde la perspectiva de la Construcción Narrativa y la Comunicación: Propuesta Taxonómica. *Icono 14*, 1-24.
- Santos, E. (2016). *Minecraft Education Edition: cuando un videojuego se convierte en una herramienta educativa*. Obtenido de Genbeta: <https://www.genbeta.com/herramientas/minecraft-education-edition-cuando-un-videojuego-se-convierte-en-una-herramienta-educativa>
- Selzer, M., Larrea, M., & Castro, S. (2019). Presencia e Inmersión en Realidad Virtual: factores que maximizan la. *XXI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2019, Universidad Nacional de San Juan)* (págs. 1-4). Buenos Aires: Red de Universidades con Carreras en Informática.
- Tavárez, J. A. (abril de 2019). *CIENCIA Y TECNOLOGIA*. Obtenido de <http://josearmando.do/2019/04/30/tecnologias-emergentes-o-disruptivas/>
- Torres, C., & Carrillo, J. (2019). Los entornos de aprendizaje inmersivo y la enseñanza a ciber-generaciones. *Educação e Pesquisa* Vol. 45, <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-4634201945187369>.
- Urquidi, A. C., Calabor, M. S., & Tamarit, C. (2019). Entornos virtuales de aprendizaje: modelo ampliado. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, Vol. 21, e22, pp. 1-12. doi:10.24320/redie.2019.21.e22.1866.
- Villavicencio, E. (2016). *MUNDOS VIRTUALES: SECOND LIFE COMO APOORTE A LA EDUCACIÓN*. Obtenido de Grupo Avatar, de la Pontificia Universidad Católica del Perú: <http://avatar.inf.pucp.edu.pe/mundos-virtuales-second-life-como-aporte-a-la-educacion/>
- VirtwayTeam. (2016). *The Education District, formación online para el camino hacia la libertad, la igualdad y la paz*. Obtenido de TheEducationDistrict: <https://www.theeducationdistrict.com/es/>
- Werbach, K., & Hunter, D. (2012). For the Win: How Game Thinking Can Revolutionize Your Business. *Harrisburg: Wharton Digital Press*.

Un experimento para determinar el efecto de la curva del olvido en el aprendizaje del signo lingüístico

Carlos-Alberto Peralta-Quintero, Noé-Alejandro Castro-Sánchez
Juan-Gabriel González-Serna, Kenia Nieto-Benítez

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México

e-mail: cquintero.xzv@icloud.com; {ncastro, gabriel, kenianieto}@cenidet.edu.mx

Resumen La teoría de la curva del olvido de Ebbinghaus está fundamentada en el aprendizaje utilizando la memoria pura, sin asociaciones mentales. Este artículo se centra en un experimento para observar los efectos de la teoría de Ebbinghaus orientada hacia un enfoque asociativo, en particular, hacia el aprendizaje del signo lingüístico. El experimento consistió en dos grupos que realizaron repasos espaciados para determinar el impacto que tiene el contenido y cantidad de material de estudio en el aprendizaje, aplicando la teoría de Ebbinghaus. Los resultados obtenidos no fueron suficientes para determinar la influencia del contenido del material de estudio en el aprendizaje. Por otro lado, se determinó que a mayor cantidad de material de estudio se necesita más tiempo para aprenderlo. Además, la teoría de Ebbinghaus ha funcionado correctamente en un enfoque asociativo.

Palabras clave: Curva del olvido, Ebbinghaus, Memoria, Signo lingüístico, Tarjetas de memoria, Repetición espaciada.

1. INTRODUCCIÓN

La memoria a corto plazo tiene una capacidad de almacenamiento y duración limitados, por el contrario, la memoria a largo plazo posee un almacenamiento relativamente permanente y su capacidad es vasta (Schimanke, Mertens, Ribbers y Vornberger, 2015).

En relación con lo anterior, el psicólogo alemán Hermann Ebbinghaus (1885) realizó un experimento con sílabas fáciles de recordar, pero sin significado. Este experimento tuvo como objetivo eliminar las asociaciones mentales que las palabras, frases u oraciones pudieran causar en la memoria, es decir, empleó un aprendizaje utilizando la memoria pura. No obstante, fuera de un ambiente controlado, el aprendizaje se lleva a cabo mediante asociaciones mentales; por ejemplo, cuando una persona aprende su lengua materna. Como resultado, Ebbinghaus publicó un mapeo sobre el decremento a través del tiempo de la capacidad de retención de la información de reciente adquisición, actualmente conocido como la teoría de la *curva del olvido* (Chmiel y Schubert, 2018).

Con respecto al aprendizaje de la lengua, Saussure, Bally y Alonso (2008) mencionan que la lengua existe en la colectividad de las personas, como si de un diccionario se tratara. Por tanto, si una persona quiere aprender la lengua de esa colectividad, necesitaría aprender dicho diccionario. Sin embargo, este enfoque es simplista, el mismo Saussure *et al.*

(2008) explican que no corresponde un nombre y una cosa, sino un concepto y una imagen acústica: el *signo lingüístico*.

Si bien, en la literatura, se pueden encontrar propuestas para aplicar o ajustar la teoría de la curva del olvido hacia un aprendizaje asociativo, no se ha obtenido un resultado concluyente que proporcione una ecuación ajustada hacia dicho tipo de aprendizaje.

Este artículo se centra en un experimento para observar los efectos de la teoría de la curva del olvido con variaciones en el contenido y cantidad de material de estudio, con la finalidad de enfocar la teoría de Ebbinghaus hacia un aprendizaje asociativo, en particular, hacia el aprendizaje del signo lingüístico. Se utiliza (1), propuesta por Hu y Ogihara (2011), para implementar la teoría de la curva del olvido en el presente experimento.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

En la literatura, la *repetición espaciada* se define como el estudio de la información en intervalos de tiempo establecidos, estos intervalos pueden ser calculados mediante la teoría de la curva del olvido de Ebbinghaus. Por ejemplo, Zheng (2015) propuso un sistema de aprendizaje de vocabulario, el cual supone que el usuario estudie una lista de palabras mediante repeticiones espaciadas. Hsiao, Cheung, Jiang y Yu (2016) propusieron un sistema que programa sesiones de estudio espaciadas para memorizar el vocabulario del examen de inglés IELTS. Swart (2018) realizó un estudio longitudinal donde

determina el momento óptimo para realizar sesiones de evaluación extra-clase para alumnos de primer año de ingeniería. Por último, Schimanke *et al.* (2015) realizaron una revisión de la literatura para determinar el efecto de la interacción entre la memoria a corto y largo plazo en usuarios que utilizan juegos de aprendizaje con repetición espaciada.

Al analizar los trabajos anteriores, se observó que se centran en implementar la teoría de Ebbinghaus en el aprendizaje asociativo. Sin embargo, cualquier ecuación basada en la curva del olvido necesita ser ajustada hacia un enfoque asociativo para obtener mayor eficiencia. Por ejemplo, Hu y Ogihara (2011) propusieron (1), con base en la teoría de Ebbinghaus, para determinar la cantidad de experiencia musical olvidada por el usuario, lo que llamaron "frescura", con la finalidad de implementar este enfoque en un algoritmo de recomendación de música.

$$f(t, s) = e^{-\frac{t}{s}} \quad (1)$$

Donde f es la retención de la memoria o probabilidad de recordar la información estudiada (probabilidad), t es el tiempo desde el último repaso (días), s es el número de repasos/repeticiones (entero positivo).

Por otro lado, Settles y Meeder (2016) propusieron un nuevo enfoque de la teoría de Ebbinghaus, presentado en (2). Además, agregaron características de interacción para ajustar el resultado de la ecuación. Sin embargo, no obtuvieron los resultados esperados.

$$f(\Delta, h) = 2^{-\frac{\Delta}{h}} \quad (2)$$

Donde f es la retención de la memoria (probabilidad), Δ es el tiempo desde el último repaso (días), h es el número de repasos/repeticiones (entero positivo).

Por último, Li, Jin, Wu y Chen (2019) presentaron un algoritmo de recomendación que implementa la teoría de Ebbinghaus para rastrear el cambio de interés del usuario sobre un producto ofrecido y propusieron (3), (4), (5) y (6) como simplificaciones de la ecuación original de Ebbinghaus, esta última es mostrada en (7).

$$f(x) = -0.007206x + 0.40027 \quad (3)$$

$$f(x) = 2.75e^{-\left(\frac{x+7.113}{5.843}\right)^2} \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{0.7018}{x + 1.047} \quad (5)$$

$$f(x) = 0.6584e^{-61.17x} + 0.3325e^{-0.01744x} \quad (6)$$

Donde f es la retención de la memoria (probabilidad), x es el tiempo desde el último repaso (días).

$$f(x) = \frac{100k}{(\log x)^c + k} \quad (7)$$

Donde f es la retención de la memoria (probabilidad), x es el tiempo desde el último repaso (minutos), $c = 1.84$ y $k = 1.25$ son constantes.

Se realizó una investigación en la literatura y se encontró que (1) está fundamentada en el concepto matemático del crecimiento exponencial, dado que Ebbinghaus propone una curva perteneciente a este dominio de las matemáticas, se considera que (1) es una simplificación viable. Con base en lo anterior, el presente experimento se centra en observar el comportamiento de (1) aplicada a un enfoque asociativo y la manera en que el material de estudio afecta al aprendizaje, con el objetivo de regular el material que el estudiante recibe.

En particular, se elige el signo lingüístico para el experimento del presente artículo porque es una asociación mental que se realiza entre el concepto e imagen acústica. El *concepto* es la representación fonética/fonológica o gráfica que está asociada a una imagen acústica. Por otro lado, la *imagen acústica* es la huella psíquica de la representación del mundo exterior proporcionada por nuestros sentidos. Del mismo modo, al concepto y a la imagen acústica se les conoce como *significante* y *significado*, respectivamente (Saussure *et al.*, 2008).

3. EXPERIMENTO

El experimento tuvo como objetivo determinar si (1) debe ajustarse para optimizar el tiempo entre sesiones de estudio o, por el contrario, se debe regular la información que se le proporciona al estudiante con base en su desempeño en el aprendizaje.

El experimento consistió en realizar repasos espaciados de un conjunto de tarjetas de memoria para observar la cantidad de palabras aprendidas. Durante una semana y media, ocho estudiantes de maestría participaron en dos actividades: obtención de vocabulario desconocido y repasos espaciados variando el contenido del material de estudio. Después, seis estudiantes de maestría participaron durante una semana y media en una actividad: repasos espaciados variando la cantidad de material de estudio.

Los estudiantes se dividieron en dos grupos: experimental y control. El grupo experimental incluyó imágenes en sus tarjetas de memoria y en la última parte del experimento tuvo una mayor carga de información que aprender. El grupo de control sólo contó con texto en sus tarjetas de memoria y tuvo una menor carga de información que aprender. Por último, cabe mencionar que la lengua materna de los estudiantes es el español, además tienen un dominio suficiente de la lengua

inglesa que les permitió realizar las actividades del experimento que se describe a continuación.

2.1 Actividad 1: Obtención de vocabulario desconocido

El objetivo de esta actividad fue generar tarjetas de memoria para utilizarlas en la siguiente actividad, con la finalidad de realizar repasos espaciados del vocabulario desconocido de cada participante.

Primero, se les pidió a los participantes de ambos grupos que dieran lectura a 3 textos cortos en inglés (una cuartilla cada texto) y subrayaran, aproximadamente, 12 palabras que desconocieran. Posteriormente, se les dieron las traducciones de sus palabras desconocidas a cada participante de ambos grupos. Después, se les pidió a los participantes del grupo experimental buscar en Internet una imagen que, según su criterio, mejor represente cada una de sus palabras desconocidas. El grupo de control omitió esta búsqueda de imágenes porque la siguiente actividad consiste en contrastar las palabras aprendidas mediante diferentes materiales de estudio. Por último, se crearon tarjetas de memoria con las palabras desconocidas, sus traducciones y las imágenes relacionadas para el grupo experimental (ver Figura 1). Mientras que, para el grupo de control, se realizaron tarjetas de memoria con las palabras desconocidas y sus traducciones (ver Figura 2).

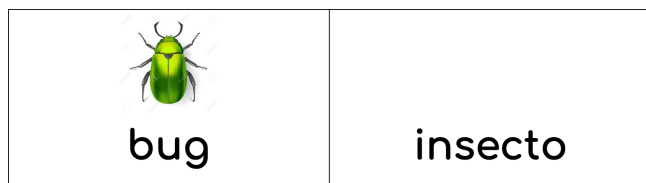


Figura 1. Ejemplo de tarjeta de memoria para el grupo experimental, anverso y reverso.

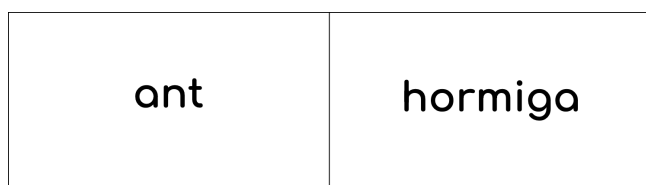


Figura 2. Ejemplo de tarjeta de memoria para el grupo de control, anverso y reverso.

2.2 Actividad 2: Repasos espaciados variando el contenido del material de estudio

El objetivo de esta actividad fue que los participantes realizaran repasos de sus tarjetas de memoria en intervalos de tiempo dados por (1), con la finalidad de observar la influencia en el aprendizaje del grupo experimental al utilizar imágenes en sus tarjetas de memoria, característica que se omite en el grupo de control.

Primero, se entregaron a los participantes sus tarjetas de memoria. Posteriormente, durante una semana y media, los participantes realizaron sesiones de estudio espaciados con sus tarjetas de memoria. Por cada sesión de estudio y para cada participante se registró la fecha y hora, las palabras estudiadas, si las palabras estudiadas fueron recordadas y el número de repaso (ver Tabla 1).

Tabla 1. Ejemplo del registro de sesiones de estudio por participante.

Registro de sesiones				Próxima sesión
Fecha y hora	Palabras estudiadas	Palabras recordadas	Número de repaso	Fecha y hora
17/09/2019 17:15	wanted, enjoy, laid, thought, might, spot, flew, stood, shouted, beads	-	1	18/09/2019 10:15:00
18/09/2019 10:41	enjoy, might	No	1	19/09/2019 03:41
18/09/2019 10:41	wanted, laid, thought, spot, flew, stood, shouted, beads	Sí	2	19/09/2019 13:41
20/09/2019 15:36	might	No	1	21/09/2019 08:36
20/09/2019 15:36	enjoy	Sí	2	21/09/2019 18:36
20/09/2019 15:36	wanted, laid, thought, spot, flew, stood, shouted, beads	Sí	3	22/09/2019 17:36

Como se muestra en la Tabla 1, las palabras recordadas por los participantes se registraron con un incremento de uno en su número de repaso, mientras que las palabras olvidadas reiniciaban su número de repaso a uno, sin importar su valor previo. Por ejemplo, las palabras *enjoy* y *might* siguieron en primer repaso por ser palabras olvidadas y el resto de las palabras incrementaron a segundo repaso (registro dos y tres). En la siguiente sesión de estudio, *might* permaneció en primer repaso por ser una palabra olvidada, *enjoy* pasó a segundo repaso y el resto de las palabras pasaron a tercer repaso por ser palabras que se recordaron (registro cuatro, cinco y seis).

Después, se les proporcionó la fecha y hora recomendada de su próxima sesión de estudio, dada por (1), con el objetivo de que los participantes repasaran el material de estudio antes de que fuera más probable que no lo recordaran, en otras palabras, cuando:

$$f(t, s) = 0.5$$

Se conocen los valores de f (retención de la memoria) y s (número de repaso) en (1), por tanto, se puede despejar t para obtener el tiempo que debe transcurrir desde la última sesión de estudio hasta la próxima sesión de estudio (ver Tabla 2). Para obtener la fecha y hora recomendada de la próxima sesión de estudio sólo se debe sumar el tiempo t a la fecha y hora de la última sesión de estudio registrada según el número de repetición que corresponda.

Por último, los participantes de ambos grupos realizaron una evaluación que consistió en una hoja donde tuvieron que anotar la traducción de sus palabras desconocidas. El objetivo de esta evaluación fue confirmar el número de palabras aprendidas en el registro y observar si existe alguna diferencia entre ambos grupos, con respecto a la influencia del uso de imágenes en las tarjetas de memoria del grupo experimental.

Tabla 2. Tiempo entre sesiones de estudio de los cinco primeros repasos con 50% de probabilidad de retención de la memoria.

Número de repaso (s)	Tiempo (t)	Tiempo (horas)	Tiempo (dd hh:mm)
1	0.69	17	17:00
2	1.38	27	1 03:00
3	2.08	50	2 02:00
4	2.77	66	2 18:00
5	3.46	83	3 11:00

2.3 Actividad 3: Repasos espaciados variando la cantidad de material de estudio

El objetivo de esta actividad fue que los participantes realizaran repasos de sus tarjetas de memoria en intervalos de tiempo dados por (1), con la finalidad de observar el número de palabras aprendidas con respecto a la cantidad de tarjetas de memoria que se les proporcionaron a ambos grupos.

Primero, se elaboraron nuevas tarjetas de memoria con palabras desconocidas en inglés, su traducción y una imagen relacionada para los participantes de ambos grupos. Los participantes del grupo experimental recibieron 20 tarjetas de memoria y los del grupo de control recibieron 10 tarjetas de memoria.

Posteriormente, durante una semana y media, los participantes realizaron sesiones de estudio espaciados con sus tarjetas de memoria. Por cada sesión de estudio y para cada participante, se registraron los mismos datos como se realizó en la Tabla 1 de la Actividad 2. También, se proporcionó la fecha de su próxima sesión de estudio, dada por (1).

Por último, los participantes de ambos grupos realizaron una evaluación que consistió en una hoja donde tuvieron que anotar la traducción de sus palabras desconocidas. El objetivo de esta evaluación fue comparar el número de palabras aprendidas por los participantes de ambos grupos y determinar la influencia de la cantidad de material en el aprendizaje.

4. RESULTADOS

La actividad *obtención de vocabulario desconocido* permitió a los participantes generar un conjunto de tarjetas de memoria con las palabras desconocidas como material de estudio (ver Tabla 3). Se realizaron *repasos espaciados variando el contenido del material de estudio* entre el grupo experimental y control. En la Tabla 3, se observan tres variaciones del número

de palabras aprendidas por los participantes cuando se comparan las reportadas en el registro de sesiones de estudio contra las obtenidas en sus evaluaciones. Las variaciones se presentan en el participante 4e del grupo experimental y en los participantes 3c y 4c del grupo de control. Por otro lado, ambos grupos realizaron 4 repasos espaciados. Por tanto, la implementación de la teoría de la curva del olvido fue homogénea para este experimento.

Tabla 3. Comparativa entre las palabras aprendidas del registro de sesiones de estudio y la evaluación cuando se varía el contenido del material de estudio.

Tipo de participante	Experimental				Control			
Número de participante	1e	2e	3e	4e	1c	2c	3c	4c
Palabras desconocidas	12	10	12	10	11	7	9	10
Palabras aprendidas (registro)	12	10	10	10	9	7	9	9
Palabras aprendidas (evaluación)	12	10	10	7	9	7	7	8

Los resultados de los *repasos espaciados variando la cantidad de material de estudio* entre el grupo experimental y control (ver Tabla 4) muestran tres variaciones del número de palabras aprendidas por los participantes al comparar las reportadas en el registro de sesiones de estudio contra las obtenidas en sus evaluaciones. Las variaciones se presentan en los participantes 2e y 3e del grupo experimental y en el participante 1c del grupo de control.

Tabla 4. Comparativa entre las palabras aprendidas del registro de sesiones de estudio y la evaluación cuando se varía la cantidad de material de estudio.

Tipo de participante	Experimental			Control		
Número de participante	1e	2e	3e	1c	2c	3c
Palabras desconocidas	20	20	20	10	10	10
Palabras aprendidas (registro)	7	14	16	6	10	10
Palabras aprendidas (evaluación)	7	13	15	4	10	10

5. DISCUSIÓN

Los *repasos espaciados variando el contenido del material de estudio* tuvieron como resultado una menor cantidad de palabras aprendidas por parte del grupo de control, como se puede ver en la Tabla 3. En particular, esto puede deberse a la falta de imágenes como apoyo para el aprendizaje. Además, los participantes del grupo experimental comentaron que las imágenes en sus tarjetas de memoria les ayudaron a recordar el significado de las palabras en ellas. A pesar de lo anterior, la diferencia entre las palabras desconocidas no aprendidas entre ambos grupos es muy pequeña, por tanto, no se puede

determinar la influencia que el contenido del material de estudio pudo tener en los participantes. Este resultado se debe al reducido número de participantes en ambos grupos.

Por otro lado, los resultados de los *repasos espaciados variando la cantidad de material de estudio* muestran que el grupo experimental tuvo problemas para aprender todo el material de estudio en el rango de tiempo dado. El grupo de control aprendió todo el material que se le proporcionó, excepto el participante 1c. El resultado del participante 1c se le atribuye al poco interés en repasar el material. En particular, se puede decir que la cantidad de material de estudio influyó en el aprendizaje de los participantes, a mayor cantidad de material se requiere mayor tiempo para aprenderlo. Aunque de seguir con el experimento, se pudo haber comparado la cantidad de tiempo que ambos grupos utilizaron para aprender todo el material de estudio proporcionado.

6. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

Se ha elaborado un experimento para observar los efectos de la teoría de la curva del olvido con variaciones en el contenido y cantidad de material de estudio. El objetivo ha sido enfocar la teoría de Ebbinghaus hacia un aprendizaje asociativo mediante la modificación de la ecuación de Ebbinghaus o la gestión del material de estudio. Los resultados no fueron suficientes para determinar la influencia del contenido del material de estudio en el aprendizaje de los participantes. Por otro lado, los participantes del grupo experimental que trabajaron con una cantidad mayor de material de estudio no lograron aprender dicho material en el mismo periodo de tiempo que el grupo de control. Se determinó que a mayor cantidad de material de estudio se requiere más tiempo para aprenderlo. Por último, los resultados muestran que (1) funciona adecuadamente en un enfoque asociativo.

Con base en las observaciones realizadas durante el experimento del presente artículo, los docentes deben considerar moderar las cantidades de material de estudio y distribuirlo en actividades a realizar durante diferentes sesiones de estudio, con la finalidad de lograr que los estudiantes asocien los conceptos y los retengan en memoria. Por otro lado, se recomienda a los estudiantes ser cumplidos en la realización de las actividades propuestas por el docente. La omisión de las actividades implica ir olvidando la información de reciente adquisición conforme va transcurriendo el tiempo, según lo especificado en la teoría de la curva del olvido de Ebbinghaus.

Se propone como trabajo futuro, realizar un experimento con una cantidad de participantes y tiempo mayor. Además, incluir un análisis previo al experimento que determine el dominio del idioma inglés de los participantes o seleccionar un idioma más críptico, con la finalidad de que los participantes tengan un dominio similar del idioma a aprender. Por último, presentar los resultados en términos estadísticos, con el objetivo de mejorar la apreciación de estos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado parcialmente por el Gobierno de México (beca CONACYT, SNI, TecNM 7346.19-P).

REFERENCIAS

- Chmiel, A. y Schubert, E. (2018). Using Psychological Principles of Memory Storage and Preference to Improve Music Recommendation Systems. *Leonardo Music Journal*, 28, pp.77-81.
- Ebbinghaus, H. (1885). *Memory: A Contribution to Experimental Psychology*. New York: Dover.
- Hsiao, T.; Cheung, A.; Jiang, G. y Yu, X. (2016). An Interactive IELTS Vocabulary Memorizing Method Based on Ebbinghaus Curve. *International Conference on Applied System Innovation (ICASI)*, Okinawa, Japón.
- Hu, Y. y Ogiwara, M. (2011). Nextone Player: A Music Recommendation System Based on User Behavior. *Proceedings of the 12th International Society for Music Information Retrieval Conference*. Miami, FL, USA.
- Li, T.; Jin, L.; Wu, Z. y Chen, Y. (2019). Combined Recommendation Algorithm Based on Improved Similarity and Forgetting Curve. *MDPI Information Journal*, 10, 130, 1-18.
- Saussure, F., Bally, C. y Alonso, A. (2008). *Curso de lingüística general*. Buenos Aires: Losada.
- Schimanke, F.; Mertens, R.; Ribbers, S. y Vornberger, O. (2015). Implications of Short-Term Memory Research for the Design of Spaced Repetition Based Mobile Learning Games. *2015 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)*. Miami, FL, USA.
- Settles, B. y Meeder, B. (2016). A Trainable Spaced Repetition Model for Language Learning. *Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, pp.1848-1858.
- Swart, A. (2018). An epic consequence of classroom revision of course content for first-year African engineering students. *World Transactions on Engineering and Technology Education*, 16(4), 368-373.
- Zheng, W. (2015). Design of Mobile Micro-English Vocabulary System Based on the Ebbinghaus. *2015 Eighth International Conference on Internet Computing for Science and Engineering (ICICSE)*. Harbin, China.

Sistema Generador Automático de Reportes para Aplicaciones Web Dinámicas

**M. Guillén R., G.A. Sanchez G.,
N. García M, H. Hernández G.**

Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Gerencia Análisis de Redes,
e-mail: {mguillen, ariana.sanchez, ngarcia, hhg}@ineel.mx

Resumen: Se presenta un sistema de información para la generación y publicación de reportes en aplicaciones web. El generador de reportes tiene como objetivo mostrar información de manera organizada y estética para ser presentada en pantalla y en papel, la información se puede obtener a partir de una o más bases de datos y/o archivos de datos. Se presentan los requerimientos funcionales y diseño del sistema generador de reportes. Además, se presentan los resultados y beneficios obtenidos al utilizar este Sistema.

Palabras clave: Generador de reportes, aplicaciones web, formatos, configuración, www.

1. INTRODUCCIÓN

La globalización de las empresas y los cambios en la economía mundial han forzado a las empresas a optimizar sus operaciones para minimizar sus costos y aumentar sus ganancias, es por ello que se requiere contar con la información válida en el momento adecuado para hacer una correcta toma de decisiones de negocios. La clave para entregar esa información a los responsables de la toma de decisiones empresariales de manera oportuna son los informes. Los informes se han convertido en una actividad esencial para todas las empresas. La importancia de los informes radica en la transformación de los datos a información y a su vez a conocimiento. Esta transformación requiere análisis, o el entendimiento de los datos para resaltar los problemas, tendencias y cambios en los datos que son relevantes para la toma de decisiones de negocios. A los informes se les puede agregar la capacidad de realizar cálculos para crear pronósticos, filtrar datos para observar el desempeño de la organización durante un período de tiempo en particular e incluso formatear datos de manera condicional para resaltar la información más importante.

En la actualidad la tendencia en desarrollo de sistemas es por medio de aplicaciones web. Una aplicación web se puede definir como aquella aplicación que los usuarios acceden por medio de un navegador y que reside en un servidor web, el acceso puede ser a través de Internet o Intranet. Las principales ventajas de usar aplicaciones web son:

- Ahorro en tiempo y espacio: Se pueden realizar tareas sencillas sin necesidad de descargar ni instalar ningún programa.
- Compatibilidad: Basta tener un navegador actualizado para poder utilizarlas.
- Actualizaciones inmediatas.

- Bajo consumo de recursos: Dado que toda (o gran parte) de la aplicación no se encuentra en nuestro ordenador, muchas de las tareas que realiza el software no consumen recursos nuestros porque se realizan desde otro ordenador.
- Multiplataforma. Se pueden usar desde cualquier sistema operativo porque sólo es necesario tener un navegador.
- Portable: Es independiente del equipo donde se utilice.

1.1 Objetivo General

Proporcionar un sistema para la generación y publicación automática de reportes en una aplicación web, utilizando tecnologías de vanguardia.

1.2 Objetivos Específicos

- Analizar los requerimientos técnicos necesarios para la implementación de un generador de reportes de acuerdo a las necesidades de los usuarios
- Elaborar el diseño del nuevo generador de reportes.
- Describir la implementación de la aplicación para elaboración y publicación de reportes sobre la base del diseño realizado.
- Mostrar los resultados obtenidos.

1.3 Formulación del Problema

Se requiere de un generador de reportes que permita la publicación de los reportes generados en aplicaciones web en forma automática. El desarrollo de esta investigación consistió en analizar los marcos existentes y los productos más representativos para generar reportes y evaluar si alguno de ellos se ajusta a las necesidades de los usuarios o si es más eficiente construir y desarrollar en generador de reportes propio.

Se requiere que el generador de reportes pueda:

- Ser alojado en el mismo entorno que los productos futuros
- Implementarse en forma automática con productos futuros
- Ser visualizado en forma de tablas y filtros.
- Exportar a formatos conocidos (excel, csv, pdf, etc.)
- Crear informes de una forma más sencilla.
- Mantener los informes de forma fácil y el propio generador de reportes
- Integrar en otros productos y dar una apariencia y sensación similares.

Si se va a realizar un generador de reportes, considerar lo siguiente:

- ¿Cómo se debe hacer?
- ¿Qué componentes deben usarse?
- ¿Qué elección de arquitectura y diseño?
- ¿Costo?
- ¿Cómo se integraría con otros productos?
- ¿Cuánto mantenimiento requeriría el código?

1.4 Preguntas de Investigación

Pregunta uno: ¿Existe actualmente un Generador de Reportes en el mercado que cumpla con las demandas requeridas? (consulte la formulación del problema) y en su caso, ¿se puede implementar e integrar en la aplicación web actual?

Pregunta dos: Si no, ¿cómo sería la mejor manera de implementar un generador de reportes propio?

1.5 Alcance y Limitaciones

Por limitaciones de tiempo y presupuesto solo se requiere un generador de reportes, todos los programas completos de Business Intelligence se ignoran a menos que solo sea posible comprar la parte del generador de reportes. Tampoco se analizaron los programas de análisis de Big Data.

De las alternativas que quedan, se analizaron tres productos comerciales, tabla 1 y se realizó el análisis y desarrollo de un generador de reportes. El análisis se realizó con la pregunta escrita en mente para mantener un marco estable para este trabajo.

2. METODOLOGÍA

En las siguientes secciones se da una breve explicación sobre cómo se ha realizado el análisis.

2.1 Enfoque científico

En este trabajo se utilizó un enfoque inductivo y todos los datos serán datos empíricos. Se realizó un análisis sobre diferentes generadores de reportes con un método cualitativo.

2.2 Descripción del método

El análisis de los productos existentes se realizó con la ayuda de los diferentes tutoriales, versiones de prueba y documentación proporcionado por las diferentes compañías. Fueron necesarias pequeñas implementaciones para las pruebas de concepto y se realizaron con las herramientas ofrecidas por las empresas.

2.3 Confiabilidad y validez

Un análisis que tuviera más tiempo para realizarlo habría tenido la oportunidad de examinar más generadores de reportes y la posibilidad de hacer un análisis mucho más detallado de los productos que fueron seleccionados. Las conclusiones y resultados se toman de la información que responde a las preguntas de investigación.

3. ANÁLISIS DE PRODUCTOS EXISTENTES

Existen varias alternativas para la generación de reportes con las siguientes características (Gartner 2019, Selecthub 2019):

- Reportes automáticos mediante plantillas.
- Reportes automáticos mediante consultas predefinidas.
- Reportes automáticos mediante middleware pre-configurado.

El entorno en el que se desarrolla el sistema requiere que se consideren las siguientes características dado que se requiere un desarrollo a la medida.

- Generación automática,
- Tiempo de desarrollo.
- Mantenimiento.
- Capacidad de adaptación a entornos específicos

Tabla 1: Comparativa de Generadores de Reportes

Producto	Generación automática	Tiempo de desarrollo	Mantenimiento
Jaspersoft (Tibco)	Parcial	Medio	Alto
Crystal Reports (SAP)	Parcial	Medio	Alto
Reporting MicroStrategy	Parcial	Medio	Alto

Existen varios productos comerciales que usan las diferentes alternativas para generar reportes, sin embargo, para los sistemas a la medida se requiere utilizar todas las alternativas mencionadas.

Para la publicación de los reportes se requiere de automatización de procesos para lo cual se puede utilizar middleware y/o gestores de tareas a nivel Sistema Operativo.

Al realizar prototipos con los generadores de reportes antes mencionados se obtuvieron tiempos de generación de reportes altos y tamaño de los archivos excesivamente grandes, ésta evaluación de tiempo y tamaño se realiza comparando los prototipos de los productos comerciales con el desarrollo propio y produjo una reducción en tiempo de generación y tamaño de los reportes en promedio de 8 a 1, por lo que se decidió desarrollar un sistema generador de reportes propio que de tiempos y tamaños adecuados en la generación de reportes y permita una fácil integración con la aplicación web.

Otro reto del sistema es automatizar el proceso para generar y publicar reportes considerando los requerimientos mencionados.

4. SISTEMA GENERADOR DE REPORTES

El sistema fue implementado utilizando la metodología de desarrollo Proceso Unificado de Rational o RUP por sus siglas en inglés de Rational Unified Process (Jacobson et al, 2000). El sistema está formado por tres funciones principales que agrupan las funciones generales del sistema generador de reportes, figura 1:

a) Gestor de configuración: En la configuración se realiza la definición de los reportes, se especifican las conexiones al origen de datos, así como los diseños y estilos utilizados para presentar los datos. Los diseños definen la estructura y las reglas de la representación de datos, y los estilos definen cómo se verán los datos una vez recuperados. La configuración del reporte es simplemente una plantilla, un diseño estático que rara vez cambia, y que (al igual que las plantillas) tiene la característica de producir contenido con una apariencia coherente en todas las secciones del informe. En la configuración también se indican los procedimientos almacenados a través de los cuales se obtiene la información dinámica que se presentará en el reporte.

b) Gestor de ejecución: La configuración del reporte no trata los datos directamente, porque los datos no están “vivos”. El reporte debe ser generado y procesado para poder obtener los datos. Los datos se extraen de un almacén de datos en función de algún tipo de consulta realizada por medio de los procedimientos almacenados indicados en la configuración. Es decir, los datos en el reporte son los resultados de una consulta de datos y no es agregado manualmente por los diseñadores o usuarios cuando se diseña el informe. Un almacén de datos puede ser una base de datos, archivos, una colección de objetos comerciales, etc. Existen tres formas de ejecutar los reportes: la primera es la ejecución a una fecha y hora en específico por medio del servicio para ejecución de comandos programados del sistema operativo (p.ej: Cron). La segunda, es después de ejecutar procesos de cálculos activados por el usuario y que respeten ciertas reglas y lógicas del negocio y se realiza por medio de un administrador de procesos BPEL y la tercera y última por medio de una consola que es activada a petición del administrador del sistema.

c) Gestor de notificación: Permite realizar dos funciones: la transferencia de los reportes del servidor donde se generaron los

reportes al servidor web donde se depositan para su publicación; y el registro en base de datos de la información del reporte que permite al servidor web su publicación en forma automática.

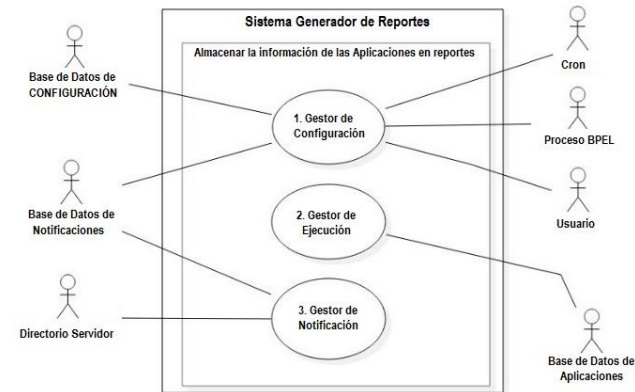


Figura 1: Diagrama de Caso de Uso de las Funciones Generales

A continuación, se describen los actores que forman el caso de uso:

- Cron: “*Demonio*” para la ejecución de comandos programados del sistema operativo Unix que ejecuta al sistema generador de reportes, en la fecha y hora indicada con datos iniciales definidos en la configuración de los reportes.
- Administrador de procesos BPEL: proceso automatizado BPEL que ejecuta al sistema generador de reportes de acuerdo a una lógica de negocios.
- Usuario: Personal autorizado que requiere la ejecución extraordinaria del sistema, proporcionando los datos iniciales necesarios en forma manual.
- Bases de datos: Diferentes esquemas de bases donde residen la información de la configuración de los reportes, la base de datos de catálogos y la base de datos histórica con los resultados obtenidos después de la ejecución de las aplicaciones.

La metodología utilizada para la implementación del sistema (Cervantes et al, 2016) parte del modelo de tres capas como se observa en la figura 2, considerando las reglas específicas de publicación para diferentes tipos de reportes.

En la primera capa, se muestran las diferentes bases de datos utilizadas, en la capa 2 se muestran los servidores que contiene al generador de reportes y a las aplicaciones web, por último, la capa 3, que contiene a los navegadores que permiten visualizar los reportes.

La metodología utilizada para las pruebas se desarrolla en tres fases: con pruebas locales, pruebas de fábrica, y pruebas en sitio (Sanchez et al, 2017).

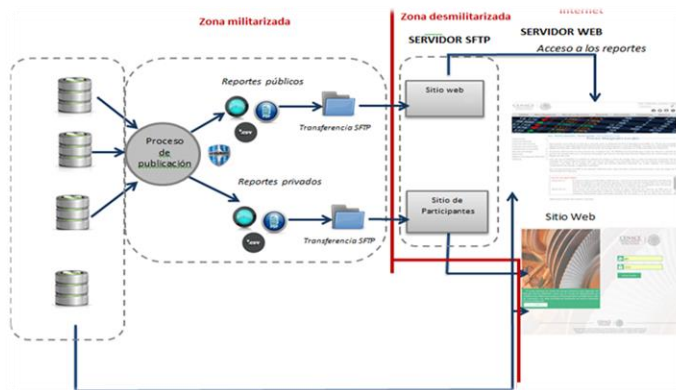


Figura 2: Arquitectura de tres capas

5. RESULTADOS

Se desarrolló e implementó un Sistema (Sanchez et al, 2017), ver la figura 3.

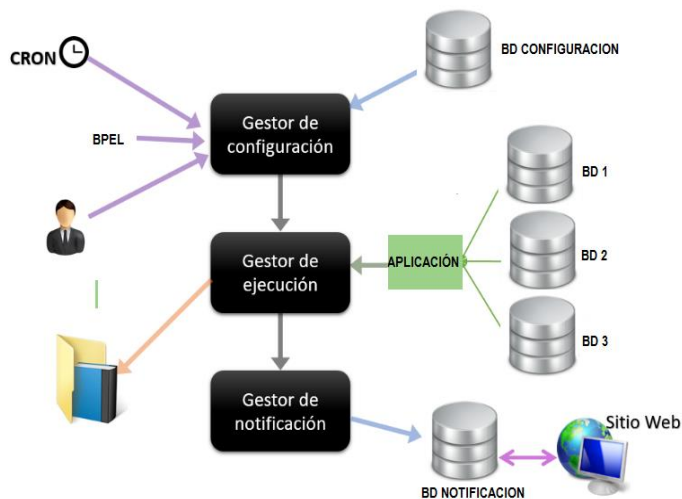


Figura 3: Modelo Conceptual del Generador de Reportes

El sistema tiene tres componentes: El gestor de configuración accede a la base de datos para obtener las representaciones de los reportes, es decir los perfiles y escenarios de reportes disponibles para el formateo de la información como para el procesamiento de la misma. el componente Gestor de ejecución de la aplicación realiza el acceso a la base de datos fuentes al momento que el reporte es creado. El gestor de notificaciones se encarga de poner a disposición la información necesaria para su publicación en la aplicación web.

El sistema desarrollado cumple con todos los requisitos en los siguientes términos y características:

- Definir un proceso para la generación automática de reportes
- Menor tiempo de generación de reportes.

- Optimizar el tamaño de los archivos de reportes generados, los reportes tienen un menor tamaño que los generados con productos comerciales.
- Contar con una estrategia para mitigar los problemas de transferencia de reportes entre los distintos equipos del sistema.
- Permitir su instalación y actualización sin afectar los reportes existentes.
- Permitir modificar el proceso de generación de los reportes sin necesidad de volver a instalar y/o actualizar la aplicación.
- Estar disponible para ser consumido por un proceso de negocio.
- Estar disponible para ser ejecutado por un usuario.
- Permitir ser utilizado para generar reportes que son generados por otra aplicación.
- Generar reportes con base en la zona horaria.
- Permitir la generación de reportes a partir de una fecha dependiendo la naturaleza de la información
- Permitir generar reportes procesando un conjunto de reglas de negocio previamente definidas.
- Permitir modificar los formatos de archivo en que son generados los reportes, sin la necesidad de reinstalar o actualizar la aplicación.

Cumple con todos los atributos de calidad, ISO/IEC 9126 (ISO 2001):

- Rendimiento
- Escalables
- Configurables.
- Facilidad y eficiencia de uso
- Ágiles en la puesta en producción
- Testeables
- Seguros
- Desplegables
- Mantenibles.

El mantenimiento del Sistema se realiza mediante nuevas extensiones para escenarios de generación y publicación. Sin afectar la generación y publicación de reportes vigentes.

El mantenimiento de los reportes administrados por el sistema se realiza mediante la modificación en base de datos de las características del perfil asociado, sin necesidad de instalar o actualizar la aplicación, como son: vigencia, datos de encabezado, consulta SQL.

Cada reporte se identifica con una firma única, por lo que la generación de reportes se puede identificar y rastrear para fines de trazabilidad y auditoría.

6. CONCLUSIONES

Los sistemas generadores de reportes comerciales analizados cumplen con los requerimientos establecidos pero los tiempos de generación de los reportes y los tamaños de los archivos generados son grandes y en algunos casos demasiado grandes (hasta 8 a 1), por lo cual se decidió por desarrollar un sistema de generación de reportes propio que cumplió con los requisitos de tiempo y tamaño adecuado y que se integre fácilmente y en forma automática al portal de la aplicación.

Con la metodología utilizada se agiliza la introducción de nuevos reportes al no tener que realizar desarrollos específicos adicionales, sólo configurarlos con base en las reglas del sistema. Al tener concentrados todos los reportes en una sola plataforma resultan tiempos de mantenimiento más cortos y consecuentemente ahorros económicos.

Por otra parte, durante el análisis en este trabajo, se pasaron por alto muchos generadores de reportes comerciales, por lo cual se puede complementar en un futuro este estudio con el análisis de otros generadores de reportes.

Es importante mencionar que la metodología descrita en este artículo es aplicada con éxito en diferentes sistemas que la Gerencia de Análisis de Redes del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias desarrolla para el Centro Nacional de Control de Energía quien es responsable de ejercer el control operativo del Sistema Eléctrico Nacional.

REFERENCES

- Cervantes Humberto, Velazco Perla, Castro Luis, (2016) Arquitectura de Software. Conceptos y ciclo de desarrollo. Ed. CENGAGE Learning.
- Gartner. (2019) Magic Quadrant for Analytics and Business Intelligence Platforms. Obtenido de: <https://cdn.gartner.com/assets/magic-quadrant-for-analytics-and-business-intelligence-platforms/2019-02/2019-Gartner-Magic-Quadrant-for-Analytics-and-Business-Intelligence-Platforms.pdf>, última consulta septiembre de 2019.
- International Organization for Standardization ISO 9126: Software Engineering – Product quality, Geneva, Switzerland. ISO 2001
- Jacobson I., Booch G. y Rumbaugh J., (2000) El Proceso Unificado de Desarrollo de Software, Pearson Educación S. A. Madrid.
- Sánchez G., García N., (2017), Especificación de Requerimientos del Sistema Generador Extensible de Reportes del Sistema de Información de Mercado (GERSIM), Gerencia Análisis de Redes, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.

Sánchez G., García N., (2017), Diseño Detallado del Sistema GERSIM -Generador Extensible de Reportes del Sistema de Información de Mercado (GERSIM), Gerencia Análisis de Redes, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.

Sánchez G., García N., (2017), Plan de Pruebas del Sistema GERSIM -Generador Extensible de Reportes del Sistema de Información de Mercado (GERSIM), Gerencia Análisis de Redes, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.

Selecthub, (2019). Best Reporting Software Tools Comparison. Obtenido de <https://selecthub.com/enterprise-reporting-system/> última consulta septiembre de 2019.

Generación de un corpus etiquetado de tweets apológicos

Araceli Alvarez-Cruz, Kenia Nieto-Benítez, Noé Alejandro Castro-Sánchez, Juan Gabriel González-Serna

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, México
e-mail: {araceli.alvarez18ca, kenianieto, ncastro, gabriel}@cenidet.edu.mx

Resumen: Los corpus lingüísticos son considerados recursos fundamentales para estudiar una lengua o una determinada variedad lingüística, especialmente en el ámbito de Lingüística Computacional. Estos han sido considerados como una colección extensa de diferentes tipos de textos de materiales escritos y/o orales en formato electrónico, debidamente recopilados que se codifican y clasifican adecuadamente para su manipulación. En este trabajo de investigación se presenta el método para generar un corpus apológico, compuesto por publicaciones de la red social Twitter mediante la librería de TwitteR, estas publicaciones fueron preprocesadas para ser etiquetadas por cinco individuos que fungieron como etiquetadores; los cuales etiquetaron los comentarios en tres clases: comentarios con contenido apológico, comentarios sin contenido apológico y una última clase llamada Indeciso, en donde no se sabe con certeza si existe una presencia o carencia del contenido. El índice Kappa se utilizó para identificar los valores de concordancia entre los etiquetadores de los comentarios del Corpus.

Palabras Clave: Creación de corpus, tweets apológicos, apología del delito, índice Kappa.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día las plataformas sociales, también conocidas como redes sociales, son consideradas como sitios o canales en donde se intercambia información, datos y contenidos de diferentes formatos con un grupo de personas y/o organizaciones, permitiendo así la fácil interacción y comunicación entre usuarios con un mismo interés.

El desarrollo de las plataformas sociales convierte Internet en un ámbito de intercomunicación personal y social popular y global. La preocupación actualmente con Internet tiene un sentido más cualitativo que cuantitativo, es decir, cómo llega la comunicación a los usuarios (Llinares, 2016); en especial, en dichas plataformas.

Una de las plataformas sociales que predomina en México es Twitter. Esta plataforma permite a sus usuarios comunicar noticias y aportar opiniones sobre algún tema en particular. La aparición y desarrollo de ese nuevo ámbito de intercomunicación ha dado lugar, en algunos casos, a fenómenos sociales que no preexistían. Por ejemplo, se ha modificado el fenómeno de la comunicación violenta y de odio, en la propagación de formas concretas de expresión y comunicación, dirigidas contra grupos definidos por su raza, religión, orientación sexual, discapacidad, etnia, nacionalidad, entre otras (Llinares, 2016).

De acuerdo al análisis de las investigaciones consultadas se concluye que la presencia de conductas apológicas existe en cualquier plataforma social; aun cuando existen algoritmos de aprendizaje automático que día a día trabajan por identificar, censurar y eliminar este tipo de contenido, existen casos que no son del todo identificados. Esto puede deberse a que los algoritmos que utilizan las plataformas posiblemente carecen de

entrenamiento para identificar ambigüedad lingüística: no logran diferenciar por completo entre un lenguaje formal y un lenguaje informal o coloquial.

Sin embargo, aunque en estas investigaciones se crearon corpus con información extraída de twitter; estos no se encuentran disponibles dentro de la literatura, lo que impide su análisis y experimentación. Por ello, se presenta la necesidad de crear un corpus con características básicas para identificar conductas delictivas, a fin de que permita ayudar futuras investigaciones.

En este trabajo de investigación se propone la creación de un corpus etiquetado de tweets apológicos, con el propósito de contar con una muestra que permita realizar un análisis de los datos de estudio. Esto permitirá realizar un análisis completo de los mismos e identificar si existe la presencia de apologías del delito en los tweets generados por los usuarios de la plataforma. Es importante mencionar que los resultados presentados en este artículo son preliminares dado que el corpus continúa en desarrollo.

El artículo está estructurado de la siguiente forma: la Sección 2, muestra algunos trabajos relacionados; la Sección 3, describe el método utilizado para la generación del corpus; la Sección 4, presenta las conclusiones de la investigación y los trabajos futuros.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Actualmente, existen pocos corpus que incluyen anotaciones de comentarios de violencia y odio. Los que se han generado, han sido a partir de comentarios en redes sociales, con el propósito de crear taxonomías y/o analizar los efectos nocivos de algunas expresiones o formas de comunicación violenta y como la comunicación ha cambiado con el uso de Internet.

Baca Y. (2014) describe un método que permite la generación de un corpus basándose principalmente en comentarios de Facebook. Para dicho corpus, se recolectaron 4,600 comentarios, de los cuales se seleccionaron palabras de criterio lingüístico explícito, conocidas como aquellas que contienen un significado emocional (positivo o negativo); estas palabras permitieron delimitar la generación del corpus.

Linares F. (2016) creó una taxonomía mediante un análisis de 250,000 tuits publicados en español, con el propósito de identificar diferentes tipologías de comunicación con contenido violento y de odio en la red social Twitter. Esa taxonomía presenta que la comunicación violenta que se observa en los tuits es de manera testimonial, debido que solo muestran expresiones de mal gusto o que afectan la sensibilidad social.

Montoro A. (2019), describe la creación de una taxonomía compuesta principalmente por discursos que presentan una comunicación violenta y de odio. El objetivo de la taxonomía fue para identificar mensajes de odio que inciten a realizar actividades de violencia o injurias contra la sociedad.

Filatova E. (2012) describe un experimento de generación de corpus en donde se recolectaron reseñas regulares y sarcásticas sobre productos de la plataforma de venta Amazon. Analizaron el uso del lenguaje que tiene como objetivo el ridiculizar, humillar o insultar, con el propósito de identificar en ellas acciones de sarcasmos en enunciados del texto.

En contraste con las investigaciones anteriores, nuestro esquema de anotación incluye comentarios que incitan al odio o violencia y permite realizar una identificación sistemática de estos comentarios.

3. MÉTODO PARA GENERAR UN CORPUS

La construcción del corpus que se presenta en este artículo se realizó mediante el método de Aguado (2018), el cual está conformado por cinco etapas (Fig. 1). El corpus generado se compone de 4,500 comentarios extraídos de la red social twitter.

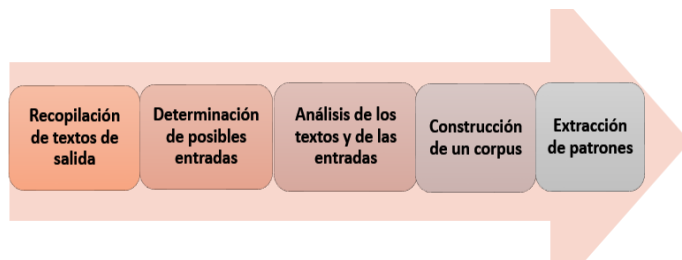


Fig. 1 Método para generar un Corpus
(Aguado de Cea, 2018)

El método está compuesto por las etapas de Recopilación de textos de salida, Determinación de las entradas, Análisis de los textos recopilados y de las entradas, Construcción de un corpus, y Extracción de patrones. Sin embargo, para la generación del corpus solo se consideraron las cuatro primeras; la extracción de patrones solo se considera si se pretende reutilizar el trabajo.

3.1 Recopilación de textos

La primera etapa del método es la recopilación de textos, la cual tiene como objetivo adquirir una gran cantidad de información. No importa tanto su validez, sino que den una muestra completa de todas las posibilidades que se pueden presentar como texto de salida aceptables.

La fuente de información seleccionada para la generación del corpus apológico fueron los comentarios generados en la red social Twitter, los que son considerados como textos de salida.

La extracción de comentarios se realizó mediante una aplicación generada en la Plataforma de Desarrolladores de Twitter, tal como se observa en la Fig. 2 con apoyo del lenguaje de programación R y de la librería de twitterR, que permite acceso a la API de Twitter.

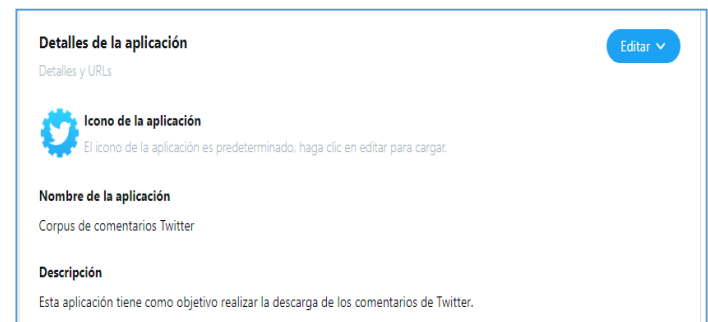


Fig. 2 Aplicación generada en la Plataforma de Desarrolladores de Twitter

La creación de la aplicación en la plataforma de desarrolladores, genera automáticamente dos claves únicas de conexión: Claves de la API de consumidor y Acceso a tokens secretos como se muestran en la Fig. 3, las cuales permiten la extracción de información de la plataforma de Twitter.



Fig. 3 Claves y acceso a tokens

Una vez obtenidas dichas claves, se continúa con la selección de la herramienta mediante la cual se extraerán los comentarios; en este caso se seleccionó el entorno de desarrollo RStudio. Se procedió con la generación de un script en RStudio, donde se determinaron los aspectos de latitud, longitud y radio cobertura

en kilómetros (Km). Estos aspectos representan el lugar de procedencia de donde se realiza la descarga; en este caso se consideraron los valores 19.4978, -99.1269, 10000 km respectivamente, los cuales permiten extraer aquellos comentarios generados en México. También, se determinó el número de comentarios a descargar y el lenguaje en que se encuentran escritos.

La Figura 4 muestra la realización del script para la descarga de los comentarios y su exportación a un documento tipo csv.

```
15 acom<-searchTwitter(" ; exclude:retweets", n=100, lang="es", geocode = "19.4978,-99.1269,10000km")
16 acom_df <- tbl_df(map_df(acom, as.data.frame))
17
18 #Exportar a csv
19 write.csv(acom_df, "comentarios.csv")
```

Fig. 4 Script en RStudio

La extracción de comentarios se realizó mediante varias descargas, algunas de ellas incluyendo palabras clave obtenidas de un análisis manual previo, en el cual se consideró la frecuencia de las palabras que comúnmente aparecen en los comentarios.

3.2 Determinación de posibles entradas

En esta etapa, se seleccionaron los posibles textos de entrada aceptados por el sistema. Las entradas deben de estar bien definidas para evitar contenido que no aporte nada a la generación del corpus.

Los textos de entrada (Tabla 1) son considerados como aquellos comentarios que fueron seleccionados porque presentan contenido apolítico en su contexto.

La estructura del corpus es: número de comentario (No.), texto del comentario (Comentario) y fecha de realización del comentario (Fecha).

Tabla 1. Comentarios extraídos de México

No.	Comentario	Fecha
1	@NicolasMaduro Muérete maldita piltrafa!!! Eres la peor mierda que ha pasado por este mundo!!	19/03/2019
2	@RoxSanchez10 No te preocupes tanto por AMLO, tú también llegarás a la muerte y qué será de ti...?	19/03/2019
3	¿Si eres ateo qué te impide salir a matar y violar todo lo quieras?	19/03/2019

El corpus está compuesto por 4,500 comentarios extraídos de la red social Twitter en diferentes intervalos de fecha que se encuentran dentro del periodo 01/03/2019 al 30/08/2019. Sin

embargo, se pretende incrementar el número de comentarios con contenido apolítico.

3.3 Análisis de los textos y de las entradas

El objetivo de esta etapa fue conseguir una comprensión detallada de las correspondencias entre los textos de salida y los datos de la fuente de información.

Asimismo, en esta etapa se realizó el preprocesado de los comentarios con el fin de obtener una limpieza de los mismos. Para esto, se utilizaron solo los datos de la columna comentario del corpus generado.

El preprocesamiento de datos engloba a todas aquellas técnicas de análisis de datos que permite mejorar la calidad de un conjunto de datos de modo que las técnicas de extracción de conocimiento/minería de datos puedan obtener mayor y mejor información (mejor porcentaje de clasificación, reglas con más completitud, entre otras.)

Con el preprocesamiento de datos se pretende que los datos a ser utilizados en tareas de análisis o descubrimiento de conocimiento conserven su coherencia (Zhang, 2003). Sobre estos comentarios se aplicaron las técnicas de *Tokenización*, eliminación de *Stopwords* y *Lematización*.

A continuación, se describen brevemente cada una de estas técnicas aplicadas a los comentarios extraídos:

3.3.1 Tokenización

Trim (2013) describe el proceso de segmentar el texto en palabras y oraciones llamados *tokens*.

En la implementación de esta técnica, se trabajó con la columna de comentarios de la Tabla 1, con el objetivo de llevar a cabo comentarios extraídos de la red social twitter pasaron por el proceso de tokenización obteniendo alrededor de 36, 000 tokens.

3.3.2 Eliminación de Stopwords

Landaeta (2014) menciona que la eliminación de Stopwords consiste en eliminar las palabras que no aportan significado o información relevante, como lo son: artículos, pronombres, algunos verbos, conjunciones, etc.

En la implementación de esta técnica en el preprocesado de los comentarios, se cargó automáticamente una lista de Stopwords, en la cual a partir de las palabras obtenidas en el proceso de tokenización se identifican y eliminan cada una de las palabras que se encuentran en la lista.

La lista de Stopwords presentada en Montesinos (2014), con la que se trabajó en el preprocesado de los comentarios, fue previamente modificada tomando en cuenta aquellas palabras que pueden ser consideradas en el análisis de los comentarios. Si se eliminan estas palabras (Tabla 2), el contexto de los comentarios cambiaría tal como se muestra en (Tabla 3) y, por

lo tanto, no se lograría identificar con certeza si un comentario está presentando o no contenido apológico.

Tabla 2. Stopwords no eliminadas.

Adverbio, preposiciones y verbos	
si	son
contra	usamos
entre	vamos
eres	tendrás
hacemos	están

Tabla 3. Ejemplo.

Texto original	Vamos a matar a los homosexuales y así hacemos un bien a la sociedad
Texto sin preposiciones Stopwords	Vamos matar homosexuales hacemos bien sociedad
Texto sin preposiciones ni Stopwords	matar homosexuales bien sociedad

3.3.3 Lematización

La lematización consiste en determinar la forma de una palabra que se constituye en *lema* (Sánchez, 2017). Otros investigadores como Gómez (2005), la definen como el proceso de eliminación automática de partes no esenciales de los términos (sufijos, prefijos) para reducirlos a su parte esencial (*lema*).

Se utilizó la librería *Freeling* para lematizar los comentarios con el objetivo de obtener la forma base de las palabras que componen a dichos comentarios. En la Tabla 4 comentarios se observa un ejemplo de los comentarios ya lematizados.

Tabla 4. Comentarios lematizados

No.	Comentario
1	nicolasmaduro muérete maldito piltrafa eres peor mierda pasado mundo
2	roxsanchez preocupar amlo también llegar muerte ser buen prianista corrupto ir directamente infierno
3	si ser ateo impedir salir matar violar querer
4	ojalar encontrar quemar vivo desgraciado ladrón mal parir cárcel no merecer merecer ser quemar
5	maldito corrupto matar

3.4 Construcción de un corpus

A partir del análisis efectuado en la etapa anterior y de los criterios previamente establecidos, en esta etapa se procedió con la generación del corpus. De tal manera que se recopilamos todos los comentarios que fueron preprocesados de manera correcta en

un archivo de texto sin formato (Tabla 5) los cuales se utilizaron en la anotación del corpus.

Es importante enfatizar que el corpus debe ser representativo con respecto al dominio de delitos apológicos y contar con la capacidad de ser modificado si en algún momento es necesario eliminar o agregar algún texto.

Tabla 5. Corpus apológico preprocesado

No.	Comentario	Fecha
1	nicolasmaduro muérete maldito piltrafa eres peor mierda pasado mundo	19/03/2019
2	roxsanchez preocupar amlo también llegar muerte ser buen prianista corrupto ir directamente infierno	19/03/2019
3	si ser ateo impedir salir matar violar querer	19/03/2019

4. VALIDACIÓN Y RESULTADOS

Una vez generado el corpus, se implementó el proceso de validación del mismo, mediante el etiquetado de una muestra de 1000 comentarios. Los comentarios fueron proporcionados en un archivo tipo csv, a un grupo de cinco individuos que fungieron como etiquetadores.

Se consideraron tres clases para el etiquetado: Apológico, No Apológico e Indeciso; por lo que los etiquetadores llevaron a cabo la lectura de cada uno de uno de los comentarios y de acuerdo a su criterio personal determinaban a que clase pertenecían dichos comentarios.

A partir de los 1000 comentarios tomados como muestra, se obtuvo como resultado que el 81.18% de ellos fueron etiquetados por los cinco individuos como comentarios con contenido apológico (Tabla 6).

Tabla 6. Resultados obtenidos

Etiquetador	Apológico	No Apológico	Indeciso	Total
E1	822	103	75	1000
E2	816	107	77	
E3	837	60	103	
E4	768	46	186	
E5	816	120	64	
Porcentaje	81.18	8.72	10.1	100

Con los resultados obtenidos se procedió a garantizar la concordancia entre los valores; mediante el coeficiente Kappa (Kohen, 1960) el cual mide el índice de concordancia y fiabilidad entre los etiquetadores.

$$k = \frac{po - pc}{1 - pc} \quad (1)$$

Donde po es la proporción de unidades en la que los etiquetadores coincidieron y pc es la proporción de unidades para las cuales se espera un acuerdo.

Para evaluar los resultados obtenidos en k se utilizó la escala presentada por Llinares (2016). Si k es inferior a 0.20 la fuerza de concordancia es pobre; entre 0.21 y 0.40 es débil; de 0.41 a 0.60 moderada; de 0.61 a 0.80 es buena; y entre 0.81 y 1.00 es muy buena.

Para esto fue necesario considerar la muestra de 1000 comentarios para comprobar que existe una alta fiabilidad en la valoración de todos y cada uno de ellos.

Se crearon cuatro grupos de dos etiquetadores quienes procedieron a la lectura de 1000 comentarios, y debían afirmar si el mensaje presentaba alguna conducta apológica, de no ser así por alguno de los dos etiquetadores, quedaba descartado.

El resultado obtenido de la muestra de 1000 comentarios fue de (0.80), la fuerza de concordancia entre los etiquetadores se clasifica como “buena” según los parámetros previamente descritos (Tabla 7).

Tabla 7. Índice Kappa

Grupo	Resultado
Grupo 1	0.81
Grupo 2	0.80
Grupo 3	0.79
Grupo 4	0.81

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El corpus apológico está compuesto por 4,500 comentarios de Twitter. Se obtuvo una muestra de 1000 comentarios para ser etiquetados en tres clases: comentarios con contenido apológico, comentarios sin contenido apológico y la tercera llamada Indeciso, en donde no se sabe con certeza si existe una presencia o carencia del contenido apológico. Se obtuvo una concordancia entre los etiquetadores de 0.80 utilizando el índice Kappa.

A diferencia de otros corpus, éste incluye comentarios que incitan al odio o violencia y permitirá realizar una identificación sistemática de estos comentarios mediante el análisis de sus contextos. Además, podrá ser utilizado para futuras investigaciones enfocadas a la identificación de conductas delictivas.

La anotación de un corpus apológico es de gran utilidad, debido que permite realizar un análisis de una muestra representativa para realizar un estudio de la lengua, es decir puede ser aplicado en áreas como la Lingüística. Una de las ventajas que ofrece trabajar con un corpus, es tenerlo almacenado y poder usarlo en cualquier momento.

Como trabajo futuro se continuará con el etiquetado de los comentarios restantes del corpus, con el propósito de implementar un algoritmo difuso que permita identificar automáticamente comentarios apológicos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado parcialmente por el gobierno de México (beca CONACYT, SNI, TecNM 7346.19-P).

REFERENCIAS

- Baca, Y. (2014). Desarrollo de un servicio web para determinar la polaridad de textos de redes sociales en español (Tesis de Maestría). *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*, pp. 52-63.
- Gómez Díaz, R. (2005). La lematización en español: una aplicación para la recuperación de información. Gijón: Trea.
- Filatova, E. (2012). Ironía y Sarcasmo: Generación y Análisis de Corpus Usando Colaboración Abierta Distribuida In *Lrec* (pp. 392-398).
- Kohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scale. *Educ Psychol Meas*, 20, 37-46.
- Landaeta G. (2014), “SEO para Google”. [En Línea]. Disponible en: <http://googleseo.marketing/seo-que-son-stop-words-palabras-vacias/>. [15 Sep. 2019]
- Llinares, F. M. (2016). Taxonomía de la comunicación violenta y el discurso del odio en Internet. IDP. *Revista de Internet, Derecho y Política*, (22), 82-107.
- Montesinos García, L. (2014). Análisis de sentimientos y predicción de eventos en twitter.
- Montoro, A. (2019). Análisis de Sentimientos para la prevención de mensajes de odio en las Redes Sociales (Trabajo de fin de grado en Ingeniería Informática). *Universidad de Castilla- La Mancha*, pp. 79-92.
- Sánchez, E. P., Blanco, J. D., González, A. O., & Domínguez, N. A. (2017). Análisis de los Procesos de Lematización Y Estemizado en Lingüística Computacional.
- Trim, C. (2018). “El arte de la Tokenización”. IBM. [En Línea] Disponible: <https://www.ibm.com/developerworks/community/blogs/nlp/entry/tokenization?lang=en>. [20 Sep. 2019]
- Zhang S., Zhang C., Yang Q. 2003 Preparación de datos para la Minería de Datos. *Inteligencia Artificial Aplicada*. 17:5-6, 375-381.

Reconocimiento de Secuencias Genéticas Promotoras usando Inteligencia Artificial

Omar Guzmán-Ruiz*. Manuel Mejía-Lavalle*. Alicia Martínez *
Yasmín Hernández **

*Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca
Morelos, 62490 MEX, (e-mail: {omarfenix, mlavalle, amartinez}@cenidet.edu.mx)

**Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Cuernavaca,
Morelos, 62490 MEX, (e-mail: yasmin.hernandez@ineel.mx)

Resumen: Se presenta un enfoque diferente de reconocer Secuencias Genéticas Promotoras mediante el uso de algoritmos de Inteligencia Artificial de clasificación supervisada. Aplicando el enfoque propuesto se logró reconocer correctamente más del 95% de los casos experimentados, los cuales fueron etiquetados previamente como secuencias “promotoras” y “no-promotoras”, a partir de una base de datos genómica del mundo real.

Palabras clave: Inteligencia Artificial, Genética, Reconocimiento de Secuencias, Secuencias Promotoras.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta un enfoque diferente para reconocer Secuencias Genéticas Promotoras mediante el uso de algoritmos de Inteligencia Artificial (IA) para clasificación supervisada. En particular se experimentó con cuatro algoritmos de clasificación y se compararon sus resultados para elegir el mejor en cuanto al éxito para predecir cuándo una secuencia es potencialmente promotora.

Aplicando el enfoque de experimentar con estos cuatro algoritmos de la IA, en particular de Aprendizaje Automático (*Machine Learning*), (Rumelhart, 1986; Quinlan, 1993; Cohen, 1995; Wu, 2019). Se logró predecir correctamente más del 95% de los casos de prueba, los cuales fueron etiquetados previamente, por expertos del área genómica, como secuencias “promotoras” y “no-promotoras”, a partir de una base de datos genómica del mundo real (Calvin, 1987).

Para desarrollar estas ideas, el artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se desarrolla el marco teórico, el cual está dividido en dos partes: 2.1 *Reconocimiento con IA*, que describe los conceptos base y los algoritmos de IA empleados en este trabajo; y 2.2 *Secuencias genómicas*, en la que se proporcionan definiciones clave en el área genómica, así como la problemática que existe en torno a las secuencias promotoras y el *data set* utilizado; la Sección 3 presenta el enfoque original que aquí se propone; la Sección 4 describe los experimentos, así como los resultados obtenidos; la sección 5 presenta las aportaciones y la Sección 6 lista las conclusiones y el trabajo futuro.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Reconocimiento con Inteligencia Artificial

Una de las áreas más añejas, pero a la vez más exitosas de la IA es la de Aprendizaje Automático o *Machine Learning*, (Bharanikumar, 2018). Esta área busca crear algoritmos que, a partir de instancias o ejemplos de datos, sean capaces de construir de manera automática un modelo que prediga la clase de una instancia desconocida (una instancia que no fue usada para crear el modelo). Normalmente la clase se refiere al atributo que se desea predecir; por ejemplo, para una base de datos médica, una instancia podría estar compuesta de un conjunto de síntomas observados en cada paciente y el atributo de clase vendría siendo la enfermedad asociada a esos síntomas. Siguiendo el ejemplo médico, si llega un nuevo paciente con síntomas distintos, el modelo creado debe ser capaz de predecir correctamente cuál es la enfermedad que tiene ese paciente.

Típicamente estos algoritmos no solamente buscan predecir la clase, sino que además construyen de manera explícita un modelo que puede ser entendido por un usuario, pues ese modelo básicamente resume el conocimiento necesario que se emplea para predecir la clase. Este modelo puede tomar diversas formas, como reglas de producción (si – un conjunto de antecedentes – entonces – una conclusión), es decir, por ejemplo: “si - fiebre y dolor de cabeza y estornudos – entonces – resfriado”. Otra forma sería un árbol de decisión o árbol inferencial, ó también pueden tener la forma de reglas de asociación o cláusulas de Horn, entre otras formas. Todas estas formas son maneras de representar el conocimiento, siendo la representación del conocimiento un tema central de la IA y de

Machine Learning. Como apunte al tema, diremos que algunos de los modelos creados por algoritmos de *Machine Learning* difieren de los modelos creados por las Redes Neuronales Artificiales (RNA), que también construyen modelos de manera automática de clasificación y predicción, pero que no muestran de manera explícita el conocimiento del modelo; en las RNA el conocimiento queda no explícito en los pesos numéricos de interconexión entre neuronas o en los umbrales numéricos de activación de cada neurona, por lo que su entendimiento no es directo.

A continuación, se hará una descripción breve de cada uno de los algoritmos de *Machine Learning* utilizados en el presente trabajo, para el lector poco familiarizado con estas técnicas; estos algoritmos están incluidos en la herramienta Weka, (Witten, 2017).

2.1.1 Árboles de inducción

Los árboles de inducción son de los algoritmos más usados en problemas de aprendizaje supervisado; existen diferentes algoritmos que permiten generar árboles de inducción como: ID3 y C4.5 (Quinlan, 1986), MDT (Cañete-Sifuentes, 2019). Un árbol de inducción es una estructura que se compone de un nodo raíz, nodos internos, hojas y arcos (Fig. 1). Los nodos internos están caracterizados por uno o varios atributos de prueba y de estos nodos se desprenden uno o más arcos. Cada uno de estos arcos tiene asociado un valor para cada atributo de prueba y estos valores determinan qué camino seguir en el recorrido del árbol. Cada hoja tiene asociada una etiqueta de clase, la cual será asociada a los objetos que lleguen a esa hoja. Como ventajas un árbol de inducción es computacionalmente rápido de construir y fácil de interpretar, por lo que hace más explícito e intuitivo la toma de decisiones.

Desventajas: las reglas o modelo generado es sensible a pequeñas perturbaciones en los datos y requiere un gran número de datos para asegurarse que la cantidad de las observaciones de los nodos es significativa.

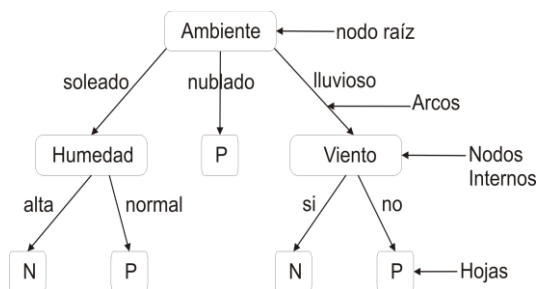


Fig. 1 Árbol de inducción.

2.1.2 Basados en Inducción de Reglas

Uno de los algoritmos de Aprendizaje Automático interpretable es el constituido por conjuntos de reglas del tipo si-entonces (if-then). El objetivo de este paradigma es el aprendizaje de un conjunto de reglas cortas, simples y comprensibles, que sirven para discriminar entre las categorías o clases del problema. Dentro de los diferentes enfoques de este

paradigma están los algoritmos DUCE propuesto por (Muggleton, 1987), FOIL (Quinlan, 2006), (Agrawal, 1993) y RIPPER (Cohen, 1995). Dentro de los algoritmos destacados de inducción de reglas se encuentra RIPPER (*Repeated Incremental Pruning to Produce Error Reduction*). Poda incremental repetida para producir reducción del error. RIPPER incluye tres etapas para el procesamiento de reglas: construcción, optimización y limpieza. En la primera etapa, un conjunto de datos de entrenamiento se divide en conjuntos incrementales y de poda. Las reglas se construyen sobre la base de un conjunto incremental. Más tarde, estas reglas se reducen con la ayuda de un conjunto de poda. En la etapa de optimización, todas las reglas se reconsideran para reducir el error en todo el conjunto de datos. En la fase de limpieza, se verifica que la última regla encontrada no sea muy “complicada” el grado de complicación de una regla viene dado por su longitud, la condición de parada se cumple si la longitud de la regla es mayor que la longitud de cierta regla más corta encontrada hasta ese momento. Las ventajas de las reglas de inducción es que son comprensibles para el ser humano y tienen una representación del conocimiento formal. Desventajas, tiempo de entrenamiento lento debido a que explora todas las alternativas.

2.1.3 Clasificador Naïve Bayes

El clasificador Naïve Bayes, (Figura 2), es un clasificador probabilístico que se basa en aplicar el teorema de Bayes.

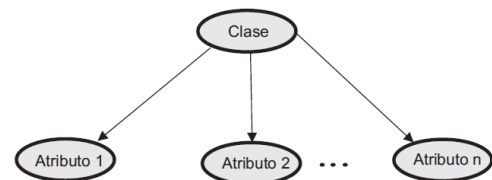


Fig. 2. Clasificador Naïve Bayes

Naïve Bayes asume la independencia de las variables predictoras dado el valor de la clase; puede garantizar una buena clasificación. Ha demostrado su eficacia en numerosos problemas de muy distinta naturaleza (Nir, 1997). Como ventaja es un clasificador fácil de interpretar y rápido de construir, tiene un buen comportamiento cuando sus atributos son independientes. Su principal desventaja es la presunción de independencia de atributos ya que no refleja el comportamiento de los datos del mundo real.

2.1.4 Redes Neuronales Artificiales

En 1958 desarrolló el Perceptron (Rosenblatt, 1958), esta es la Red Neuronal más antigua. Este modelo es capaz de generalizar una serie de patrones. Sin embargo, tiene una serie de limitaciones, su incapacidad para resolver el problema de la función OR-exclusiva y, en general, es incapaz de clasificar clases no separables linealmente. Al no poder resolver problemas con inter-dependencia como problemas de la función OR-exclusiva sirvió para que (Minsky, 1969), demostrara las

limitaciones del paradigma Perceptron y frenara el desarrollo de las redes neuronales hasta después de los años 80's. (Rumelhart, 1986) propusieron el algoritmo *backpropagation*, estimulando nuevamente la investigación y desarrollo de las Redes Neuronales. Como ventaja aprenden y mapean casos difíciles de clasificación y son tolerante a fallos, sus desventajas son que necesitan de un tiempo elevado de aprendizaje y una cantidad elevada de datos de entrenamiento además de no permitir una interpretación de lo aprendido.

2.2 Secuencias Genómicas

La *Escherichia Coli* es una célula procariota usada en diferentes experimentos de genética y biología molecular por su amplia bibliografía; la secuencia promotora de la *Escherichia Coli* (Figura 4), es una región reguladora que dirige la transcripción y puede activar o inhibir la transcripción de un gen; la transcripción es el proceso mediante el cual una secuencia de ADN es utilizada como molde para la síntesis de ARN; es el primer proceso de la expresión genética (De Guglielmo, 2016)

El ADN es la macromolécula formada por dos cadenas de polímeros complementarias, unidas entre sí; cada una de esas cadenas de polímeros se denominan cadena de ADN, y la unión de ambas, doble cadena de ADN, doble hélice o simplemente ADN. Los monómeros que conforman estas cadenas de ADN son los nucleótidos, que están compuestos a su vez por tres moléculas, que son: un grupo fosfato, unido a un azúcar (en el caso del ADN es la desoxirribosa), unido a su vez a una base, que puede ser de cuatro tipos diferentes: adenina (A), citosina (C), guanina (G) y timina (T). La unión entre dos cadenas de ADN para formar la doble hélice se realiza emparejando cada una de las bases de una cadena con una base de la otra mediante enlaces o puentes de hidrógeno, esta unión no es simétrica, sino que existe una orientación en la cadena de ADN; al extremo donde está el grupo fosfato se le llama 5' (cinco prima) y al extremo del azúcar se le llama 3'. Para que esto sea posible es necesario que las dos cadenas de ADN sean antiparalelas (esto es, que el extremo 5' de una esté junto al extremo 3' de la otra y viceversa) y complementarias; que sean complementarias significa que las bases que se tienen que unir son enlaces posibles sólo entre bases A con T y C con G (Fig. 3), (Compeau, 2016).

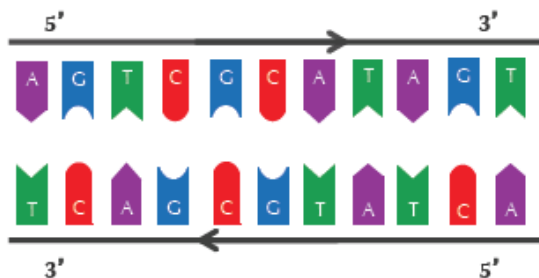


Fig. 3 Cadenas complementarias corren en direcciones opuestas (Compeau, 2016).

El proceso de inicio y fin de la transcripción están regulados por secuencias específicas de nucleótidos que son los puntos en los que el Ácido RiboNucleico Polimeraza (ARNP) debe empezar y terminar la transcripción. Los promotores y terminadores son difíciles de reconocer por los investigadores, ya que estas etapas de la transcripción conllevan una serie de cambios conformacionales en las moléculas de ADN, ARN y en la ARNP, una comparación de diferentes promotores bacterianos revela que son heterogéneos en la secuencia de ADN.

Una secuencia de nucleótidos consenso se deriva comparando muchas secuencias con la misma función básica y eligiendo el nucleótido común que se encuentra en cada posición, es decir el promedio de un gran número de secuencias de nucleótidos individuales (Fig. 4), (Compeau, 2016).

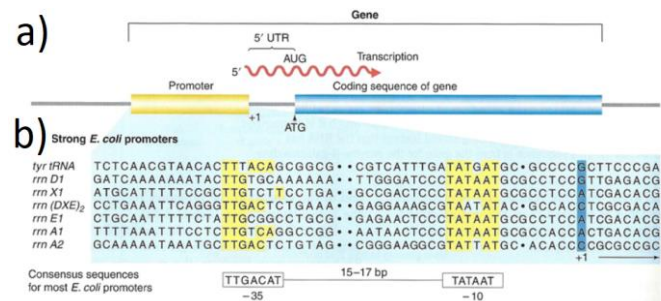


Fig. 4. a) Diagrama de un gen, b) Secuencia promotora.

En la (Fig. 4) se puede observar:

- La secuencia promotora, una región de no traducción o *untranslated region* (UTR) y la secuencia de codificación.
- Una lista de varias secuencias promotoras fuertes de *E. Coli*. La caja -35 y la caja -10 son secuencias altamente conservadas en toda la lista de promotores fuertes. Los promotores más débiles tendrán más diferencias de pares de bases en comparación con estas secuencias consenso.

3. RECONOCIMIENTO PROPUESTO

El enfoque consiste en alimentar con la base de datos de secuencias genómicas promotoras y no promotoras obtenida del repositorio (UCI, 2019) cada uno de los cuatro algoritmos de *Machine Learning* seleccionados y descritos en la Sección 2, subSección 2.1.

Se empleó la herramienta de minería de datos (Weka, 2019), la cual de salida proporciona tanto el modelo con la representación de conocimiento, como la evaluación, con diversas métricas, del grado de éxito alcanzado por el modelo al buscar predecir nuevas instancias o secuencias desconocidas. Weka tiene, entre otras métricas, las conocidas en la literatura especializada como: *Accuracy*, *Recall*, *Precision*, *F-Measure*, *AUC*, etc., las cuales miden de diferente manera qué tan bien predice la clase el modelo, basándose en el conteo total de instancias verdaderas positivas (*true positive*), falsas positivas (*false positive*), verdaderas negativas (*true negative*) y falsas

negativas (*false negative*). Incluso Weka proporciona una matriz de confusión a partir de estos conteos.

4. RESULTADOS

En esta Sección se describe el *data set* utilizado y se evalúan los algoritmos de clasificación de la herramienta (Weka, 2019), para el reconocimiento de secuencias genómicas promotoras y no promotoras, se utilizó la base de Datos del repositorio (UCI, 2019), los algoritmos a evaluar son J48, Jrip, Naïve Bayes y MultilayerPerceptron; no se hizo optimización alguna de los parámetros de los modelos, se utilizaron los parámetros por defecto; para evitar el *overfitting* en los modelos generados se utilizó el método de retención o *holdout* y *cross validation* con 4, 5 y 10 *folds*.

Data Set

El conjunto de datos usado para probar la eficiencia de los diferentes clasificadores se titula *E. Coli promoter gene sequences* (DNA) with *partial domain theory*, esta base de datos se tomó del repositorio (UCI, 2019). La base de datos se compone de 106 secuencias de ADN, cada una tiene longitud de 57 nucleótidos. La mitad de las 106 secuencias representan instancias positivas, es decir, contienen regiones promotoras, mientras que las otras 53 son instancias negativas. Las instancias positivas se alinearon de manera que el sitio de inicio de la transcripción para cada uno ocurriera a siete nucleótidos del borde derecho de la secuencia.

Cada instancia tiene tres tipos de información:

Atributo 1: “+,” indica la clase (“+” representa la clase promotora).

Atributo 2: El nombre de la instancia.

Atributos 3-59: La secuencia de ADN que contiene las cuatro letras A, T, G y C, que representan los nucleótidos que componen el ADN (A-adenina, T-timina, G-guanina, C-citosina). La posición inicial de la secuencia es -50, mientras que la posición final es +7 (con respecto al sitio en el que la ARNP se une a la secuencia de ADN).

La base de datos, se ordenó de la siguiente manera, (Figura 5), del atributo 1 al 57 la secuencia de nucleótidos, la clase el atributo 58.

ATR1	ATR2	ATR3	ATR4	ATR5	...	ATR54	ATR55	ATR56	ATR57	CLASE
c	a	t	g	t	...	g	c	t	t	NOPROMOTOR
a	a	a	t	t	...	a	g	c	g	PROMOTOR
t	t	a	c	t	...	c	g	t	t	NOPROMOTOR
t	c	g	t	t	...	c	a	t	a	PROMOTOR
t	t	c	g	c	...	t	c	t	t	PROMOTOR
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
t	g	a	a	g	...	a	t	g	g	NOPROMOTOR

Fig 5. Instancias de secuencias promotoras y no promotoras.

La Tabla 1 muestra los resultados de la evaluación de los clasificadores utilizando el método *holdout* (Japkowicz, 2011), separando un conjunto de entrenamiento del 75% y uno de prueba del 25%, también se evaluó con el 80% para entrenamiento y el 20% para prueba, con los clasificadores J48 y Jrip para el *holdout* de 80% y 20% se observa una diferencia

de *accuracy* de más del 15% entre el subconjunto entrenamiento y el de prueba.

El algoritmo de clasificación Jrip utilizando el metodo *holdout* con 80% para entrenamiento produce seis reglas con los atributos 4, 6, 10, 16, 17, 19, 20, 33 y 45, descritas a continuación:

(ATR16=t)and(ATR6=a)=>CLASE=PROMOTOR (30/0)
 (ATR17=g)and(AT33=t)=>CLASE=PROMOTOR (15/2)
 (ATR19=c)and(ATR20=a)=>CLASE=PROMOTOR(5/0)
 (ATR16=t)and(ATR4=g)=>CLASE=PROMOTOR (4/1)
 (ATR45=c)and(ATR10=a)=>CLASE=PROMOTOR(2/0)
 => CLASE=NOPROMO(50/0)

La Tabla 2 muestra los resultados de *accuracy* con validación cruzada de 4, 5 y 10 partes o *folds*; en esta Tabla se observa que el clasificador *Multilayer Perceptron* obtuvo la mejor clasificación para 4, 5 y 10 *folds*, el clasificador J48 y Jrip tienen ligeras variaciones dependiendo del número de *folds* y el Naïve Bayes genera un modelo mas estable, manteniendo la misma *accuracy* para 4, 5 y 10 *folds*.

La Tabla 3 muestra los resultados de la medida *F-measure* con validación cruzada de 4, 5 y 10 *folds*, se observa que los clasificadores J48 y Jrip obtienen porcentajes similares.

La Tabla 4 muestra los resultados del área bajo la curva AUC con validación cruzada de 4, 5 y 10 *folds*; el clasificador Naïve Bayes y el *Multilayer Perceptron* obtienen los puntajes más elevados para los diferentes *folds*, de todos los clasificadores, el clasificador Jrip para 4 *folds* obtiene el resultado inferior con sólo 0.571 de AUC.

TABLA 1 Resultados Accuracy holdout

Clasificador	ACCURACY(%)			
	75% Training	25% Test	80% Training	20% Test
J48	92.4	70.37	94.11	71.42
Jrip	93.67	77.77	96.47	80.95
NaïveBayes	100	92.59	98.82	95.23
MultilayerPerceptron	100	96.29	100	95.23

TABLA 2 Resultados Accuracy cross validation

Clasificador	ACCURACY(%)		
	4 FOLDS	5 FOLDS	10 FOLDS
J48	79.24	83.01	81.13
Jrip	78.3	78.3	77.35
NaïveBayes	90.56	90.56	90.56
MultilayerPerceptron	93.39	93.39	93.39

TABLA 3 Resultados F-measure cross validation

Clasificador	F-MEASURE(%)		
	4 FOLDS	5 FOLDS	10 FOLDS
J48	79.2	83	81.1
Jrip	78.3	78.3	77.3
NaïveBayes	90.6	90.6	90.6
MultilayerPerceptron	93.4	93.4	93.6

TABLA 4 Resultados AUC cross validation

Clasificador	AUC		
	4 FOLDS	5 FOLDS	10 FOLDS
J48	0.813	0.853	0.829
Jrip	0.571	0.788	0.785
NaïveBayes	0.969	0.965	0.967
MultilayerPerceptron	0.976	0.983	0.983

5. APORTACIONES

Las aportaciones de este artículo son:

- La obtención de conocimiento de BDs genéticas con técnicas de Machine Learning.
- Se recomienda usar Redes Neuronales Artificiales para la clasificación de secuencias promotoras para la obtención de mejores resultados.
- La comparación de métodos de caja negra vs caja blanca.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Las herramientas de Aprendizaje Automático pueden reconocer patrones en datos genómicos, que son difíciles de identificar sin métodos computacionales.

La evaluación experimental de los modelos de Aprendizaje Automático que generan reglas, aplicado a secuencias promotoras, puede ayudar a encontrar secuencias de consenso, las secuencias consenso tienen nucleótidos comunes en la misma posición, los clasificadores J48 y Jrip de la herramienta Weka, encontraron como atributos discriminatorios para generar las reglas, atributos que corresponden a secuencias consenso en posición y cantidad.

Los métodos basados en Redes Neuronales Artificiales obtuvieron mejor clasificación que los métodos basados en reglas, con estas se logró reconocer el 95% de los casos experimentados, con la desventaja que no sabemos cuáles son los atributos discriminatorios.

Como trabajo futuro se hará una comparación con otros enfoques que no presenten o expresen sus resultados como conocimiento, además se evaluarán diferentes clasificadores en subconjuntos contiguos para encontrar secuencias consenso; también se experimentará con data sets más grandes.

AGRADECIMIENTOS

Al TecNM/CENIDET y al CONACyT las facilidades y beca otorgadas para el desarrollo del presente trabajo.

REFERENCIAS

- Agrawal, R., Imielinski, T, Swami, A. (1993). Database mining: A performance perspective. *IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering* 5 (6): 914-925.
- Bharanikumar Ramit, Keshav Aditya R. Premkumar. (2018). PromoterPredict: sequence-based modelling of Escherichia coli s70 promoter strength yields logarithmic dependence

- between promoter strength and sequence. *PeerJ* 6:e5862; DOI 10.7717/peerj.5862
- Calvin B. Harley and Robert P.Reynolds. (1987). Analysis of E. coli promoter sequences. *Nucleic Acids Research* Volume 15 Number 5,
- Cañete-Sifuentes Leonardo, Raúl Monroy, Miguel Angel Medina-Pérez, Octavio Loyola-González, and Francisco Vera Voronisky. (2019). Classification Based on Multivariate Contrast Patterns. *IEEE Access* Volume:7. Pages 55744 – 55762
DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2913649
- Cohen William W. (1995). Fast Effective Rule Induction Machine Learning. *Proceedings of the Twelfth International Conference ML*
- Compeau Phillip and Pavel Pevzner. (2016) Bioinformatics Algorithms: *An Active Learning Approach* 2nd Edition, Vol. I; Active Learning Publishers, LLC
- Nir Friedman. (1997) Bayesian Network Classifiers. *Machine Learning*, 29, 131–163 Kluwer Academic Publishers. Manufactured in The Netherlands.
- Furnkranz J (2017) *Rule Learning Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining* ed C Sammut, G I Webb (Boston, MA: Springer)
- Japkowicz Nathalie, Mohak Shah. (2011). Evaluating Learning algorithms: *A classification perspective*. Cambridge University Press.
- Minsky Marvin, Seymour Papert. (1969). Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry. *The M.I.T. Press*, Cambridge, Mass.
- Muggleton H. (1987). Duce, an oracle based approach to constructive induction. *InIJCAI-87*, pages 287–292. Kaufmann.
- Quinlan, J.R. (1986) Induction of decision trees. *Machine Learning* pp 81–106. <https://doi.org/10.1007/BF00116251>
- Quinlan, J. (1993). *C4.5: Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo California.
- Quinlan J, Cameron Jones. (1993). *FOIL a midterm Report*. University of Sydney.
- Rosenblatt F. (1958) The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. *Psychological review* vol. 65, No. 6.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., and Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323, 533-536.
- Witten I H, Frank E, Hall M and Pal C. (2017). *Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Cambridge, Morgan Kaufmann.
- Wu J. and Y. Zhao. (2019). Machine learning technology in the application of genome analysis: A systematic review, *Gene* 43821, <https://doi.org/10.1016/j.gene.2019.04.062>
- UCI (2019) <https://archive.ics.uci.edu/ml/machine-learning-databases/molecular-biology/promoter-gene-sequences/> consultado en 20/09/2019
- Weka (2019) <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/> consultado en 20/09/2019

Reconstrucción Automática de Rutas Utilizando Modelos de Datos de una Plataforma de Internet de las Cosas

León Alberne Torres Restrepo*, Fabio Alberto Vargas Agudelo**, Javier Ortiz-Hernández* and Alicia Martínez Rebollar*

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, México
{amartinez, leontorres16c, ortiz}@cenidet.edu.mx

** Tecnológico de Antioquia, Cl. 78b #72A-220, Medellín, Colombia
fvargas@tdea.edu.co

Resumen: El desarrollo de aplicaciones en el área de movilidad y transporte requiere de una definición previa de las características de los diversos tipos de vialidades. Actualmente, existen diversas aplicaciones y dispositivos móviles que permiten almacenar el conjunto de coordenadas GPS para realizar el trazado de la ruta. Sin embargo, la precisión de las mismas es baja debido a las limitaciones técnicas de los dispositivos móviles utilizados. En este trabajo de investigación se presenta un método para realizar la reconstrucción automática de una ruta utilizando un dispositivo móvil. El método propuesto se apoya tanto en las características de las plataformas de georreferenciación como en las características de los dispositivos móviles para reconstruir una ruta a partir de un conjunto de coordenadas GPS previamente dado. Este método utiliza algunos de los modelos de datos de la especificación NGSI (*Next Generation Service Interface*) de una plataforma de Internet de las cosas denominada FIWARE para hacer un etiquetado de la ruta reconstruida. Durante las pruebas realizadas se observó que es posible realizar la reconstrucción de los recorridos y ajustarlos a la geometría definida por algunas de las plataformas comerciales de geo-referenciación.

Palabras clave: Trazado de rutas, Generación automática de rutas, Etiquetado de rutas.

1. INTRODUCCIÓN

La definición del trazado de carreteras y caminos en función de sus coordenadas GPS hace posible el desarrollo de diversas aplicaciones, las cuales implementan funcionalidades como: ubicación de puntos de interés, seguimiento y monitoreo de vehículos, sistemas de navegación, etc. Algunas de estas aplicaciones, como es el caso de las enfocadas en navegación, son utilizadas cotidianamente por las personas para guiarse cuando se desplazan de un lugar a otro[1]. Durante la navegación y respecto al trazado de la ruta, llama la atención, que los puntos generalmente van pintados sobre la línea que delimita la vía. Sin embargo, en algunos casos los puntos son marcados fuera de la vía por la que se realiza el recorrido, incluso pueden ser trazados en otras áreas. Este comportamiento generalmente se debe a la calidad del dispositivo con el cual se toma la geo-posición, y a las características de operación propias de los sistemas de geo-posicionamiento, que en ocasiones impiden la obtención de una geometría aproximada a la vialidad por la cual se realizó el recorrido. Esta problemática es generalmente cubierta con la utilización de plataformas como OpenStreetMap[2] o Google Maps[3] que cuentan con una representación muy completa y precisa del sistema vial de la mayoría de regiones. Sin embargo, existen rutas o caminos que aún no se encuentran definidas en estas plataformas, ya sea porque son de difícil

acceso o porque al momento del levantamiento de los datos no existían.

En este trabajo se presenta un método que permite reconstruir una ruta a partir de las coordenadas GPS recolectadas de un recorrido realizado previamente. El método tiene el propósito de reconstruir una ruta específica y generar un trazado que represente el mismo recorrido utilizando el mínimo de coordenadas posibles, lo cual permite eliminar puntos redundantes, mejorar el rendimiento computacional y obtener un trazado de la ruta más limpio. Además, este método se apoya en algunos servicios de Google Maps para homologar la representación obtenida del recorrido realizado con la geometría que representa el mismo camino en la plataforma de Google Maps. Una vez que se obtiene la nueva representación, se etiqueta la geometría del recorrido realizado.

La estructura del presente trabajo es la siguiente: en la sección 2 se presentan los trabajos relacionados, en la sección 3 se realiza una introducción a FIWARE y la especificación NGSI, en la sección 4 se presenta el método para la reconstrucción automática de rutas, en la sección 5 se describen los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

La calidad de una ruta trazada partir de un conjunto de puntos GPS depende de diversos factores como: el entorno, el área en

la que se toma la lectura o la calidad y precisión del dispositivo utilizado para tomar los datos[4]. En este sentido hay dos aspectos importantes a tener en cuenta: el primero es que las coordenadas utilizadas para generar los mapas de plataformas como Google Maps, OpenStreetMap o entidades de gobierno son tomadas con dispositivos de alta precisión. La segunda es que los servicios de ubicación GPS en dispositivos móviles como los teléfonos inteligentes son de tipo recreativo, por lo que su margen de error es más alto, lo cual dificulta la reconstrucción de rutas a partir de los datos tomados de este tipo de dispositivos.

Existen aplicaciones móviles o desarrollos propios en teléfonos inteligentes que permiten almacenar el conjunto de coordenadas GPS obtenidas al momento de realizar un determinado recorrido[5][6]. Sin embargo, observamos en pruebas de campo, que al tratar de trazar el recorrido que representa este conjunto de coordenadas, varios de los puntos se encuentran distantes de la línea que representa el camino sobre el que se realizó el recorrido. Además, según sea la frecuencia de muestreo del dispositivo y la velocidad a la que se realiza el desplazamiento, se pueden generar una cantidad considerable de coordenadas en una distancia relativamente corta [7] [8]. Estos dos aspectos pueden llegar a ser una limitante en los casos que se desea construir un dataset de rutas o hacer una segmentación de las mismas para propósitos específicos.

3. FIWARE Y LA ESPECIFICACIÓN NGSI

FIWARE es una plataforma de software abierto para el que nace como una iniciativa impulsada por un conjunto de empresas tecnológicas y la Comisión Europea [9]. Esta plataforma proporciona un conjunto de herramientas y componentes genéricos, los cuales ofrecen interfaces que facilitan tareas como: integración de los dispositivos de Internet de las Cosas; análisis y procesamiento de datos a mediana y gran escala (Big Data); o incorporación de interfaces avanzadas para la interacción con los usuarios. Estas interfaces son públicas y gratuitas para facilitar el desarrollo de Aplicaciones Inteligentes en diversos sectores. Una característica de esta plataforma es que permite el acceso a la información de contexto independientemente de la fuente que la genera, para lo cual se apoya en la especificación NGSI [10].

La especificación NGSI se basa principalmente en un modelo de datos que integra la noción de entidad de contexto y una interfaz para el intercambio de información. Los modelos de datos bajo la especificación NGSI están conformados por tres elementos principales: entidades, atributos y metadatos. Las entidades son el centro de los modelos de datos y representan a cualquier objeto físico o abstracto. Los atributos son el conjunto de características que describen a la entidad y los metadatos son el conjunto de características que definen a los atributos. Ver Figura 1.

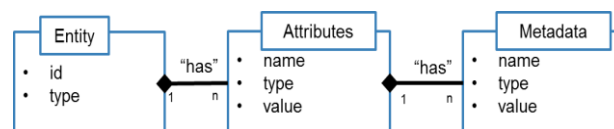


Figura 1 - Elementos principales de los modelos de datos en la especificación NGSI.

La interfaz para el intercambio de datos se basa en una API que gestiona todo el ciclo de vida de la información de contexto facilitando tareas como: actualización, consulta, registro y suscripción a la información.

4. METODO PARA LA RECONSTRUCCIÓN AUTOMÁTICA DE RUTAS

El método presentado en este trabajo se centra en la reconstrucción automática de una ruta a partir del conjunto de coordenadas GPS obtenidos en un recorrido previo. El conjunto de coordenadas es tratado utilizando la técnica de diezmado de datos para crear diferentes conjuntos de coordenadas que corresponden a distintas representaciones de una misma ruta. Una vez, que se obtienen las diferentes representaciones de la ruta, se selecciona una de ellas y se utiliza el servicio de Google Maps para obtener la geometría correspondiente a la representación seleccionada. El método propuesto puede ser utilizado en transporte inteligente para la reconstrucción de rutas personalizadas, para el seguimiento de mercancías en regiones apartadas, para el ingreso de nuevas rutas o caminos en servicios de mapas como el de OpenStreetMap, para la disminución de costes en las aplicaciones que utilizan el servicio de consulta de Google, etc. El método para la reconstrucción automática de rutas está compuesto por 6 pasos: 1) carga del conjunto de coordenadas GPS, 2) diezmado de los datos, 3) reconstrucción aproximada de la ruta, 4) obtención de geometría del servicio de Google Maps, 5) reducción de la geometría obtenida y 6) etiquetado de la ruta.

Carga de coordenadas. En este paso se toma el conjunto de coordenadas que corresponde a un determinado recorrido. Este conjunto puede estar contenido en una lista o en un archivo de tipo CSV. Cada registro debe estar compuesto por los datos correspondiente a la longitud, latitud, precisión horizontal y fecha respectivamente. En este paso se obtiene la geometría original del recorrido realizado, pero no se le realiza ningún tratamiento.

Diezmado de los datos. En este paso lo que se busca es la misma representación del recorrido, pero con un conjunto menor de coordenadas. Para lograr esto, se hace uso de la técnica de diezmado de datos. En este caso en particular, se toma el primer registro y a partir de éste se toman los registros en múltiplos de n , donde n representa el número de registros que se tomarán después de tomar el anterior. La razón por la que se reduce el conjunto de coordenadas es porque de esa manera, solo una n -ésima parte del conjunto de coordenadas será suficiente realizar el proceso de reconstrucción de la ruta.

Reconstrucción aproximada de la ruta. En este paso lo que se busca es obtener el conjunto mínimo de coordenadas que pueden representar la misma geometría del recorrido realizado. A diferencia del diezmo de datos, los registros del conjunto resultante no necesariamente están en posiciones equidistantes dentro del conjunto. Esto se debe a que en los segmentos rectos sólo se conserva el punto inicial y final del segmento. El objetivo de reducir el conjunto de coordenadas es disminuir el conjunto de puntos que serán enviados al servicio de Google Maps, dado que el costo generado por este servicio está en función del número de puntos que se consultan y no en el número de puntos que retorna. El criterio para seleccionar los puntos que deben ser incluidos se toma con base en el ángulo entre segmentos y la distancia perpendicular de todos los puntos contenidos entre el punto inicial y el punto final del segmento que se está evaluando. Cuando el ángulo entre segmentos es mayor al ángulo establecido, se guarda el segmento anterior y se continúa el análisis a partir del análisis actual.

Obtención de la geometría del servicio de Google Maps. Las carreteras y caminos mostrados en los mapas de Google corresponden a un trabajo previo, en el cual éstos fueron georreferenciados con equipos especializados. Google ofrece un servicio que permite obtener la geometría guardada en sus bases de datos para un determinado camino. En este paso lo que se hace es pasar el conjunto de puntos obtenidos en el paso anterior para obtener la geometría de Google que representa al recorrido realizado. Este proceso puede hacerse con el conjunto de coordenadas iniciales, pero se tienen las siguientes limitaciones: el costo del servicio es realizado con base en el número de coordenadas consultadas, pueden presentarse imprecisiones cuando los puntos proporcionados en el conjunto de coordenadas original están dispersos y no es posible obtener una geometría de caminos o vías que no están dados de alta en la plataforma de mapas de Google.

Reducción de la geometría obtenida. En este paso se toma el conjunto de datos obtenido del servicio de Google Maps y se reduce la geometría al conjunto de coordenadas mínimas requeridas para representar el recorrido realizado. Esto se hace con el fin de disminuir el tamaño y por ende el peso de los datos que serán almacenados. En este punto se tiene por lo menos la definición de dos geometrías que representan el recorrido realizado. Una de las geometrías representa una aproximación del recorrido obtenido del conjunto de datos original. La otra de las geometrías representa el recorrido realizado aproximado a la geometría que representa ese mismo recorrido en los servicios de Google Maps.

Etiquetado de la ruta. Este es el último paso del método. En este paso se etiqueta la ruta a la que pertenece la geometría y además se guarda la geometría. Para guardar la geometría se hace uso de los modelos de datos Road y RoadSegment que hace parte de la plataforma FIWARE[11]. En el apéndice 1 se

muestra un ejemplo de una instancia del modelo *Road* y *RoadSegment*.

5. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO PARA LA RECONSTRUCCIÓN AUTOMÁTICA DE RUTAS

El método propuesto fue utilizado en el marco del proyecto SmartSDK security para trazar rutas y geo-posicionar los eventos de riesgo detectados (velocidad excesiva, conducción en sentido contrario y paradas repentinas). La experimentación se realizó por un periodo de 14 meses y se realizaron más de 100 recorridos en zonas rurales y urbanas. Los recursos utilizados en el proceso de experimentación fueron: tres teléfonos inteligentes (ZTE Blade V6, un Samsung Galaxy J4 y un Motorola Moto G5), una computadora portátil para Gamer ASUS (Core i7, 8GB, 1TB, NVIDIA GeForce GTX 1050) y dos máquinas virtuales alojadas en la plataforma FIWARE Lab nodo México. Además, los experimentos se realizaron en diferentes medios de transporte público y particular. La frecuencia de toma de los datos fue de 1Hz y por cada recorrido se generó un archivo CSV que contenía la estructura mencionada anteriormente. A manera de ejemplo se describe el proceso ejecutado sobre uno de los recorridos realizado en Cuernavaca.

El primer paso es adquirir los datos del recorrido y almacenarlos en un archivo plano como se muestra en la Figura 2.

```
-98.94985288,18.81145445,6.30219488715E11,2018-5-20T1:31:54.575-0500
-98.94975761,18.81134331,6.3121962335E11,2018-5-20T1:31:55.575-0500
-98.94962104,18.81146357,6.32222281735E11,2018-5-20T1:31:56.577-0500
-98.94979807,18.81155255,6.36216345328E11,2018-5-20T1:32:0.571-0500
-98.94980453,18.81143594,6.63828475629E11,2018-5-20T1:32:28.184-0500
-98.94980012,18.81142619,6.64801410108E11,2018-5-20T1:32:29.156-0500
-98.94979778,18.81143156,6.65799623077E11,2018-5-20T1:32:30.155-0500
-98.94973713,18.81131837,6.66796368441E11,2018-5-20T1:32:31.151-0500
-98.94976203,18.81136184,6.67791391774E11,2018-5-20T1:32:32.146-0500
-98.94976312,18.81136404,6.68811495055E11,2018-5-20T1:32:33.167-0500
-98.94981487,18.81148114,6.69799974533E11,2018-5-20T1:32:34.155-0500
-98.94979276,18.81143282,6.70797896096E11,2018-5-20T1:32:35.153-0500
-98.9497984,18.81144503,6.71801176876E11,2018-5-20T1:32:36.156-0500
-98.9497984,18.81144543,6.72789724949E11,2018-5-20T1:32:37.145-0500
```

Figura 2 - Ejemplo archivo de coordenadas GPS del recorrido.

El segundo paso es graficar la ruta en el mapa para tener una idea visual del recorrido realizado. En la figura 3 se muestra la representación para el recorrido seleccionado. La gráfica izquierda corresponde al recorrido original y la derecha a una ampliación de una parte del recorrido original. Como se muestra en la figura 3, mientras que las líneas de la primera gráfica se encuentran muy cercanas a la vía, las líneas de la segunda gráfica están fuera de la geometría de la vía del mapa de Google en muchos puntos.

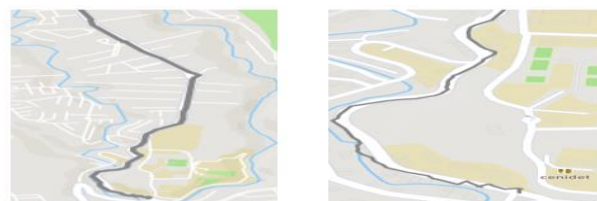


Figura 3 - Representación del recorrido original.

El paso siguiente es diezmar la señal, en la figura 4 se muestra la estructura del archivo plano después de reducir el conjunto de datos original con un diezmo de 15 y en la figura 5 se presenta el mapa correspondiente al nuevo conjunto de datos. Además, en la imagen 4 se puede observar que cada registro presenta la misma coordenada en diferentes formatos, esto se hace para facilitar el uso de diferentes servicios de geolocalización.

```
-98.94985288|18.81145445
|[18.81145445,-98.94985288]|[-98.94985288,18.81145445]|{lat:18.81
145445 , lng:-98.94985288}|18.81145445,-98.94985288
|-98.94985288,18.81145445}|3.3399999141693115|630219488715.0|
2018-5-20T1:31:54.575-0500
-98.94985669|18.81159913
|[18.81159913,-98.94985669]|[-98.94985669,18.81159913]|{lat:18.81
159913 , lng:-98.94985669}|18.81159913,-98.94985669
|-98.94985669,18.81159913}|0.0|679798048332.0|
2018-5-20T1:32:44.153-0500
```

Figura 4 - Formato de los datos después de realizar la reducción del conjunto de registros.



Figura 5 - Aproximación de la ruta después de realizar el diezmo de los registros.

Como se puede observar en la figura 5, al aplicar un diezmo de los datos originales se obtiene una aproximación de la geometría de la vía, más cercana a la geometría del servicio de google. Después de obtener el nuevo conjunto de rutas se procedió a obtener la geometría del servicio de google, en la figura 6 se presenta un ejemplo de los datos obtenidos del servicio de Google. Así mismo, en la figura 7 se muestra la geometría correspondiente a los datos de la imagen anterior. Como se puede observar la geometría obtenida está bien alineada con las calles que se muestran en el mapa.

```
18.849252419052124|-98.95419606511223|ChIJs-R2RuxuzoUR8FCuPXtv-5c
18.84913778965436|-98.95402915457268|ChIJs-R2RuxuzoUR8FCuPXtv-5c
18.8490335|-98.9538773|ChIJs-R2RuxuzoUR8FCuPXtv-5c
18.8490335|-98.9538773|ChIJkVFcEexuzoURVigovltDrA
18.8489626|-98.95377409999999|ChIJkVFcEexuzoURVigovltDrA
18.84892607076659|-98.95372436035998|ChIJkVFcEexuzoURVigovltDrA
18.848862500000003|-98.95363780000001|ChIJkVFcEexuzoURVigovltDrA
18.848627156143486|-98.95330789101618|ChIJkVFcEexuzoURVigovltDrA
18.848275123018453|-98.95281440829625|ChIJkVFcEexuzoURVigovltDrA
18.848023960566184|-98.9524623292336|ChIJkVFcEexuzoURVigovltDrA
18.8479434|-98.95234939999999|ChIJkVFcEexuzoURVigovltDrA
18.8479434|-98.95234939999999|ChIJlEa_-tuzoURbBR-nRHLyH
18.84788503401746|-98.95226517448603|ChIJlEa_-tuzoURbBR-nRHLyH
18.8478039023839|-98.95214809699908|ChIJlEa_-tuzoURbBR-nRHLyH
18.847472800000002|-98.9516703|ChIJlEa_-tuzoURbBR-nRHLyH
18.847472800000002|-98.9516703|ChIJUqM8WeluzoURdhR-nRHLyH
```

Figura 6 - Extracto del conjunto de coordenadas obtenidas de google para una geometría específica.

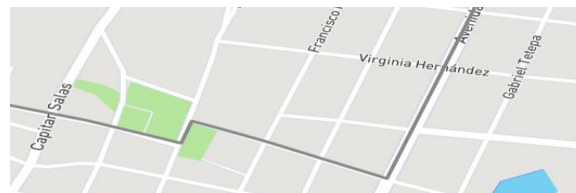


Figura 7 - Representación de la geometría obtenida de del servicio de Google

Por último, las geometrías obtenidas del recorrido realizado son etiquetados utilizando los modelos de datos *Road* y *RoadSegment* de la especificación NGS v2. La razón para utilizar esta especificación es que beneficia el intercambio de información entre diferentes aplicaciones y plataformas.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El trabajo realizado muestra que es viable utilizar el método propuesto para reconstruir automáticamente una ruta realizada en un determinado recorrido a partir de las Coordenadas GPS y realizar una aproximación muy cercana a la geometría definida por servicios como el de Google Map. Así mismo, el método propuesto puede ser utilizado en diferentes áreas como puede ser el seguimiento de mercancías, o el trazado de nuevas rutas.

El método desarrollado puede ser implementado en la plataforma FIWARE u otra plataforma y dado que trabaja con datos históricos, la fuente de toma de datos puede ser cualquiera, siempre que el conjunto de datos corresponda a coordenadas GPS de un recorrido realizado.

Este método útil en transporte inteligente para obtener las geometrías de las rutas que aún no están georreferenciadas en los servicios de los mapas. En estos casos, hay que tener en cuenta que la precisión de la representación obtenida va a depender de la calidad y precisión de las coordenadas obtenidas en el recorrido original. Además, el trazado de la ruta puede ser de baja calidad si hay desconexiones o pérdidas de señal del GPS.

Una desventaja del método propuesto es que no realiza ningún tipo de interpolación para completar las coordenadas faltantes cuando hay desconexión o lecturas tardadas del GPS. Sin embargo, este problema se resuelve en la mayoría de los casos, al momento de obtener la geometría del servicio de google dado que el servicio retorna el conjunto completo de coordenadas que representan el recorrido.

Como trabajos futuros se plantea la modificación del algoritmo para que sea capaz de posicionar automáticamente puntos de interés en una determinada ruta. Además, sería interesante explorar alternativas que disminuyan la dependencia del servicio de Google Maps para obtener coordenadas de precisión.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada parcialmente por el proyecto SmartSDK, Num Ref. 272727, así como el proyecto TecNM/CENIDET, Num Ref. 5138.19-P.

REFERENCIAS

- [1] J. Wahlstrom, I. Skog, and P. Handel, "Smartphone-Based Vehicle Telematics: A Ten-Year Anniversary," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017.
- [2] "API - OpenStreetMap Wiki." [En línea]. Obtenido de: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/API>. [Consultado: 09-Nov-2019].
- [3] "API de Geolocation | Google Maps Platform | Google Cloud." [En línea]. Obtenido de: <https://cloud.google.com/maps-platform/?hl=es-419>. [Consultado: 09-Nov-2019].
- [4] H. M. Ali and Z. S. Alwan, "Car Accident Detection and Notification System Using Smartphone," *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput.*, vol. 44, no. 4, pp. 620–635, 2015.
- [5] M. Pielot, K. Church, and R. de Oliveira, "An In-Situ Study of Mobile Phone Notifications," *Proc. MobileHCI '14*, pp. 233–242, 2014.
- [6] J. Goncalves, J. S. V. Goncalves, R. J. F. Rossetti, and C. Olaverri-Monreal, "Smartphone sensor platform to study traffic conditions and assess driving performance," in *2014 17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2014*, 2014, pp. 2596–2601.
- [7] S. D. Bersch, D. Azzi, R. Khusainov, I. E. Achumba, and J. Ries, "Sensor data acquisition and processing parameters for human activity classification," *Sensors (Basel)*, vol. 14, no. 3, pp. 4239–4270, 2014.
- [8] T. W. Rife and J. A. Poland, "Field book: An open-source application for field data collection on android," *Crop Science*, vol. 54, no. 4. The Crop Science Society of America, Inc., pp. 1624–1627, 2014.
- [9] FIWARE, "ABOUT US » FIWARE," 2016. [En línea]. Obtenido de: <https://www.fiware.org/about-us/>. [Consultado: 09-Nov-2019].
- [10] FIWARE, "fiware-ngsiv2." [En línea]. Obtenido de: <http://fiware.github.io/specifications/ngsiv2/stable/>. [Consultado: 09-Nov-2019].
- [11] "dataModels / specs / Transportation at master · smartsdk / dataModels · GitHub." [En línea]. Obtenido de: <https://github.com/smartsdk/dataModels/tree/master/specs/Transportation>. [Consultado: 09-Nov-2019].

Apéndice A. EJEMPLO INSTANCIA MODELO DE DATOS ROAD Y ROADSEGMENT

```
{
  "id": "Road-A62",
  "type": "Road",
  "refRoadSegment": {
    "type": "Relationship",
    "value": [
      "RoadSegment-A62-0-150",
      "RoadSegment-A62-150-355"
    ]
  },
  "alternateName": {
    "value": "E-80"
  },
  "name": {
    "value": "A-62"
  }
}

{
  "id": "RoadSegment-A62-0-150",
  "type": "RoadSegment",
  "endPoint": {
    "value": {
      "type": "Point",
      "coordinates": [-4.5516, 41.8570]
    }
  },
  "startPoint": {
    "value": {
      "type": "Point",
      "coordinates": [-4.7299, 41.6844]
    }
  },
  "location": {
    "type": "geo:json",
    "value": {
      "type": "LineString",
      "coordinates": [
        [-4.7299, 41.6844],
        ...
        [-4.5516, 41.8570]
      ]
    }
  },
  "minimumAllowedSpeed": {
    "value": 60
  },
  "refRoad": {
    "type": "Relationship",
    "value": "Road-A62"
  },
  "maximumAllowedSpeed": {
    "value": 120
  }
}
```

Controversias en Torno a la Inteligencia Artificial y sus Verdaderos Retos

Alejandro Aranda, José A. Arizmendi, Katia R. Benítez, José A. Corona, Roberto Munguía, Rances O. Sánchez,
Manuel Mejía Lavalle

Tecnológico Nacional de México / CENIDET

Cuernavaca, Morelos, México;

*e-mail: {alejandro.aranda19ca, jose.arizmendi19ca, katia.benitez19ca, jose.corona19ca, roberto.munguia19ca,
rances.sanchez19ca, mlavalle}@cenidet.edu.mx*

Resumen: Hace 63 años que en el *Dartmouth College* (USA) se acuñó el término *Artificial Intelligence* (Inteligencia Artificial). Desde entonces se ha discutido largamente sobre si las máquinas pueden o podrán pensar algún día. En este artículo se relatan los argumentos, a favor o en contra, más citados en torno al tema y se presenta un análisis sobre los verdaderos retos que enfrenta la Inteligencia Artificial en nuestros días, basado en los logros alcanzados por la Inteligencia Artificial. Este análisis se realiza para enfatizar las áreas de trabajo que se prevé serán cruciales en el futuro a corto y mediano plazo para el desarrollo y crecimiento de la Inteligencia Artificial, lo cual a su vez sirve para que los jóvenes investigadores conozcan las áreas de oportunidad para trabajar en nuevos proyectos de investigación de utilidad regional y nacional.

Palabras clave: Inteligencia Artificial, Controversias, Logros, Retos, Futuro de la Inteligencia Artificial.

1. INTRODUCCIÓN

Si preguntamos en la calle a alguien si ha oído algo sobre la Inteligencia Artificial (IA) seguramente obtendremos una respuesta afirmativa, a diferencia de si preguntáramos por Ciencia de Datos, Bases de Datos, Sistemas Distribuidos, Internet de las Cosas o Cómputo en la Nube. Esto se debe principalmente a la gran cantidad de películas de ciencia ficción en donde generalmente el malo de la película es, en el fondo, la IA.

Lo anterior nos hace ver que, por un lado las películas han contribuido mucho a difundir el término IA, pero por otro, han propiciado que el hombre de a pie tenga un concepto erróneo sobre lo que realmente es la IA.

El presente artículo es en parte un esfuerzo por desmitificar a la IA y describir brevemente lo que sí es la IA.

Comenzaremos por relatar que fue en el año de 1956 que en el *Dartmouth College*, en Estados Unidos de Norteamérica, se acuñó el término *Artificial Intelligence* por un grupo de investigadores eminentes interesados en el tema. Desde entonces se ha discutido largamente sobre si las máquinas pueden o podrán pensar algún día, existiendo argumentos a favor o en contra, dejando de lado el análisis sobre los verdaderos retos que enfrenta la IA en nuestros días, basándonos en los logros del mundo real que ya ha alcanzado la IA.

Aquí tratamos de realizar un análisis para enfatizar las áreas de trabajo que se prevé serán cruciales en el futuro a corto y mediano plazo para el desarrollo y crecimiento de la IA, lo cual

a su vez es útil para que los jóvenes investigadores conozcan las áreas de oportunidad para trabajar en nuevos proyectos de investigación para atacar problemas de índole regional y/o nacional.

Para abordar estas ideas, en la Sección 2 se resumen los principales argumentos a favor y en contra de la IA; la Sección 3 describe algunos de los logros recientes de la IA; la Sección 4 presenta los que, en nuestra opinión (y basado en múltiples artículos, libros y documentales), son los verdaderos retos de la IA; la Sección 5 es una mirada al futuro de la IA y finalmente la Sección 6 concluye.

2. CONTROVERSIAS EN TORNO A LA IA

Antes de que la IA fuera nombrada así, ya existía la controversia sobre si las máquinas serían capaces de ser inteligentes.

Desde los tiempos de Charles Babbage en el siglo XIX ya se tiene registro de que la condesa Ada Lovelace opinaba que "las máquinas siempre harán lo que uno les diga" o en otras palabras "las máquinas son incapaces de realizar algo por voluntad propia o por sí mismas".

El artículo que abre la polémica de manera formal es el publicado en el año 1950 por el llamado "padre de la IA", el británico Alan M. Turing (1950). En su artículo seminal, Turing menciona, entre otros aspectos, las objeciones que en su época se hacían respecto a la posibilidad de que las máquinas pensaran.

Algunas de estas objeciones son: la teológica (el ser supremo no quiere que existan máquinas inteligentes); la del avestruz (sería terrible que existieran máquinas inteligentes); la

matemática (existen demostraciones matemáticas que prueban que ninguna máquina es capaz de ser inteligente); e incluso está la objeción de la percepción extra-sensorial (las máquinas nunca podrán tener poderes para-normales, como sí los tienen los humanos ... ¿ en verdad todos los humanos tenemos esta percepción ?).

Todas estas objeciones son analizadas una por una por Turing, quien concluye que no existen impedimentos reales para que las máquinas puedan pensar, e incluso vaticinó que en 50 años se tendrían máquinas inteligentes y que serían tan comunes como un automóvil o un avión. Su argumento principal para defender la idea de máquinas con inteligencia fue con la ahora llamada "máquina de Turing" con la cual propuso la prueba de la inteligencia mediante un diálogo hombre-máquina: si al final un hombre declaraba haber estado platicando con otro hombre, entonces se le tendría que dar el calificativo de "inteligente" a esa máquina. Nótese que, a falta de una definición formal y funcional de "inteligencia" y otros derivados como "conocimiento", "aprendizaje", "razonamiento", "pensamiento", "talento", etc. Turing le da la vuelta al asunto precisamente con el "test" que propuso.

Para rebatir el "test de Turing", Searle (1990) propuso el experimento de "la habitación china", donde adentro de la habitación está una persona que no sabe el idioma chino, pero tiene un manual que le dice qué contestar para cada entrada que reciba; alguien afuera de la habitación podría creer que adentro hay alguien que sabe el idioma, sin embargo, la persona adentro en realidad no comprende qué entra y qué sale.

Los Churchland (1990) contra argumentan a Searle diciendo que poner una sola persona en la habitación china equivale a querer que una sola neurona piense; entonces ellos argumentan que poniendo miles de personas en la habitación china todas estas personas llegarían finalmente a tener un entendimiento del idioma (justo como ocurre en todas las áreas de la ciencia); esta analogía la usan los Churchland pues ellos pensaban que con IA clásica no sería posible tener máquinas inteligentes, pero en cambio, empleando un sistema conexionista (ahora más conocido como Red Neuronal Artificial) que emulara al cerebro, sí se podría.

También en las controversias encontramos el libro del filósofo y astrofísico Penrose (1990) "La nueva mente del emperador", en donde él expone que la IA es tan invisible como el traje del emperador (haciendo alusión al cuento infantil de Christian Andersen) y afirma que solamente cuando se conozca la mecánica del universo se podrán crear máquinas inteligentes.

Más adelante en el tiempo encontramos el artículo "Wings" (1998) que hace una muy interesante analogía entre las máquinas voladoras y la IA, en el sentido de que había quienes opinaban que el vuelo artificial era imposible, pero finalmente se logró gracias al entendimiento de lo que realmente es relevante para que un aparato pueda volar; los autores sugieren que lo mismo sucederá con la IA y citan el caso de un ilustre y aguerrido opositor al vuelo artificial de nombre Newcomb, que vio cómo los hermanos Wright hacían volar un aparato, pero aún así, él dijo que realmente "eso no volaba".

Ya de manera más reciente encontramos propuestas de nuevos "test" de inteligencia, distintos al propuesto por Turing: el "test" de Lady Lovelace (2001), en el que solamente si la máquina es capaz de ser creativa sin ayuda se diría que realmente es inteligente; ó los esquemas de Winograd (2014), concurso en el que, si una máquina es capaz de entender el significado de frases y preguntas cortas (v.g. "El trofeo no cupo en la vitrina porque era muy grande": ¿ quién es grande ?) y por lo tanto responder correctamente, se diría que esa máquina es inteligente.

Los argumentos a favor y en contra continúan y la controversia seguirá, quizás más allá de cuando tengamos máquinas que resuelvan el 80% de los problemas de tipo simbólico ligados a la IA, igual que Newcomb negó hasta el final que el aparato de los hermanos Wright realmente volara. Pero entonces, ¿ qué realmente ha avanzado la IA hoy día ?. En la siguiente Sección mencionaremos algunos logros relevantes que abonan hacia máquinas cada vez más inteligentes o que procesan la información, deciden y actúan (la mayoría de las veces correctamente) a la manera humana.

3. LOGROS RECIENTES DE LA IA

Basta leer un periódico, una revista de tecnología o las noticias en la televisión para encontrar artículos o noticias relacionadas con la IA. Aquí listaremos algunas particularmente interesantes.

En diciembre de 2018 el *New York Times* publica que la empresa Nuro tiene en operación dos carritos capaces de entregar de manera autónoma comestibles (ver Fig. 1).

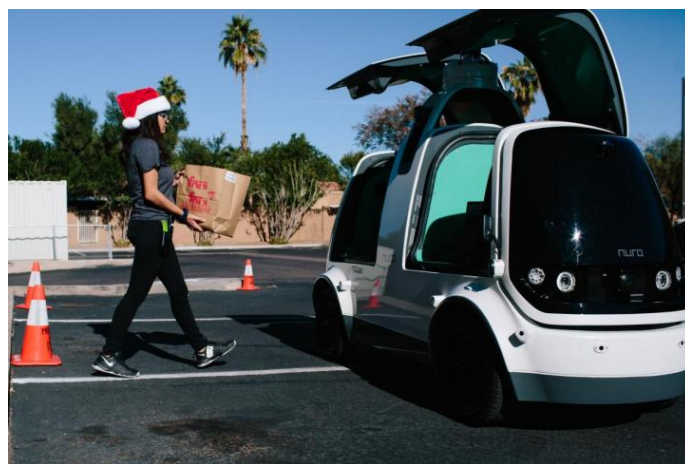


Fig. 1. Automóvil autónomo para entrega de comestibles (*The New York Times*, 2019)

En esa misma fecha *Bloomberg* reporta que *Toyota* experimenta con robots amigos en la casa, para atención de enfermos. También la *BBC* anuncia un chef con IA capaz de hacer hamburguesas nivel gourmet cada 30 segundos. La *BBC News* difunde en enero de 2019 que la empresa *Amazon* tiene en operación robots para hacer entregas de mercancía en el estado de Washington (USA); por su parte la revista *IEEE*

Spectrum reporta una rodilla artificial para mejorar el andar de discapacitados. *The Telegraph* publica sobre un robot en Marte que realiza exploración de manera autónoma (Fig. 2). Igualmente *The Washington Post* publica en febrero de 2019 que *FedEx* tiene y trabaja en robots para entrega de pizzas y para cuidados de niños en hospitales, así como en la India se tiene un sistema con IA capaz de diagnosticar problemas en la retina. En ese mismo mes *Fraunhofer* reporta que ya hay un sistema que puede detectar automáticamente noticias falsas. En abril de 2019 la Universidad *Goethe* de Alemania informa del primer libro escrito por una IA sobre baterías de iones de litio, editado por la prestigiosa casa de publicaciones *Springer*. *Xataka* anuncia el primer deporte creado por la IA llamado *Speedgate*, que resulta de una combinación armoniosa de las reglas de juego de 400 deportes más populares.



Fig. 2. Robot explorador en la superficie marciana (*The Telegraph*, 2019).

También *IEEE Spectrum* da a conocer que ya existe una IA que sirve para hacer mejores programas de IA, para reconocimiento de imágenes y otras aplicaciones.

Mucho antes de esto es sabido que una máquina de *IBM* venció al campeón de ajedrez y también venció al campeón de *Jeopardy*. También un programa inteligente venció al mejor jugador de *Go*, un juego más complicado que el ajedrez y múltiples programas conversadores han superado exitosamente y desde hace un buen tiempo, el “test” de Turing.

Y la lista de logros continúa. Pero a pesar de todo lo anterior, si uno en la calle pregunta si en la actualidad existe alguna máquina inteligente, la respuesta, aún de estudiantes de maestría, es que tal agente inteligente no existe (y hay quien afirma que no existirá jamás). Entonces tendremos que reconocer que “algo” está faltando y que a pesar de los impresionantes avances de la IA, aún existen retos por vencer para tener máquinas más inteligentes, sea lo que quiera decir esa palabra. La siguiente Sección aborda el importante tema de los problemas u obstáculos actuales que están impidiendo que

tengamos y disfrutemos de máquinas más útiles en nuestro quehacer productivo diario.

4. LOS VERDADEROS RETOS DE LA IA

La IA ha madurado desde los tiempos de Turing. Ahora conocemos más acerca de lo que es necesario para tener máquinas más inteligentes, aspectos que Turing no vio y que lo hicieron pensar que el problema de la IA tendría solución en tan sólo 50 años. Los verdaderos retos de la IA son problemas que requieren tecnologías disruptivas, las cuales apenas comienzan a emerger. En nuestra opinión, estos son algunos de los retos principales de la IA.

a) Sentido común. Se ha visto que una máquina para ser inteligente debe poseer todo ese conocimiento “sencillo” que los humanos adquirimos casi sin darnos cuenta: que los objetos caen, que el fuego quema, que la lluvia moja, que los objetos tienen un peso, que el dinero es un recurso muchas veces escaso, que la vida transcurre, etc. El problema con ese conocimiento es que es impresionantemente grande y ni aún un equipo de muchas personas es capaz de capturarlo en una máquina en un tiempo razonable. Una posible solución se encuentre en Internet y aunque hay propuestas, éstas aún no han madurado.

b) Percepción. Existe consenso en que una buena parte del ser inteligente está relacionado con la capacidad de percibir el mundo a través de los sentidos. Nuestras máquinas actuales tienen “sentidos” muy primitivos y escasos (comparables al peor de los discapacitados en el terreno humano).

c) Representación del conocimiento. Es un área fundamental de la IA. Es el problema de cómo almacenar y estructurar el conocimiento (y el conocimiento mismo) y cómo recuperarlo de manera eficiente y eficaz. Aunque existen cientos de propuestas al respecto, aún no hay una representación que abarque todos los aspectos necesarios.

d) Búsquedas heurísticas. Sabemos que los humanos, para tomar decisiones rápidamente, casi sin darnos cuenta, eliminamos o “podamos” del espacio de solución todo aquello que no contribuye a la solución. Resolver esto también es un área muy importante de la IA, en donde encontramos una enorme cantidad de algoritmos de búsqueda de soluciones que pretenden llegar eficientemente a una solución correcta la mayoría de las veces. Aún se desconoce un algoritmo eficaz y eficiente universal.

e) Símbolos con semántica. Lograr que los símbolos almacenados en la máquina tengan “sentido” para la misma máquina y no sean simples ceros y unos de información. En otras palabras, que la máquina tenga un mejor entendimiento de lo que está procesando.

f) Aún se desconoce lo relevante para la inteligencia. Aunque hay avances interesantes de la neurobiología, aún existen bastantes misterios en torno a cómo opera el cerebro humano.

g) Computadoras que procesan secuencialmente. Es claro que la inteligencia requiere un *hardware* sofisticado que procese la

información y el conocimiento de manera “masiva”, no de manera secuencial ni paralela.

Otros retos son: la reflexión, la intuición, la motivación, la capacidad de hacer analogías y descubrir nuevas soluciones, la imaginación, la curiosidad, la afectividad, la consciencia y otras más.

De todo lo anteriormente mencionado, ya existen importantes equipos de investigación que trabajan en esos y otros problemas fundamentales de la IA y que poco a poco van desenredando la madeja. Se estima que la mayoría de estos retos estarán solucionados en unos 120 años. Sin embargo, no será necesario esperar tanto, pues de hecho hoy en día ya disfrutamos, sin darnos cuenta, de la tecnología que la IA ha desarrollado. Hacia dónde va la IA es algo que se analizará en la siguiente Sección.

5. ÁREAS A FUTURO DE LA IA

La IA se está moviendo de los algoritmos que construían o programaban los humanos, a algoritmos que ellos mismos crean el modelo a partir de vastas cantidades de información. La tecnología de Redes Neuronales Artificiales conocida como *Deep Learning* es un buen ejemplo de esto; aunque estos algoritmos ya se conocían desde el siglo pasado, es ahora que se pueden utilizar exitosamente gracias a las nuevas capacidades de almacenamiento de información y velocidad de procesamiento. Esta tendencia permitirá cada vez más avanzar en dominios como el Lenguaje Natural, la Visión Artificial, la Planeación de movimientos de Robots, los sistemas de Recomendación y Diagnóstico, el Reconocimiento de Patrones, los Sistemas Tutores Inteligentes y otros dominios más. Básicamente lo que va a ocurrir dentro de no mucho tiempo es que los datos van a ser transformados a conocimiento mediante los algoritmos apropiados de *Machine Learning* y otros algoritmos.

Hoy en día se habla de la cuarta Revolución Industrial, en donde la IA es pieza clave de esta nueva Revolución, y siendo la IA una de las tendencias definitorias de nuestros días. La empresa de consultoría de alta tecnología *Gartner*, realizó un estudio que arrojó que para el año 2020 la IA será empleada por el 30% de las empresas. Las áreas en donde la IA más impactará en el futuro a mediano plazo son: servicio al cliente en línea, cuidado de la salud, chatbots, diseño de ropa y zapatos, comercio electrónico, entretenimiento, electrodomésticos, edificios inteligentes, cadenas de suministro, logística, turismo, telefonía, automóviles autónomos, finanzas, optimización de manufactura, asistentes personales ... y la lista sigue y sigue creciendo.

6. CONCLUSIONES

A partir de lo expuesto podemos aventurar una definición moderna de IA: “Algoritmos que replican, emulan o se inspiran en la forma de resolver problemas a la manera humana, de tipo simbólico (no numérico) y que hacen más útiles a las computadoras, además de que nos permiten saber más sobre

nuestros propios procesos de razonamiento”. La verdadera IA debe ser entendida como una inteligencia de diferente naturaleza que la inteligencia humana. Comprender lo anterior nos evita en caer en especulaciones y fantasías que vemos en la televisión o en el cine.

De manera más corta podríamos decir simplemente que la IA consiste en: “algoritmos que procesan la información aparentemente tal y como nosotros lo haríamos, pero mejor”. Nótese que en estas definiciones solamente se busca que las máquinas nos apoyen de mejor manera, en la solución de problemas repetitivos, riesgosos o que requieren manejo de grandes volúmenes de información, en donde el humano fallaría o tendría que dedicarle demasiado de su tiempo.

En nuestra opinión, el primer reto de la IA es desmitificarla y que sea vista como una disciplina computacional de apoyo a nuestras actividades productivas diarias, sin pretender reemplazar completamente al humano, así como un avión nunca reemplazará la belleza del vuelo de un águila, pero sí será más útil, más poderoso, más veloz y hará de este mundo, un mundo más inter-conectado y, eventualmente, más feliz.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) el apoyo para desarrollar las ideas aquí expuestas. También agradecen al Dr Juan Humberto Sossa Azuela, quien compartió bastante de la información que se expuso en este trabajo. Los seis primeros autores agradecen a CONACyT por la beca concedida para la realización de sus estudios de posgrado. El último autor agradece al Sistema Nacional de Investigadores/ CONACyT el nombramiento otorgado.

REFERENCIAS

- Ackerman, E. (2014). A better test than Turing. *Spectrum IEEE*, October, 20-21.
- Bringsjord, S., Bello, P., Ferrucci, D. (2001). Creativity, the Turing test, and the (better) Lovelace test. *Minds and machines* 11: 3-27.
- Churchland, P.M., Churchland, P.S., (1990). Could a machine thinks ?. *Scientific American*, January, 32-37.
- Ford, K.M., Hayes, P.J., (1998). On computational wings. *Scientific American Presents*, 78-83.
- New York Times (2018). Obtenido de www.nytimes.com/2018/12/18/technology/driverless-mini-car-deliver-groceries.html. Consultado diciembre 2018.
- Penrose, R. (1990). *The emperor's new mind*, Oxford University Press, USA.
- Searle, J.R. (1990). Is the brains's mind a computer program ?. *Scientific American*, January, 26-31.
- The Telegraph (2019). Obtenido de www.telegraph.co.uk/technology/2019/01/02/uk-tests-autonomous-martian-robot/. Consultado enero 2019.
- Turing, A.M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind* 49: 433-460.

Diseño de una LPS a partir de una AOPLA para empresas manufactureras textiles

Emmanuel Vázquez Benito y L. Ivette Arcos Perdomo

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán
Teziutlán, Puebla, México;

e-mail: {[emmanuel.vazquez & lilianaivette.arcos](mailto:emmanuel.vazquez@live.itsteziutlan.edu.mx)}@live.itsteziutlan.edu.mx

Resumen

El desarrollo de una Línea de Productos de Software (LPS) a partir de una Arquitectura de Línea de Productos Orientada a Aspectos (AOPLA), que busca que cada producto de la arquitectura sea fácil de derivar, reutilizar y evolucionar; como tal, la arquitectura resultante es un modelo de vistas de alto nivel, obteniendo productos específicos de la LPS.

Palabras clave: AOPLA, LPS, Industria Textil, Variabilidad, Arquitectura de Software.

1. Introducción

En México las empresas manufactureras textiles, son una fuente importante de empleos, ya que representan el 10.3% de la industria manufacturera, a nivel nacional genera el 0.7% del producto interno bruto, esto se concentra en once estados que producen el 83.9% de la producción total de la industria manufacturera textil, y generan 7 de cada 10 empleos, el estado de Puebla ocupa el tercer lugar en la producción textil, y particularmente el municipio de Teziutlán encabeza el primer lugar como generador de empleo y productor textil, es por eso que el trabajo propuesto se enfoca en el desarrollo de una LPS (Línea de Productos de Software) a partir de una Arquitectura Orientada a Aspectos. AOPLA, que es un método de diseño de arquitecturas de líneas de productos de software orientada a aspectos, que busca que la arquitectura sea fácil de derivar, reutilizar y evolucionar. Como tal, la arquitectura resultante es un modelo que consiste en un conjunto de vistas de alto nivel a partir de la cual se obtendrán los productos específicos de la línea de productos.

Hoy en día, las pequeñas y grandes empresas (PYMES) están al tanto de las innovaciones que pueden representar la incursión de aplicaciones para el control o monitorización de los procesos que se llevan a cabo para la producción de su producto o servicio. El

implementar una LPS (Línea de Productos de Software) basado en una arquitectura de software orientada a aspectos que permita gestionar sus recursos, la producción, manejo de tiempos y reportes, entre otras sistematizaciones que se realizan concretamente en una empresa de la industria textil conlleva a tener económicamente beneficios, automatizando y estandarizando la gestión de todos los procesos, bienes materiales o inmateriales, recurso humano y clientes; apoyando la toma de decisiones con datos e información siempre disponible, veraz, oportuna y planificada, desencadenando buenas prácticas dentro de la industria textil.

Diversos estudios han plasmado la problemática que enfrenta la industria textil en México, en los que se señala que desde el año 2000 la competencia de países como China; desavinando una crisis que se traduce en baja producción, ventas y una continua pérdida de competitividad.

Como lo definen Svahnberg & Bosch, una arquitectura de línea de productos orientada a aspectos (AOPLA) por sus acrónimos en inglés (Aspect Oriented Product Line Architecture), son servicios de software que cumplen con un modelo de calidad específico para líneas de un producto, además de un enfoque orientado a intereses que permite la identificación y manejo de los mismos, así como el soporte de variabilidad, satisfaciendo necesidades que se involucran en

diferentes áreas, gestionando a la Industria con el uso de la tecnología.

1.1 Arquitectura de Líneas de Productos de Software

La arquitectura de una LPS es una arquitectura de software que soporta a toda una familia de productos y no solo un producto en particular y es un artefacto clave en la ingeniería de aplicaciones, es decir la arquitectura es usada en todas las aplicaciones de la LPS, la arquitectura debe soportar variabilidad y ser flexible para todos los productos de la línea.

Las características que debe tener una PLA según (Klaus, et al. 2005) son:

- Satisfacer los atributos de calidad de una LPS
- Satisfacer los atributos de calidad de cada producto de una LPS
- Soporte de las características comunes y variables
- Disminuir el esfuerzo de diseño y desarrollo de software en múltiples productos

Algunos de los beneficios de la PLA son:

- La descripción de variabilidad y los aspectos comunes de los productos contenidos en la línea
- Proporciona una estructura general común
- Reduce costos de producción
- Reduce los tiempos de introducción al mercado y mejora la calidad de los productos.

1.2 AOPLA

AOPLA contempla los siguientes pasos para obtener la arquitectura de la LPS (Cortés Verdín, 2009):

1. Desarrollo del caso de negocio. Es un medio para tomar una decisión en si se debe aplicar o no una nueva oportunidad de negocio. Durante este proceso se desarrolla el portafolio de la línea de productos que consiste en una lista de los productos y sus capacidades o requisitos correspondientes. En este portafolio se pueden identificar las primeras oportunidades de reutilización.

2. Ingeniería de dominios. El objetivo es identificar y modelar las aplicaciones del dominio con el fin de encontrar oportunidades de reutilización, durante esta fase se identifican y se modelan los intereses.

3. Modelado de la arquitectura. Se llevan a cabo las siguientes etapas.

- Modelado de los casos de uso y especificación de requerimientos de la LPS, durante el modelado de los casos de uso los elementos comunes y variables son representados en el modelo de casos de uso con el conocimiento adquirido en la etapa de ingeniería de dominios, se identifican los atributos de calidad y especificados durante la especificación de requerimientos.

- CORE Concern-Oriented Requirements Engineering (Moreira, Araujo, & Rashid, 2005), determina la asignación y la influencia de los intereses sobre las etapas posteriores de desarrollo.

- Desarrollo del modelo de calidad de la LPS, Este modelo abarca la especificación de las métricas de los atributos de calidad y escenarios, la selección de medidas y patrones para los atributos de calidad y la selección de viewtypes y vistas. El modelo de calidad utilizado en AOPLA satisface los atributos de calidad para una línea de productos.

- Los viewtypes y vistas mostrarán los patrones arquitectónicos, tácticas, principios y técnicas que satisfacen los atributos de calidad. AOPLA adopta tres viewtypes con sus respectivos estilos, módulos, componentes y conectores, y asignación o despliegue.

- Evaluación. En esta fase se evalúa las métricas y los escenarios especificados en el modelo de calidad para determinar si cumple con los atributos de calidad, de ser necesario se ajusta la arquitectura de la línea de productos con el fin de cumplir con los atributos de calidad.

1.3 Variabilidad

Un concepto central en el desarrollo de LPS es la variabilidad, que se refiere a cómo administrar los artefactos resultantes de las diferentes etapas del desarrollo de software, que difieren entre productos o a situaciones determinadas entre un mismo producto (Svahnberg, et al. 2005).

La variabilidad posibilita la reutilización y facilita la derivación de productos que son específicos para cada cliente de la LPS. Debido a que la variabilidad se produce en diferentes niveles y en varios temas a lo

largo del proceso del diseño de la PLA. Es necesario identificar: los requerimientos funcionales y no funcionales que están presentes en cualquier producto de la LPS; los métodos de resolución de variabilidad, los puntos de variación que describen donde existen las diferencias entre productos, las variantes que indican las distintas posibilidades de satisfacer un punto de variación, así como los puntos de extensión para la personalización o extensión de los componentes de la LPS.

2. Desarrollo de la LPS

2.1 Etapa de revisión

Actualmente en el mercado existen opciones de administración para la industria textil, funcionando dichas versiones como un ERP (Sistema de Planificación de Recursos Empresariales), en el cual integran las áreas de una maquiladora de forma general, pero ninguna realiza a detalle la administración mediante un sistema que trabaje de manera conjunta con todos los departamentos existentes en la empresa.

La empresa maquiladora textil “Comercializadora Keter S.A. de C.V.” cuenta con 3 plantas de producción, y se hará referencia en adelante como empresa A.

Se compone de 7 áreas: corte, foleo, producción, área de habilitación y avíos, terminado, empaque y bodega, así como también se encuentra el área de oficinas.

La empresa manufacturera Confecciones de la Rosa, a la que posteriormente haremos referencia como la empresa B, se conforma con 4 áreas en las cuales se lleva un proceso para obtener un producto final en el siguiente orden el área de corte, área de producción, lavandería y terminado o empaque, cada área se conecta con la siguiente.

La línea de producción se divide en 4 sub-áreas, mismas que participan directamente en el inicio y termino de la confección de una prenda, a continuación, se describe cada una de forma secuencial.

Habilitación: Se encarga de confeccionar las partes correspondientes a una sección, y así disponer de una sección completa.

Ensamble: Se encarga de confeccionar todas las secciones preparadas en el área de habilitación, es decir, unir cada parte de la prenda.

Deshebrado: Esta operación consiste en quitar los hilos sobrantes de la costura y revisar a la vez que no haya defectos como costura suelta, floja, apretada, tela manchada, picada, etc.

Revisado: Última fase de la línea de producción, se encarga de monitorear que cada una de las prendas cumpla con las especificaciones técnicas del cliente, así como asegurar la calidad del producto.

2.2 Identificación de la variabilidad

El proceso de producción textil varía entre empresas, sin embargo; se determina que, el proceso de producción da inicio con una orden de producción, en la que se especifica las prendas a producir, como son tallas, colores, estilos, operaciones, corte de tela, ensamble y revisado. La productividad de un operador se mide por el número de operaciones que realiza al día, esto se plasma en un formato llamado bihorario u horario dependiendo del número de veces que registre la información, este proceso implica un esfuerzo significativo en horas hombre, para el cálculo de la productividad y el seguimiento del avance de la orden de producción.

El desarrollo de software a partir de una AOPLA para empresas manufactureras textiles, impacta positivamente con el desarrollo económico de la región, logrando reutilizar y evolucionar mediante software las órdenes de producción en dichas industrias, consistiendo en un conjunto de vistas de alto nivel a partir de la cual se obtienen los productos específicos de la línea, sustentados en componentes como marco referencial, asentado en el modelo propuesto por John Cheesman y John Daniels para la especificación de software basado en componente, como resultado se obtiene una arquitectura de software detallada (Cheesman & Daniels, 2000).

2.3 Desarrollo del caso de negocio

En esta etapa se identificaron los siguientes productos para la LPS, lo que resulta en el portafolio de productos.

- Administración de recursos humanos
- Administración de áreas
- Administración de órdenes de producción
- Administración de clientes
- Administración de preproducción
- Administración de producción
- Administración de cortes

- Control de estampados
- Control de la productividad
- Control de almacén
- Control de avíos
- Control de estilos
- Control de líneas
- Control de empaques
- Control de telas
- Control de tallas
- Control de plantas
- Control de máquinas

Como se mencionó anteriormente, aunquen existen diferencias en los nombres que se les dan a los procesos o áreas entre empresas, se inicia con el descubrimiento de la variabilidad.

2.4 Ingeniería de dominios

En esta etapa se diseñan los casos de uso para cada producto de la LPS identificados en la fase anterior, para el presente artículo se hará uso del producto, “Administración de recursos humanos”. Para el caso de estudio, se analizaron dos empresas:

Empresa A: Comercializadora Keter S. A. de C.V.
Empresa B: Confecciones de la Rosa S.A. de C.V.

El departamento que gestiona a los empleados de la empresa A, se demomina departamento de “recursos humanos”, y en la empresa B, es llamado “personal”, en la Tabla 1. Se muestran los elementos comunes y requerimientos.

Tabla 1. Identificación de requerimientos del producto Recursos Humanos de la LPS

Debido a que la empresa maneja un horario único para todos los empleados dicho requisito no es solicitado, así mismo la empresa B no necesita de la gestión de normas, en el caso de la empresa A, donde los productos generados son de exportación la empresa

requiere pasar auditorias de calidad, por lo que son necesarios los registros de capacitaciones.

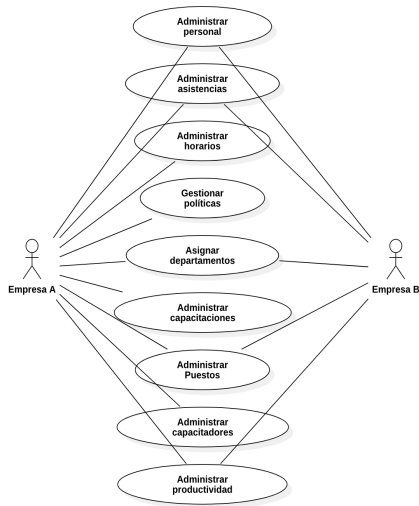


Figura 1. CU general

Como se puede observar, las dos empresas comparten requerimientos funcionales, que se detallarán en una siguiente etapa, las especificaciones de casos de uso son de utilidad si existe alguna duda entre las relaciones de los conceptos.

El atributo de calidad identificado para los productos resultantes es: seguridad, para la implementación del atributo de calidad, se desarrolló un componente que está presente en todos los productos de la LPS.

Para identificar la variabilidad del producto se utiliza un modelo de tipos de negocio, que identifica las variaciones a partir de los atributos necesarios en cada producto, como entrada se tiene la especificación de casos de uso. En la Figura 2, se puede observar qué clases serán utilizadas por la Empresa A, así como la

	Requerimiento	Empresa	
		A	B
RF1	Administrar personal	X	X
RF2	Administrar asistencias	X	X
RF3	Administrar horarios	X	
RF4	Gestionar políticas	X	
RF5	Asignar departamentos	X	X
RF6	Administrar capacitaciones	X	
RF7	Administrar Puestos	X	X
RF8	Administrar capacitadores	X	
RF9	Administrar productividad	X	X

diferencia de atributos con respecto a la Empresa B. El

modelo de tipos de negocio en adelante (MTN), se representa con un diagrama de clases, el propósito es obtener la información de los intereses del dominio, el MTN contiene información específica del negocio, además se agregan los atributos necesarios y las reglas de negocio, el MTN es un modelo conceptual que no representa al software, el propósito es identificar los conceptos y las relaciones que existen entre ellos

Una vez que se tiene el MTN se inicia con la identificación de componentes, para ello es necesario crear el modelo de tipos de negocio de la LPS, que toma como entradas el MCN y la descripción de casos de uso.

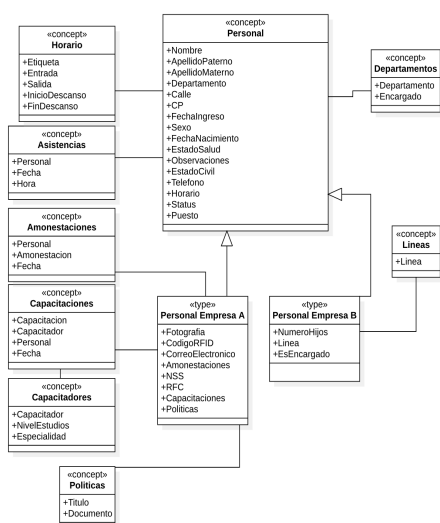


Figura 2. Modelo de tipos de negocio para la identificación de variabilidad.

Una variación del MTN para la LPS es la representación de la variabilidad que se modela con generalización, una manera de identificar la variabilidad es a partir de la descripción de casos de uso, en este caso la trazabilidad de la variabilidad se representa en la Figura 3.

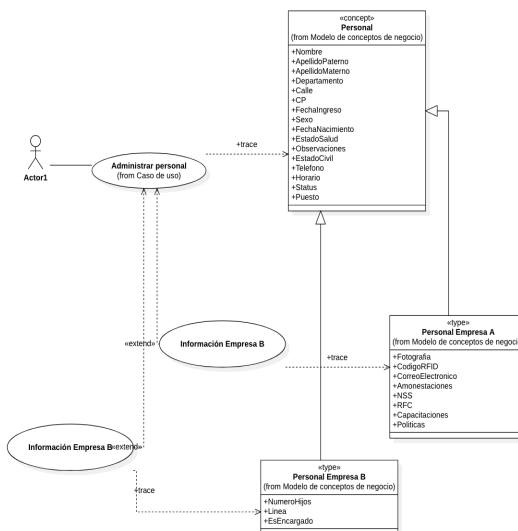


Figura 3. Trazabilidad CU – MTN

En este caso los nombres de los atributos con el estereotipo <<type>> Personal Empresa A y Personal Empresa B se heredan del <<concept>> Personal, con esto evitamos declarar los atributos que se repiten en la información personal. Para cada <<type>> se agrega una interfaz, a cada interfaz se agregan las operaciones correspondientes que se encuentran en la especificación de casos de uso de la etapa de ingeniería de dominios, tal y como se muestra en la Figura 4.

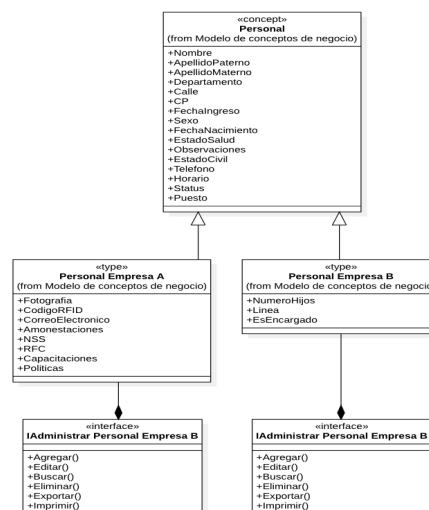


Figura 4. Ingeniería de dominios

Por último, se realiza un diagrama donde se identifica la interacción entre los componentes que resultaron de las etapas anteriores, además por cada producto del portafolio de productos se genera un modelo de componentes con los componentes que brindan la funcionalidad del producto de la LP.

3. Implementación

Con los artefactos resultantes, se desarrollaron productos de software que se implementaron en la Empresa A y en la Empresa B, las interfaces de usuario se personalizaron para satisfacer los requisitos del cliente, para la integración de los productos se diseñó una interfaz que invoca los productos de acuerdo al perfil de usuario.

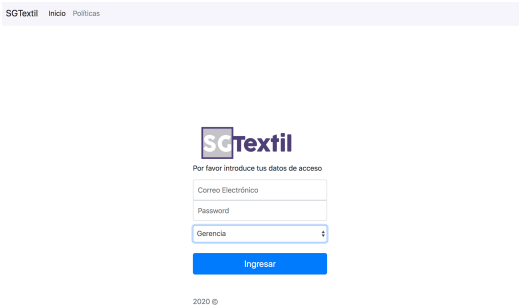


Figura 5. Interfaz de acceso LPS para empresa A

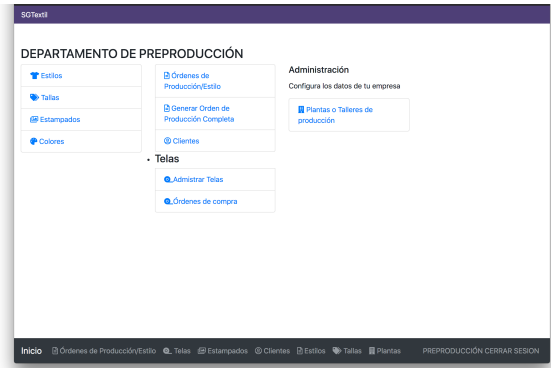


Figura 6. Acceso a la funcionalidad para la empresa A

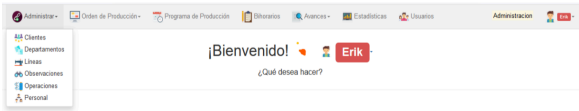


Figura 7. Acceso a la funcionalidad para la empresa B

La variabilidad entre productos, como ya se mencionó se aplica en algunos casos a nivel atributos de clase, en las siguientes dos figuras se muestra la diferencia entre un producto y otro cuya única diferencia es el número de atributos, pero el dominio es el mismo.

Agregar Cliente

Razon Social

RFC

Calle

Numero Exterior

Numero Interior

Codigo Postal

Ciudad

Estado

Telefono

Correo Electronico

Guardar

Cancelar

La variabilidad es modelada en la ingeniería de dominios, en el modelo de tipos de negocio, representada con generalización.

Figura 8. Agregar cliente empresa B

Añadir Cliente

*Razón Social

Alias

RFC

TAX IDENTIFICATION Number

Calle

Colonia

Número Exterior

Número Interior

*CP

Ciudad

Estado

Teléfono

e-mail

Imagen

Arrastre archivos para adjuntar, o Examinar

Dirección de envío 1

Cerrar modal al guardar

Cerrar

Guardar

Figura 9. Agregar cliente empresa A

De los resultados de dicha implementación se resumen lo siguiente, para administrar el proceso de producción, se pudo observar y demostrar que, en un solo proceso una persona gana aproximadamente \$55.55 por hora, en contraste al proceso de administración manual se requiere de 2 horas con 10 minutos y 35 segundos para administrar una orden de producción, pero mínimo al día se requieren administrar 4 órdenes por lo que se genera un sueldo diario de \$483.64, en cambio al utilizar los productos de la LPS solo necesita de 43 minutos y 33 segundos, lo cual arroja un sueldo diario de \$161.30, lo cual anualmente, la industria pagaría por los servicios de dicha persona la cantidad de \$116,074.07 con el método tradicional y solo \$38,711.11 utilizando la LPS, ahorrando \$77,362.96; lo cual indica una mejora en costos de productividad de mínimo el 66%.

Específicamente, el desarrollo e implementación de una LPS (Línea de Productos de Software) en una Empresa Manufacturera Textil, utilizando la técnica de resolución de variabilidad a nivel de componente (Svahnberg & Bosch. 2000) a partir de una AOPLA (Arquitectura de Línea de Productos Orientada a Aspectos) ha sido el método de construcción de software, basado en el diseño de una sistematización para industrias manufactureras de la región, siendo este giro el más importante por ser pilar del desarrollo regional en la industria textil con mayor presencia en el Estado de México, Puebla, Hidalgo, Cd. de México, Guanajuato y fundamentado en estadísticas del INEGI, específicamente del municipio de Teziutlán (INEGI).

4. Conclusiones

El diseño de la LPS ha permitido que el desarrollo de productos sea más ágil, por lo que se reducen costos significativos, en comparación con los costos de la implementación de un ERP. Los productos de software resultantes han permitido contribuir a la gestión de sus recursos, la producción, manejo de tiempos y reportes, entre otras operaciones que se realizan en una empresa con esta dinastía; conllevando a tener ciertos beneficios como el ahorro de dinero, gracias a la aplicación de administrar, procesos, bienes materiales o inmateriales, recurso humano y clientes, toma de decisiones; debido a que la empresa tendrá los datos e información siempre disponible y una planificación definida correctamente, se estandarizó la empresa sobre sus procesos consiguiendo mejora y ayudando a definir las buenas prácticas que desencadenen una competitividad

incorporando el uso de TIC's. La LPS impacta de manera positiva en la industria manufacturera textil; logrando contribuir con el medio ambiente en la reducción de costos de papelería, llevando un mayor control de la información, automatizando tareas y mejorando la comunicación entre los participantes, otorgando valor agregado al cliente.

Se concluye con base a los productos implementados con anterioridad, que la incorporación de un producto de software para la sistematización de procesos en la industria textil, ayuda de forma clara en el proceso de toma de decisiones, la administración de información y en la sistematización de procesos, dando como resultado la optimización de procesos, causando la mínima duplicidad de datos para disponer de información de mayor calidad y así lograr una buena planificación anticipándonos de los escenarios futuros.

La LPS tuvo un impacto positivo no solo a las empresas de la industria manufacturera textil, sino también en la reducción en los costos de elaboración de software.

REFERENCIAS

- Kirk J, Miller ML. Reliability and validity in qualitative research. University Papers series. Qualitative research methods, Volumen 1. Thousand Oaks: Sage; 1986. p. 1-10.
- Maldonado, T. (2010). Investigaciones experimentales. Calameo. Obtenido de <https://es.calameo.com/read/0048329503c16e02e67dd>
- Méndez, G. (22 de octubre de 2008). Especificación de Requisitos según el estándar IEEE830. Obtenido de FDI: <http://www.fdi.ucm.es/profesor/gmendez/docs/is0809/ieee830.pdf>
- ITAM, C. d. (2010). Instituto Tecnológico Autónomo de México (2010). La Industrial Textil en México; Diagnóstico Prospectiva y Estrategia. México D.F.: ITAM.
- Bass, L., Clements, P., & Kazman, R. (1998). Software Architecture in Practice., New York, NY.: Addison-Wesley.
- Bosch, J., Van Gurp, J., & Svahnberg, M. (n.d.). A Taxonomy of Variability Realization Techniques.
- Cheesman, J., & Daniels, J. (2000). UML Components a simple process for specifying component-based software. Addison Wesley.
- Clements, P., & Northrop, L. (2001). Software Product Lines: Practices and Patterns. Boston: Addison-Wesley.
- Clements, P., Bachmann, F., & Bass, L. (2002). Documenting Software Architectures Views and Beyonds. Addison Wesley.
- Cortés Verdín, M. K. (2009). AOPLA: Aspect-Oriented Product Line Architecture. Tesis de Doctorado. Guanajuato, México: CIMAT.
- INEGI (2019) Censo económico 2019
- Klaus, P., Bockle, G., & Van del Linder, F. (2005). Software Product Line Engineering. Foundation, Principles, and Techniques. Germany: Springer.
- Klaus, P., Bockle, G., & Van del Linder, F. (2005). Software Product Line Engineering. Foundation, Principles, and Techniques. Germany: Springer.
- Linden, F. v., Schmidt, K., & Rommes, E. (2007). Software Product Lines in Action. Springer.

Diseño de un vehículo que resuelve laberintos por medio de árboles de decisión con control de velocidad difuso

David Tinoco Varela*. Fernando Gudiño Peñaloza.*Santiago Roa Martínez*

* Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán,
Departamento de Ingeniería, Sección Electrónica, ITSE (e-mail: dativa19@hotmail.com, ilciarmin@gmail.com,
extremo@hotmail.com).

Resumen: En este artículo, se presenta el diseño de un vehículo basado en la tarjeta de desarrollo Arduino y en el sensor de línea QTR-8A, que utiliza los nodos de los árboles de búsqueda como memorias de posición y de esta forma poder llegar a la solución de un esquema laberíntico. El sistema propuesto, puede reaccionar a obstáculos que se encuentren dentro de la ruta del laberinto, ya que cuenta con un control de velocidad y freno difuso. Este control permite que el vehículo pueda adaptar su funcionamiento ante la invasión de su trayectoria. El vehículo ha sido probado en laberintos con más de dos bifurcaciones por nodo, logrando recordar las posiciones ya recorridas, y en base a esta memoria, logra encontrar la salida del laberinto en la forma más simple posible.

Palabras Clave: Árboles binarios, Controlador difuso, Arduino, Sistemas embebidos, Sensores.

1. INTRODUCTION

Según Rahnama et al. (2012), la resolución de laberintos es uno de los problemas que han adquirido gran relevancia en los últimos años. Esto debido principalmente al hecho de que las aplicaciones de un sistema robotizado que pueda partir de un punto de origen y llegar a un punto destino, evitando diferentes obstáculos, pueden ser muy variadas, tales como la generación de robots de rescate autónomos, robots exploradores, robots de limpieza y máquinas de identificación de objetos en un entorno abierto.

Existen diferentes técnicas para la resolución de esquemas laberínticos, desde la técnica de la mano derecha, hasta diferentes esquemas relacionados a Inteligencia Artificial (Vargas et al, 2008), pasando por técnicas que procesan imágenes para resolver el laberinto (Román, 2010).

La resolución de laberintos puede cobrar valor, si el robot es capaz de analizar su entorno, verificar si existen interferencias u obstáculos en su camino, y definir la velocidad en la cual va a realizar la tarea asignada.

En este artículo se presenta un vehículo que resuelve esquemas laberínticos por medio de la generación de nodos dentro de un árbol de decisión, adicionado con la capacidad de poder responder de forma “inteligente” a obstáculos que interfieren en su recorrido. Partiendo de este hecho, se plantea como trabajo futuro el diseño de un robot de rescate que pueda resolver laberintos, reaccionar a obstáculos y definir diferentes rutas para sortear un determinado obstáculo.

2. PRELIMINARES

En esta sección se presentan y se definen todos los conceptos necesarios para el desarrollo del prototipo.

2.1 Árboles de binarios

Los árboles binarios (AB) son estructuras de datos abstractas y no lineales. Los AB están compuestos de un conjunto finito de elementos (Nodos), cada uno de los cuales almacena un dato y a su vez cada uno de los nodos puede apuntar hacia su ramificación izquierda y hacia su ramificación derecha. En la figura 1, podemos observar la representación de un árbol binario.

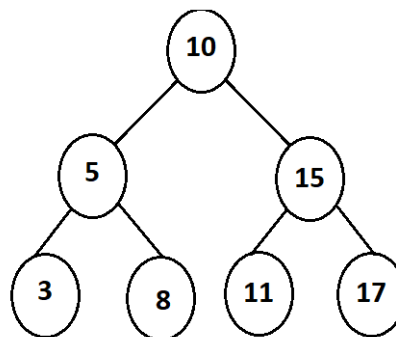


Fig 1.- Representación de un árbol binario, donde el nodo 10 tiene las ramificaciones 5 y 15.

Como se puede apreciar en la figura 1, los AB son estructuras inherentemente recursivas, ya que cada sub nodo presenta el mismo comportamiento que el nodo anterior.

Algo que es de suma importancia para el desarrollo de este proyecto, es que los nodos pertenecientes a un árbol binario, pueden ser eliminados, modificados, o incluso, pueden ser agregados nuevos nodos. Estas estructuras pueden ser utilizadas en una gran cantidad de aplicaciones computacionales, entre las que se encuentra la gestión de grandes cantidades de datos (Powers y Zanarotti, 1995). y el desarrollo de juegos (Adelson-Velskiy y Donskoy, 1975).

2.2 Arduino UNO

Hoy en día en el mercado del desarrollo electrónico se pueden encontrar una gran cantidad de sistemas embebidos que pueden ser utilizada para el diseño e implementación de múltiples sistemas científicos y tecnológicos, tales como Raspberry Pi, Tiva-C LaunchPad, Parallax, PYNQ, entre otras. Dentro de todas ellas, existe una tarjeta de desarrollo que goza de gran popularidad por su facilidad de uso y su bajo coste económico, Arduino UNO.

Arduino UNO nació en el *Ivrea Interaction Design Institute*, Italia. Fue ideada con la intención de que cualquier usuario pudiera utilizarla, sin importar sus conocimientos previos de programación o ingeniería.

Esta placa ha sido el corazón de una gran cantidad de proyectos tecnológicos, entre los que se encuentran sistemas domóticos (JChandramohan et al., 2017; Mandula et al., 2016; Adriansyah y Dani, 2014); sistemas de adquisición de datos (Shajahan y Anand, 2013; Grinias et al., 2016; Faris y Mahmood, 2014); monitores de radiación solar (Bawa y Patil, 2013; Kaur et al., 2017; Zolkapli et al., 2013), entre muchas otras aplicaciones. La tarjeta Arduino UNO, puede ser vista en la figura 2.



Fig 2. Placa de desarrollo Arduino UNO.

2.3 Lógica difusa y controlador difuso

Lofti A Zadeh (1965) propuso el concepto de lógica difusa. Por medio de esta lógica, es posible simular los mecanismos de razonamiento humano, estos sistemas se dicen que son basados en la experiencia, y con ellos podemos evaluar la incertidumbre de los procesos cognitivos humanos.

La lógica difusa es una forma de representar matemáticamente la incertidumbre y la vaguedad de un problema.

La lógica difusa emplea valores de números reales comprendidos entre 0 y 1 para indicar si un hecho es totalmente falso (0) o totalmente cierto (1), esto es el grado de pertenencia de un valor de entrada en un conjunto difuso, al ser multivaluada, una entrada puede pertenecer a más de un conjunto difuso al mismo tiempo, con un distinto valor de pertenencia para cada uno. Los conjuntos difusos, de este modo proporcionan una transición suave entre una característica y otra.

Este concepto matemático ha generado una herramienta altamente utilizada y utilizable en sistemas tecnológicos: los Controladores difusos. Un sistema de control estándar basado en lógica difusa se puede representar de acuerdo a la figura 3.

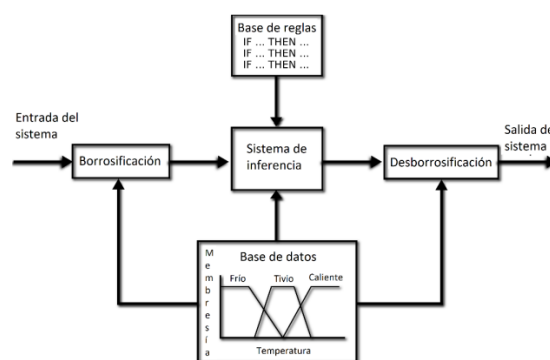


Fig. 3. Esquema básico de un sistema de control difuso.

Estos sistemas que han sido eje principal de desarrollo de una de aplicaciones e interfaces, tales como el control de señales PWM y el funcionamiento de los motores de inducción (Sharma et al., 2019); el control de la estabilización de un sistema de silla de ruedas (Jamin et al., 2018); control de sistemas de robots con llantas (Castillo y Aguilar, 2019); para el control de sistemas domóticos (Pau y Salerno, 2019) y el proceso de cambio de la transmisión manual de un automóvil de forma automática (Ramadhan et al., 2019).

3. DESARROLLO DEL PROYECTO

En esta sección se presenta el desarrollo de proyecto tanto la descripción del software como del hardware.

3.1 Estructura de funcionamiento

Se ha desarrollado un esquema de árbol binario que es ejecutado dentro de la placa Arduino, cada que el vehículo recorre una bifurcación, o nodo, dentro del laberinto, el robot genera niveles de recursividad. En el instante en el que el sensor detecta la bifurcación, un nodo es generado dentro de la estructura de datos, y con este se guarda la posición en la que este nodo se generó. Después de generar el nodo, el vehículo continua su recorrido a través de uno de los caminos existentes

en la bifurcación, hasta llegar nuevamente o al fin del camino (sin salida) o a otra nueva bifurcación, repitiendo el paso anterior. Si llega al fin del camino sin encontrar la salida, el vehículo recordara exactamente el punto del que partió, es decir, regresa al nodo anterior, o dicho de otra forma, regresa a la dirección bifurcada de manera directa. Al llegar a ese punto de bifurcación, el robot marca como “sin camino” a la rama ya recorrida, y continua con el recorrido del siguiente camino. Repite estos pasos hasta llegar a la salida. Es importante mencionar, que el vehículo al llegar a una bifurcación, escoge aleatoriamente el camino o rama a seguir, sin embargo, cuando regresa al nodo del que salió, el recorrido lo hace sin detenerse y sin verificar nuevos caminos, ya que se dirige directamente al punto de partida o nodo del árbol de búsqueda generado.

En la figura 4, podemos observar el ejemplo de generación de nodos, vemos que partimos de un nodo A, este nodo solo tiene un camino, hasta el punto B, al llegar a B se encuentra con una bifurcación y de esta forma, genera un nodo. La bifurcación B tiene dos posibles caminos, llegar a C, o llegar a D. Si escoge ir a C, encontrará que es un punto sin salida, por lo que regresa de forma directa a B, considera el camino hacia C como ya recorrido y escoge ir hacia el punto D, donde se tiene nuevamente una bifurcación y nuevamente se genera un nodo, el proceso se repite hasta llegar a J, que es la salida del laberinto.

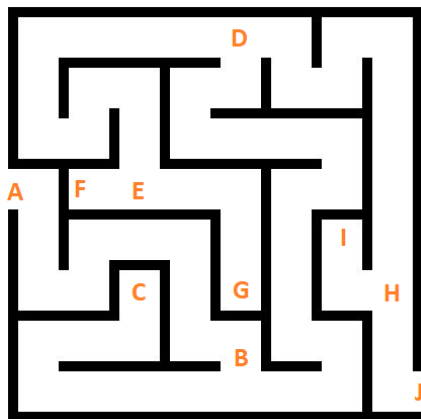


Fig. 4. Esquema de un laberinto, en donde el vehículo robotizado irá marcando los puntos a seguir, en este caso definidos por letras.

En cada paso que da, el vehículo va generando las ramificaciones de un árbol de búsqueda, para así poder regresar rápidamente al nodo anterior en caso de no tener éxito. En la figura 5, se puede ver el árbol de búsqueda que generó el vehículo al realizar el recorrido del laberinto de la figura 4.

Por otro lado, se generó un sistema de control difuso, pero a diferencia del algoritmo del árbol binario, este no se ejecuta dentro del Arduino, este manda la información de velocidad inicial del vehículo y la distancia con respecto a un obstáculo que se pueda encontrar en el recorrido del laberinto, a una computadora donde se ejecuta Matlab, y este analiza la

información recibida, calcula el freno o reducción de velocidad y lo envía de regreso a la placa Arduino.

3.2 Diseño del hardware

El vehículo robotizado propuesto, utiliza como gestor de recursos, la placa Arduino UNO.

El sistema de potencia que controla a las llantas, está compuesto por un Puente H L298N, el cual logran controlar la velocidad por medio de Pulse Width Modulation (PWM), en este caso el PWM es generado por medio del controlador difuso.

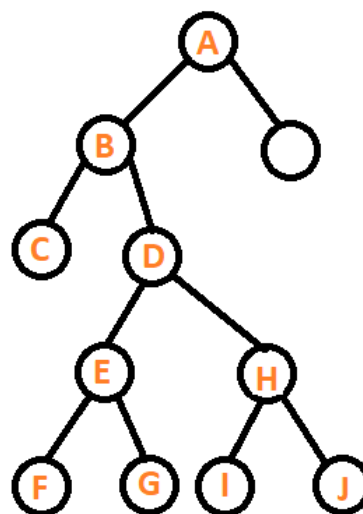


Fig. 5. Árbol de búsqueda que representa al laberinto de la figura 4.

El sensor utilizado para recorrer e identificar los laberintos es el QTR-8A, que contiene dentro de su arquitectura 8 sensores reflectivos, lo podemos visualizar en la figura 6.



Fig. 6. Sensor QTR-8^a que identifica las líneas negras del laberinto.

El sensor QTR-8A, identifica las líneas del laberinto por medio de los sensores reflectivos centrales. De la misma manera puede identificar los indicadores de bifurcación y de final del laberinto, esto por medio de los sensores reflectivos de los costados (ver figura 7). Para utilizar este sensor con Arduino, es necesario trabajar con la librería QTRSensors.

Este sensor es el que envía las señales necesarias para generar nuevos nodos dentro de nuestro árbol de búsqueda a Arduino.

3.3 Control difuso de velocidad

Para el diseño del controlador difuso, se ha utilizado Matlab, para la creación de los conjuntos difusos y las reglas de operación. Se han considerado 3 variables de entrada, las cuales son: Visibilidad del vehículo que implica si se detecta un obstáculo; velocidad inicial que analiza la velocidad con la que el vehículo está avanzando en un instante definido y distancia a la que se encuentra el obstáculo. A cada una de estas variables se les ha definido un comportamiento difuso, este comportamiento puede ser observado en las figuras 8 a 10.

El análisis difuso de estas tres variables, definen la mejor respuesta para la velocidad del vehículo, representada por medio de los conjuntos difusos observados en la figura 11.



Fig. 7. Señales de bifurcación que el vehículo puede detectar por medio de los sensores reflectivos externos.

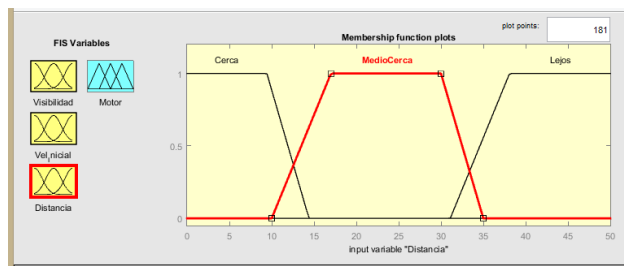


Figura 8.- Conjuntos difusos pertenecientes a la variable de entrada Distancia.

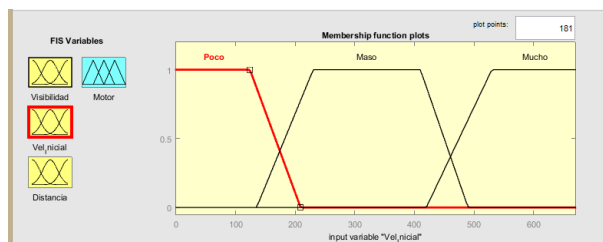


Figura 9.- Conjuntos difusos pertenecientes a la variable de entrada Velocidad inicial.

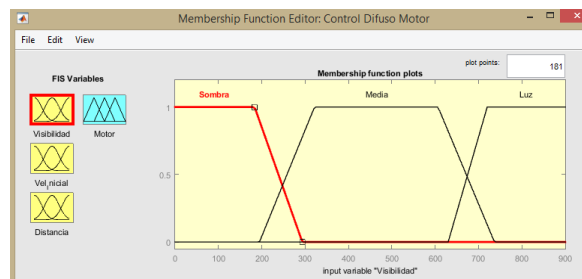


Figura 10.- Conjuntos difusos pertenecientes a la variable de entrada Visibilidad.

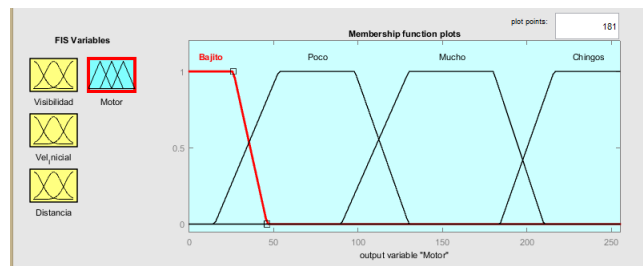


Figura 11.- Conjuntos difusos pertenecientes a la velocidad de salida del motor.

El comportamiento general del sistema propuesto, puede visualizarse en las figuras 12 a 14.

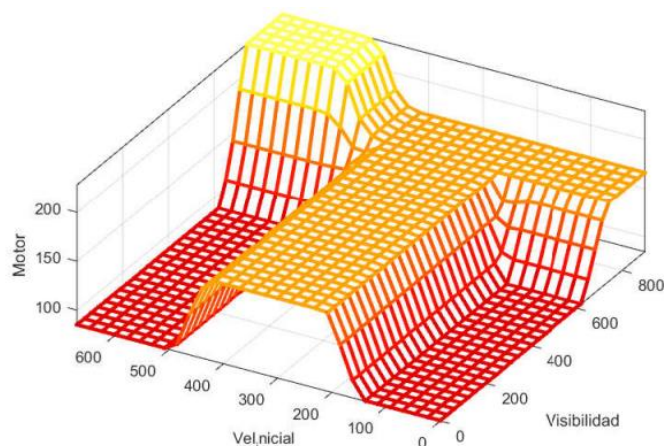


Figura 12.- Comportamiento general del sistema propuesto.

3.4 Pruebas y análisis

El vehículo se ha probado sobre un laberinto realizado con líneas negras, para lograr que el vehículo identificara las bifurcaciones y generara nuevos nodos, se colocaron marcas tal como se ve en la figura 15. El robot logró salir en el 80% de las ocasiones en que se sometió a prueba. Por otro lado, el sistema difuso ha funcionado correctamente cuando frente al vehículo se han colocado barreras o interferencias, ya que se ha controlado la velocidad de forma exitosa sin perder la medición

de las distancias entre nodos, ni perder la información ya almacenada en los nodos.

Hay que mencionar que el vehículo puede resolver la situación de dos maneras distintas: la primera es en un recorrido ciego, es decir, realiza todo el recorrido del laberinto, y por lo tanto del árbol binario, hasta el punto de salida. Y el otro es el recorrido informado, en este caso el vehículo ya guarda en su memoria el árbol de búsqueda que representa al laberinto, y busca llegar a la salida de forma directa, dicho de otra forma, ya no pierde en tiempo recorriendo caminos que no llevan al punto de salida.

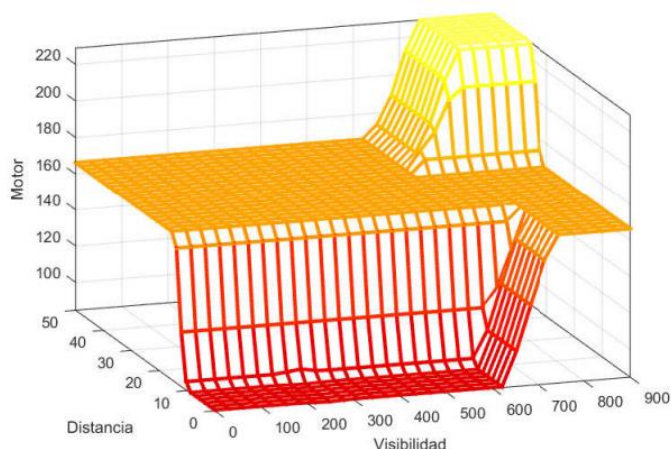


Figura 13.- Comportamiento general del sistema propuesto.

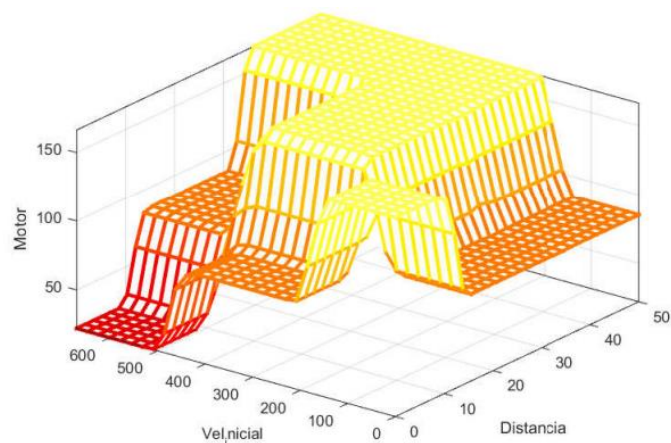


Figura 14.- Comportamiento general del sistema propuesto.

Toda la programación, ejecución, y procesamiento de la información relacionada al recorrido del laberinto se llevan a cabo dentro de la placa de desarrollo Arduino, sin embargo, el procesamiento de la información relacionada a la evaluación de velocidad debido a barreras o interferencias en el camino, se realiza dentro de Matlab. Los elementos usados, son dispositivos y sensores económicos y de fácil acceso, cualquier individuo puede tener la posibilidad de adquirirlos.

En el caso de la propuesta dada por Rahnama et al. (2012), se menciona la necesidad de un celular que toma las imágenes

para poder procesar la información antes de que el robot comience la búsqueda de la salida, en nuestro caso, no se requieren este tipo de dispositivos adicionales para su funcionamiento, ya que el software del vehículo presentado irá generando una imagen en memoria de los puntos del laberinto. Sin embargo, esta propuesta presenta una resolución del problema lenta, ya que es necesario recorrer varios caminos antes de encontrar el camino correcto.

4. TRABAJO FUTURO

En este momento solo se presenta el prototipo de este diseño, sin embargo, este diseño se plantea mejorar. Dentro del trabajo futuro se espera poder adaptar el vehículo con la capacidad de razonamiento artificial para que pueda no solamente resolver laberintos definidos, sino que pueda generar rutas alternas cuando un elemento obstaculice su recorrido.

Adicionalmente, se buscara generar un análisis comparativo entre diferentes algoritmos, entre ellos, realizar la comparación contra algoritmos del sistema operativo robótico ROS.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el prototipo de un vehículo que puede resolver esquemas laberínticos de forma exitosa por medio de la identificación de bifurcaciones en el laberinto y las interpretaciones de tales bifurcaciones como nodos dentro de un árbol binario. El prototipo desarrollado necesita identificar primero el laberinto completamente para poder generar el árbol binario, y de esta manera determinar la mejor ruta a tomar para encontrar la salida. Además, este prototipo presenta la capacidad de poder identificar obstáculos durante su recorrido, detener su movimiento o reducir su velocidad, sin afectar la búsqueda y generación de información dentro de los árboles binarios, todo esto mediante el uso de un controlador difuso para la velocidad.

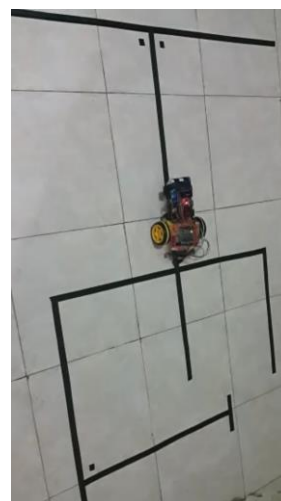


Fig. 15. Vehículo realizando el recorrido en un laberinto aleatorio.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido apoyado por los proyectos PIAPI 1824, PAPIME PE111519, PIAPIME 4.31.05.19.

REFERENCES

- Adelson-Velskiy, G. M., Arlazarov, V. L., & Donskoy, M. V. (1975). Some methods of controlling the tree search in chess programs. *Artificial Intelligence*, 6(4), 361-371.
- Adriansyah A. and Dani A. W. (2014), Design of small smart home system based on arduino, in *Proceedings - 2014 Electrical Power, Electronics, Communications, Control and Informatics Seminar, EECCIS 2014. In conjunction with the 1st Joint Conference UB-UTHM*.
- Bawa D. and Patil C. Y. (2013), Fuzzy control based solar tracker using Arduino uno, *Int. J. Eng. Innov. Technol.*
- Castillo L. T. & Aguilar (2019), Fuzzy Control for Wheeled Mobile Robots, in *Type-2 Fuzzy Logic in Control of Nonsmooth Systems*, pp. 85–96.
- Chandramohan, J. et al. (2017), Intelligent Smart Home Automation and Security System Using Arduino and Wi-fi, *Int. J. Eng. Comput. Sci.*
- Faris D. M. and Mahmood M. B. (2014), Data acquisition of greenhouse using arduino, *J. Babylon Univ. Appl. Sci.*
- Grinias J. P., Whitfield J. T., Guetschow E. D., and Kennedy R. T. (2016), An inexpensive, open-source USB Arduino data acquisition device for chemical instrumentation, *J. Chem. Educ.*
- Jamin N. F., Ghani N. M. A., Ibrahim Z., Masrom M. F., Razali N. A. A., and Almeshal A. M. (2018), Two-wheeled wheelchair stabilization using interval type-2 fuzzy logic controller, *Int. J. Simul. Syst. Sci. Technol.*
- Kaur T., Mahajan S., Verma S., Priyanka, and Gambhir J. (2017), Arduino based low cost active dual axis solar tracker, in *1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, ICPEICES 2016*.
- Mandula K., Parupalli R., Murty C. H. A. S., Magesh E., and Lunagariya R. (2016), Mobile based home automation using Internet of Things(IoT), in *2015 International Conference on Control Instrumentation Communication and Computational Technologies, ICCICCT 2015*.
- Pau V. M., G., & Salerno (2019), Wireless Sensor Networks for Smart Homes: A Fuzzy-Based Solution for an Energy-Effective Duty Cycle, *Electronics*, vol. 8, no. 2, p. 131.
- Powers, F. A., & Zanarotti, S. R. (1995). *U.S. Patent No. 5,442,784*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Rahnama, B., Elçi, A., & Metani, S. (2012, July). An image processing approach to solve Labyrinth Discovery robotics problem. In *Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW), 2012 IEEE 36th Annual* (pp. 631-636). IEEE.
- Ramadhan R. M., Sudiarso A., and Mahardika M. (2019), Design and Simulation of Auto-Shifting System in Manual Transmission Gearbox for Electric Race Car with Fuzzy Logic Controller on Matlab-Simulink, *J. Phys. Conf. Ser.*
- Román, J. A. A. (2010). Aplicación de secuencias de filtros de imágenes enfocados a la resolución de laberintos con robots Lego Mindstorms® (Doctoral dissertation, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso).
- Shajahan A. H. and Anand A. (2013), Data acquisition and control using Arduino-Android platform: Smart plug, in *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, ICEETS 2013*.
- Sharma S., Agrawal, & Bandopadhyaya, S. Springer (2019), Fuzzy Logic Controlled Variable Frequency Drives, *Harmon. Search Nat. Inspired Optim. Algorithms*, pp. 1153–1164.
- Vargas, J. M., Pinzón, C. T., & Patiño, C. R. (2008). Técnicas de inteligencia artificial para la solución de laberintos de estructura desconocida. *Scientia et technica*, 2(39).
- Zadeh L. A. (1965). Fuzzy Sets-Information and Control-1965, *Inf. Control*.
- Zolkapli M., Al-Junid S. A. M., Othman Z., Manut A., and Mohd Zulkifli M. A. (2013), High-efficiency dual-axis solar tracking developement using Arduino, in *Proceedings of 2013 International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering and Environment, TIME-E 2013*.

Procesamiento Digital de imágenes y Redes Neuronales Artificiales para la clasificación de marcas criminales en grafitis

Miguel Borboya M., Roberto Hernández S., Tania Lira B., David Tinoco V., Fernando Gudiño P.

**Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, C. Izcalli, México*

(e-mail: {bm.mike07 roberto.her3130, ITSE.LIRA}@gmail.com; dativa19@hotmail.com; ilciarmin@comunidad.unam.mx)}

Resumen: Uno de los objetivos de la inteligencia artificial es ayudar a resolver problemas de impacto social. Tanto los sistemas de procesamiento de imágenes y reconocimiento inteligente de patrones son herramientas útiles para este fin. El presente trabajo desarrolla un Sistema de alertas en una aplicación móvil que identifica la zona por geolocalización e indica las marcas presentes en diversos grafitis que dan una idea del índice de peligrosidad de la zona, estos índices se obtienen de la correlación entre los grafitis presentes y los reportes de grupos criminales en la zona.

Palabras Claves Red Neuronal Artificial, Procesamiento Digital de Imágenes, Reducción de criminalidad, Aplicación móvil, Web Services,

1. INTRODUCCION

En México los índices de inseguridad se han disparado en los últimos meses tal como lo reflejan los datos de la tasa de incidencia delictiva por entidad federativa de ocurrencia por cada cien mil habitantes reportada por el INEGI (2017), en donde se demuestra un incremento delictivo latente en los últimos 6 meses, por otra se observa que, en los municipios con mayor incidencia delictiva, son aquellos en los cuales la proliferación de pseudoarte en forma de grafiti ha aumentado. Este tipo de arte clandestino se ha utilizado históricamente para delimitar los territorios de influencia de los diversos grupos delictivos. Con base a las diferentes marcas se podrá realizar un mapeo entre dichas marcas y los altos índices delictivos presentes en las diferentes regiones del estado y visualizar el crecimiento de las diferentes incidencias delictivas. Tal como se muestra en la Tabla I y Fig. 1. Se observa un incremento considerable de los índices de criminalidad. La misma dependencia ha señalado que estos grupos recurren a 7 tipos de mensajes para demostrar su presencia en diferentes zonas del estado.

Si bien los mensajes más visibles se refieren a mantas con mensajes directos existen también grafitis con marcas específicas relacionadas a cada grupo delictivo (SESNSP, 2019). Son estas marcas los objetos de estudios de este proyecto. Es por ello que la existencia de una herramienta en tiempo real de mapeo entre los diversos tipos de grafitis y los niveles reales de incidencias delictivas se vuelve relevante. Las técnicas actuales de inteligencia artificial y la tecnología móvil existente son la motivación técnica del trabajo presente. El procesamiento digital de imágenes es una herramienta que nos permite detectar dentro de un área de interés en una imagen aquella información útil para la extracción de información relevante, por ejemplo, la

determinación de profundidad de color nos permitirá calcular el tiempo de vida del grafiti, mientras que un sistema de mejoramiento de imágenes y localización de regiones de interés, nos permiten definir áreas en las cuales podemos encontrar grafitis pertenecientes a diversos grupos criminales.

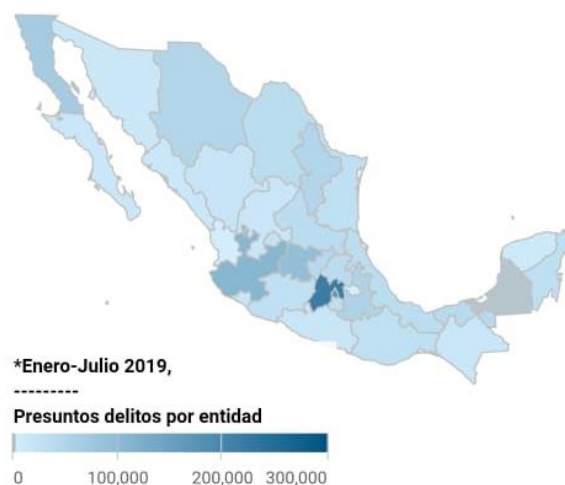


Fig 1 Índice Delincuencial por entidad Federativa.
Secretariado ejecutivo del Sistema Nacional

Así mismo, los sistemas de clasificación basados en técnicas de inteligencia artificial tal como una red neuronal artificial nos permitirán agrupar en categorías a los diferentes conjuntos de marcas (Cruz, 2017), para crear un mapa virtual de los grupos delictivos delimitando las zonas de influencia. Por otra parte, el

auge de los dispositivos móviles actuales nos permite acercar las técnicas de inteligencia artificial aplicadas en un problema de interés general que puede ser atacado por diversos frentes, en este caso mediante la prevención de delitos.

Tabla 1 Crecimiento anual en incidencia de delitos de alto impacto en México por cada 100mil habitantes

DELITOS	CRECIMIENTO PORCENTUAL REPECTO AL AÑO ANTERIOR
ROBO	-13.8%
SECUESTRO	35.7%
LESIONES	91.2%
EXTORSION	91.9%
HOMICIDIO	12.7%

2. SISTEMA DE RECONOCIMIENTO DE IMÁGENES

Un Sistema de reconocimiento de imágenes típicamente está conformado por los siguientes partes: Adquisición de imágenes, Normalización, Binarización, Análisis de documento, Segmentación, Extracción de características, Reconocimiento, Post- proceso (Cubero,2011, Nieto,2016, Russ,2016), realizadas de manera secuencial hasta obtener el resultado de clasificación adecuado para la tarea que se desea utilizar.

2.1 Procesamiento Digital de Imágenes

Se conoce como procesamiento digital de imágenes (PDI) Al conjunto de técnicas y procesos para descubrir o hacer resaltar información contenida en una imagen usando como herramienta principal una computadora. Los objetivos del PDI se basa en dos áreas de aplicación primordiales: El mejoramiento de la calidad de la información contenida en una imagen. El procesamiento de los datos contenidos en un escenario a través de una máquina de percepción autónoma (Russ,2016).

Entre las aplicaciones del PDI están el reconocimiento de patrones, el cual se refiere al procesamiento de la imagen resultante del proceso de deconvolución. En esta imagen se manipulan para mejorar la lectura de la misma e identificar propiedades que pudiesen tener algún significado.

La manipulación se lleva a cabo a través de tres subprocesos: realce de la imagen, reducción de ruido, segmentación y detección de bordes. El propósito de las técnicas de realce de la imagen es mejorar la apariencia de la misma para el observador. La selección de los métodos apropiados y la elección de los parámetros adecuados dependen de la calidad de la imagen original y de la aplicación. Entre las técnicas de realce están: Transformaciones puntuales. Transformaciones locales, Transformaciones globales y Transformaciones geométricas (Russ,2016).

2.2 Clasificación de Imágenes

Una RNA (Red Neuronal Artificial) son sistemas de procesamiento de la información cuya estructura y funcionamiento están inspirados en las redes neuronales biológicas (Fausett,1994, Haykin,20009). Consisten en un gran número de elementos simples de procesamiento llamadas neuronas que están organizados en capas. Cada neurona está conectada con otras neuronas mediante enlaces de comunicación, cada uno de los cuales tiene asociado un peso. Dichos pesos representan la información que será usada por la red neuronal para resolver un problema determinado.

Así, las RNA son sistemas adaptativos que aprenden de la experiencia, esto es, aprenden a llevar a cabo ciertas tareas mediante un entrenamiento con ejemplos ilustrativos. Entre las arquitecturas de RNA más conocidas están el perceptrón multicapa MLP(Haykin,20009), los mapas auto organizados de Kohonen (Fukushima ,1980, Haykin,20009), las redes de Hopfield (Haykin,20009), por mencionar solo algunos de ellos. En el desarrollo de este Proyecto se utiliza el paradigma de aprendizaje supervisado y el algoritmo de corrección de error Backpropagation dentro de una arquitectura de MLP (Fausett,1994, Haykin,20009).

3. SISTEMA DE RECONOCIMIENTO DE IMÁGENES

La elaboración de un Sistema de mapeo de criminalidad se desarrolla en diversas etapas, tal como se muestra en Fig. 3. En este momento el Desarrollo del Proyecto se encuentra en la construcción del Sistema de la aplicación final y en una etapa de pruebas de geolocalización. La descripción completa del sistema se da a continuación.

3.1 Procesamiento Digital de Imágenes

El Sistema se desarrolla de acuerdo a las siguientes etapas. Primeramente, se realiza el procesamiento de las señales en 5 fases: adquisición, preprocesado, mejoramiento de las imágenes, determinación de regiones de interés y extracción de características. En la segunda etapa, se realiza la implementación del sistema de clasificación por redes neuronales artificiales y finalmente en la última tapa se implementa la solución en un servidor y se explota un servicio web mediante un dispositivo móvil, tal como se observa en Fig. 2.

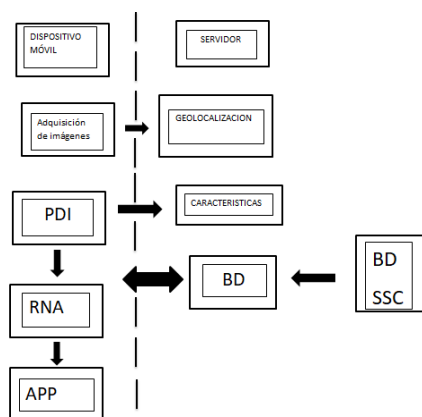


Fig 2. Sistema de reconocimiento-alerta propuesto

3.2 Sistema de pre- procesamiento

En esta etapa se definieron las propiedades de captura de imagen, la resolución y profundidad de bit para las diversas tomas, así mismo se redimensionaron las imágenes para tener un estándar de calidad durante todo el proceso (Hantson ,2011, Hoyer,2000). Cabe aclarar que las imágenes fueron tomadas con diversos dispositivos móviles de comunicación (smartphones) de diversas marcas y con calidades ópticas variadas.

3.3 Sistema de mejoramiento de imágenes

Dentro de esta etapa se aplicaron diversas técnicas de realce. En primer lugar, se realizó un análisis de la composición de color de las imágenes, con el fin de determinar la profundidad de color. Es importante mencionar que los índices de tonalidad dependen del fondo que se tiene, tal sea el caso de si la pared es blanca, gris, etcétera, tal como se muestra en Fig. 3. Sin embargo, la intensidad es permanente en superficies iguales, por lo cual se puede establecer una correlación entre los colores sin importar el tipo de muro o tonalidad del mismo (Richardson,2008).

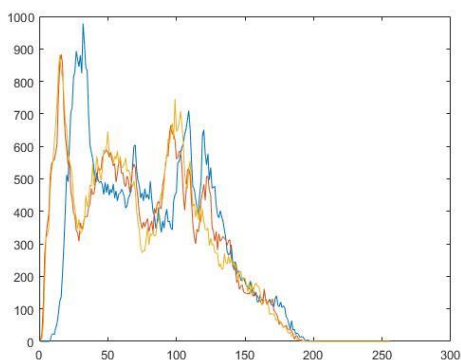


Fig 3. Intensidades de color para un grafiti

Posteriormente el sistema pasa por otras etapas hasta la determinación de las regiones de interés. El proceso de Binarización es una técnica de segmentación que se emplea cuando existe una gran diferencia entre el objeto de análisis y el

fondo de la imagen, evaluando la similitud y las diferencias entre los píxeles en escalas de grises, consiste entonces, en establecer un umbral óptimo que permita la mejor separación del objeto (Richardson,2008). Como paso consecuente se convirtió a las imágenes de escala RGB a escala de Grises, y se ecualizó el histograma para mejorar las diferencias y lograr así una segmentación más clara. Posteriormente se convirtió a una imagen binaria. El resultado del procedimiento se visualiza en Fig. 4.

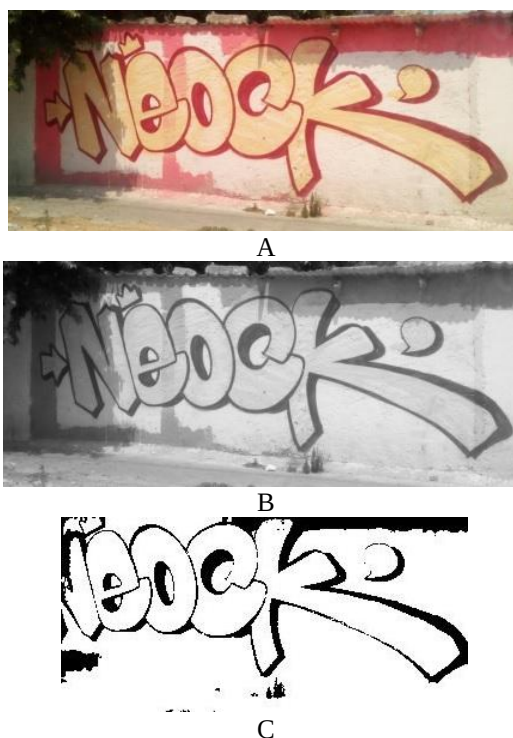


Fig 4. Procedimiento de conversión. En A imagen original. En B imagen en escala de grises. En C imagen binarizada después de ecualización de histograma.

3.4 Selección de las regiones de interés (ROI) y extracción de características

Dentro del desarrollo del proyecto se seleccionaron de manera automática regiones con alta conectividad entre píxeles, para lo cual las imágenes binarias fueron sometidas a un proceso de erosión y dilatación. Estas operaciones morfológicas simplifican imágenes y conservan las principales características de forma de los objetos. Un sistema de operadores de este tipo y su composición permite que las formas subyacentes sean identificadas y reconstruidas de forma morfológica óptima a partir de sus formas distorsionadas y ruidosas.

Un ejemplo lo vemos en Fig. 5. Una vez obtenido los grafitis estos se guardan como matrices de dimensión 360 por 150 píxeles que son alimentados a la red neuronal en forma de vectores de datos binarios.

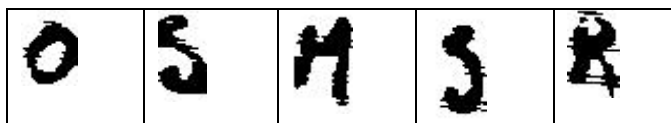


Fig 5 Delimitación de una región de interés de tamaño 38X53 pixeles

4. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN CON MLP

Para la creación del sistema de red neuronal se realizaron 3 etapas: la primera es una etapa de preprocesamiento, para reducir la dimensionalidad de los vectores de entrada; la segunda es la etapa de entrenamiento de la red neuronal; y por último se encuentra la etapa de evaluación del sistema. Para ello se estableció que el número de clases es de 180, correspondientes al número de muestras totales menos aquellas que se repetían determinado por un coeficiente de similitud (Behnke, S, 2003, Fausett, 1994, Haykin, 20009).

El algoritmo Backpropagation (Fausett, 1994, Haykin, 20009) se utilizó como método de entrenamiento de la red. El primer paso en la aplicación de este método consiste en la generación aleatoria del conjunto de pesos de la red neuronal. El valor de inicialización está dado por una distribución uniforme, y cuyo rango de valores óptimos es un parámetro en estudio. Adicionalmente se consideraron los parámetros de la Tabla 2.

Tabla 2 Parámetros de configuración de la red neuronal bajo el algoritmo Backpropagation

Parámetro	Valor
Cantidad de ciclos (épocas)	2000
Error máximo admisible	0.05
Umbral de acierto	0.35
Tasas de aprendizaje (α)	{0.01, 0.05, 0.1, 0.25}
Taza de momento (β)	{0, 0.01, 0.05, 0.1}

5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Tal como se indicó anteriormente, el sistema se encuentra en la etapa final de desarrollo, por el momento únicamente se tiene los resultados del sistema de procesamiento de imágenes y del sistema de clasificación de la red neuronal. Actualmente se cuenta con una base de datos de 500 imágenes de diversos municipios correspondientes a diversas regiones del Estado de México, Morelos y alcaldías de la Ciudad de México. De los cuales se tienen datos de la probable creación de los grafitis en un 15% de los casos y se han identificado la participación de al menos 10 grupos delictivos, incluyendo algunos de cobertura tanto regional como nacional. Se omiten datos de los mismos por cuestiones de seguridad. En cuanto la capacidad de identificación de los grafitis se procesó para este experimento 200 muestras y los resultados se ven reflejados en la Tabla 3 y Fig 6.

Tabla 3 Resultados de la segmentación e identificación de grafitis

Parámetro	Valor
Promedio de grafitis por imagen	1.2
Grafitis identificados y etiquetados correctamente (%)	97
Grafitis descartados erróneamente(%)	3
Regiones clasificadas erróneamente(%)	2
Regiones descartadas correctamente(%)	98

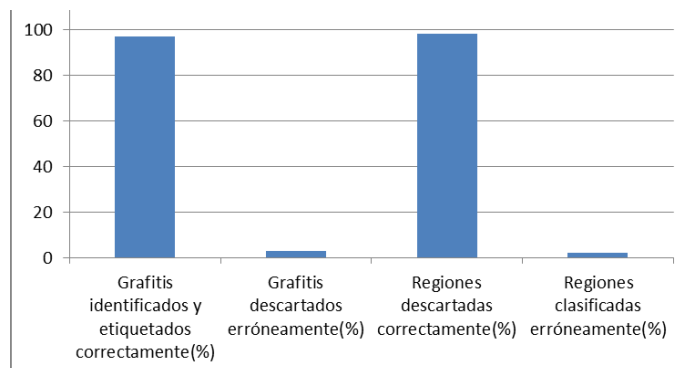


Fig 6. Resultados de identificación correcta de regiones de interés

Podemos observar que la precisión y exactitud del Sistema son altos con una baja razón de falsos positivos. Por último, los resultados del sistema de clasificación por medio de RNA se observan en la Tabla 4. Este sistema se probó con las mismas 200 muestras utilizadas para el experimento anterior. Así mismo en Fig 7 se ve los tiempos de entrenamiento para diferentes tasas de aprendizaje.

Tabla 4 Resultados experimentales del sistema de clasificación por redes neuronales artificiales

Parámetro	Valor
Número de épocas	1000
Grafitis identificados correctamente en entrenamiento (%)	94.32
Desviación estándar en entrenamiento (%)	0.83
Grafitis identificados correctamente en validación (%)	83.2
Desviación estándar en validación (%)	2.0
Grafitis identificados correctamente en promedio global (%)	92.1
Desviación estándar global (%)	0.8

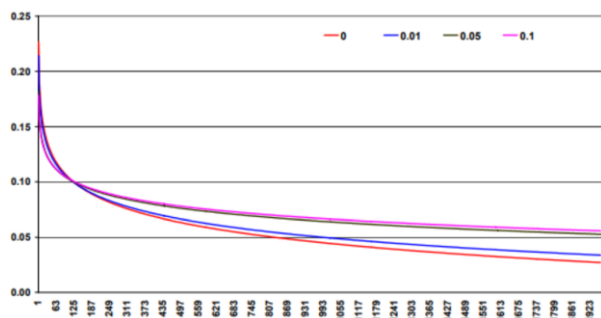


Fig 7. Error del Sistema después de 2000 épocas de entrenamiento

Para finalizar en Fig. 8 se muestra la aplicación desarrollada en una etapa de prueba.

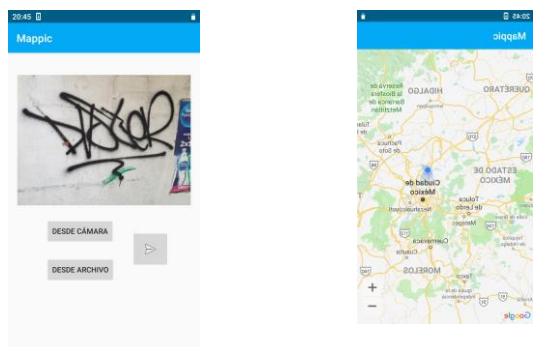


Fig 8. Implementación de la solución en dispositivo Android.

6. CONCLUSIONES

Entre las capacidades de una red neuronal debidamente entrenada están las de leer, comparar y clasificar ciertos tipos de información. En este caso particular, la información es obtenida directamente del procesamiento digital de fotos de grafitis. Las cuales pasaron por etapas de codificación, en formato escala de grises y binario, y posteriormente de ser tratadas, pasan por una etapa de filtración con el fin de conservar únicamente las regiones de interés. El propósito de esta red neuronal es delimitar, dentro del mapa del estado de México, las zonas de mayor concurrencia criminal, a fin de prevenir incidentes como asaltos o secuestros, mediante una aplicación aun en desarrollo que avise al usuario de cuando ronda estas zonas. A su vez, el usuario contribuirá con el crecimiento de las bases de datos, mediante la captura de la información prima. Esto supone un cierto grado de sustentabilidad debido a que se habla de tecnología existente en el mercado sin contar el hecho de lo accesible que son los dispositivos móviles.

7. REFERENCIAS

- Behnke, S (2003). Hierarchical Neural Networks for Image Interpretation, volume 2766 of Lecture Notes in Computer Science. Springer
- Cruz, F. C., et al (2017). Efficient feature selection for neural network based detection of flaws in steel welded joints using ultrasound testing. Ultrasonics, 73, 1-8.
- Cubero, S., et al (2011). Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables. Food and Bioprocess Technology, 4(4), 487-504.
- Fausett, L. (1994). Fundamentals Of Neural Networks: Architectures, Algorithms, and Applications., New Jersey, USA: Prentice-Hall.
- Fukushima, K (1980). Neocognitron: A self-organizing neural network for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position. Biological Cybernetics, 36(4):193-202
- Hantson, S., et al (2011). Cadena de preprocesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. Revista de Teledetección, 36, 51-61.
- Haykin, S. S. (2009). Neural Networks and learning machines. New York: Prentice Hall
8. Hoyer and Hyvarinen (2000). Independent component analysis applied to " feature extraction from colour and stereo images. Network: Computation in Neural Systems, 11(3):191-210
- INEGI, (2017). Información acerca del número de eventos individuales de victimización delictiva reportados. México. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/incidencia/>
- Nieto, D. (2016). Sistema de reconocimiento de kanjis japoneses basado en procesamiento digital de imágenes aplicado a dispositivos-móviles. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lis/nieto_b_d/capitulo2.pdf
- Richardson, L., and Ruby, S. (2008). RESTful web services. " O'Reilly Media, Inc."
- Russ, J. C. (2016). The image processing handbook. CRC press.
- Secretariado Ejecutivo del Sistema Nacional de Seguridad Pública (SESNSP) (2019). Estadísticas de Incidencia Delictiva. <https://www.gob.mx/sesnsp/articulos/incidencia-delictiva?idiom=es>

El Uso de Indicadores de Gestión para la Toma de Decisiones

M. Guillén R., H. Hernández G.

*Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Gerencia Análisis de Redes,
Cuernavaca; Mor, CP 62490, México (e-mail: mguillen@ineel.mx, hkg@ineel.mx).*

Resumen: El concepto de Inteligencia de Negocios se caracteriza por la utilización de información para generar conocimiento con el fin de mejorar los procesos de la empresa y fundamentar la toma de decisiones. Los responsables de la toma de decisiones se apoyan en un concepto que son los indicadores de gestión. En este trabajo se describe la forma de definir, obtener y evaluar los indicadores de gestión. Además se muestra una arquitectura general de una plataforma de Inteligencia de Negocios y su implementación que permite el procesamiento analítico en línea (OLAP) la cual es una tecnología que permite acceder, extraer, organizar y analizar datos en línea y la presentación gráfica de la información en tableros de control y de mando.

Palabras clave: Business Intelligence, KPI, OLAP, dashboards.

1. INTRODUCCIÓN

Las bases de datos y los sistemas de administración de datos han jugado un papel primordial en el crecimiento y éxito de las organizaciones corporativas, los cambios en la economía y la globalización de las empresas han aumentado su importancia. Esto ha dado origen a que los departamentos de tecnología de la información (TI) inicien la búsqueda y explotación de nuevas herramientas y paradigmas para el procesamiento de datos y de la información generada.

Con las bases de datos relacionales como piedra angular de la administración de los datos corporativos, los expertos del conocimiento y los estrategas empresariales buscan y utilizan herramientas analíticas avanzadas con la intención de ser más competitivos. Esto dio origen al término Inteligencia de Negocios (BI, por sus siglas en inglés, Business Intelligence) que se define como la transformación de los datos de una empresa en conocimiento para obtener una ventaja competitiva (Gartner 2007).

1.1. Inteligencia de Negocios

Desde un punto de vista más pragmático y asociándolo directamente a las tecnologías de la información, la BI se define como el conjunto de metodologías, aplicaciones y tecnologías que permiten reunir, depurar y transformar datos de los sistemas operacionales y datos no estructurados en información estructurada, para su explotación directa o para su análisis y conversión en conocimiento que sirva de soporte para la toma de decisiones más efectivas considerando el estado actual y futuro de la organización (Biere 2003, Moss et al 2003, Gartner 2007). De esta forma, la BI no solo encapsula la información estática,

sino que permite la extracción de patrones y tendencias que no son obvios en forma inmediata. El usuario debe ser capaz de visualizar las relaciones entre clientes, vendedores, productos, inventarios, ventas y la división geográfica, entre otros elementos, de la empresa. Sin embargo, se deben entender esas relaciones en un contexto cronológico, ya que el tiempo proporciona el significado a las observaciones obtenidas.

La toma de decisiones se apoya en un concepto que son los indicadores clave de desempeño. Un indicador se define como la relación entre las variables cuantitativas o cualitativas, que permite observar la situación y las tendencias de cambio generadas en el objeto o fenómeno observado, respecto de objetivos y metas previstos e influencias inesperadas. Los indicadores pueden ser valores, unidades, índices, series estadísticas, etc.

En la selección y obtención de los indicadores clave de desempeño en una empresa es importante incluir todos aquellos valores que se desean medir para poder realizar y agilizar el proceso de toma de decisiones. Medir es comparar una magnitud con patrón preestablecido. Es conveniente seleccionar las variables críticas para el éxito de la empresa. El proceso de la selección de los indicadores es una actividad compleja, es por ello que se han creado modelos (Parmenter 2007, Franceschini et al 2007, Epstein et al 2001) que pueden utilizarse como base para su obtención.

1.2. Clasificación de indicadores

En la figura 1, se muestra una clasificación de los diferentes tipos de indicadores y se listan a continuación:

- Indicadores clave de resultados (*KRI, key result indicators*): Nos indican que hacer en las áreas de resultado clave. Son métricas de desempeño genéricas y son el resultado de muchas acciones.
- Indicadores de desempeño (*PI, performance indicators*): Estos indicadores nos indican que hacer y están enfocadas a pequeñas áreas de la empresa.
- Indicadores clave de desempeño (*KPI, key performance indicators*): son un conjunto de medidas enfocadas en aquellos aspectos del desempeño de la organización más críticos para el actual y futuro éxito de la empresa. Los indicadores se componen de un número y una unidad de medida (Franceschini et al 2007), el número indica la magnitud (cuanto) y la unidad muestra el significado (qué).

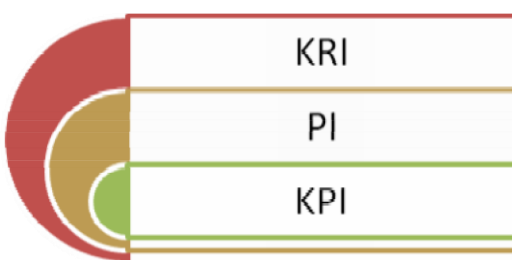


Figura 1. Clasificación de indicadores clave

1.3. Proceso de selección de indicadores clave de desempeño

En el proceso de selección de indicadores clave de desempeño en una empresa se debe de tomar en cuenta la siguiente serie de pasos definidos en (Parmenter 2007, Franceschini et al 2007) que deben ser realizados por el área de planeación estratégica de la empresa.

- Misión, Visión:** la definición de la misión y visión de la empresa debe estar estructurada de tal forma que corresponda con el interés de la empresa y como se ve en un futuro. Son la parte central en la definición de indicadores clave ya que nunca debe perderse de vista estos dos elementos de la planificación estratégica.
- Estrategias, objetivos, iniciativas:** son el medio por el cual se va a cumplir la misión y visión de la empresa, es decir, cada área debe tener en cuenta y cumplir individualmente con sus estrategias y objetivos para que en un conjunto con las demás áreas se logre el interés y el futuro de la empresa.
- Factores de éxito críticos:** se realiza una revisión en los documentos estratégicos de la organización de tal manera que, crear un diagrama en el cual se describan las partes que deben ser atendidas de acuerdo al modelo seleccionado (Parmenter 2007, Franceschini et al 2007, Epstein 20019) con las partes estratégicas de la empresa.
- Indicadores con regla 10, 80, 10:** En (Parmenter 2007) se sugiere una regla en la creación de indicadores 10 KRI, 80

PI y 10 KPI. Para los fines de esta investigación se definirán únicamente los indicadores clave de desempeño.

2. PLATAFORMA DE BI

De acuerdo con (Gartner 2007) una plataforma de BI debe proporcionar las capacidades, organizadas en tres categorías de acuerdo a su funcionalidad. A continuación, se describen los principales componentes de un BI (Inmon et al 1998, Kimball 1996, Tsai 2003, Gartner 2007).

a) Integración.

Infraestructura de BI – Engloba a todas las herramientas que se utilizan dentro de la plataforma que usan y comparten los mismos mecanismos de seguridad, metadatos, administración, integración del portal, modelos de objetos y motor de consultas.

Administración de los metadatos – Se considera el más importante de los componentes. Debe proporcionar una forma robusta de búsqueda, captura, almacén, reuso, y publicación de objetos de metadatos, tales como dimensiones, jerarquías, mediciones, métricas de eficiencia y plantillas para los reportes de metadatos.

Desarrollo – La plataforma de BI debe proporcionar un conjunto de herramientas y kit de desarrollo de software para crear aplicaciones BI.

Flujo de trabajo y colaboración – Esta capacidad habilita a los usuarios de BI a compartir y a tratar información a través de carpetas públicas. Además, las aplicaciones pueden generar y rastrear eventos de usuarios y aplicaciones específicas, con base en reglas de negocios.

b) Entrega de Información

Consultas y reportes – Se refiere al tipo de consultas fundamentales y funciones básicas de generación de reportes. Los profesionales de la TI típicamente diseñan sus consultas a la medida o predefinidas, extrayendo la información detallada directamente de los sistemas administradores de la base datos. El análisis en este punto es muy simple, formado únicamente por ordenamientos o agregaciones básicas.

Cuadro de mando analítico (Dashboard) – Elaboración de informes, resúmenes e indicadores clave para la gestión KPI que permiten a los administradores de la empresa analizar los resultados de la empresa en forma rápida y eficaz. En la práctica es una herramienta de consulta orientada a la obtención y presentación de indicadores para los directivos de la empresa (frente a la obtención de informes y listados).

Integración con Microsoft Office – En algunos casos las plataformas de BI se utilizan como una capa intermedia para administrar y ejecutar tareas de BI, pero Microsoft Office (especialmente Excel) actúa como cliente BI.

c) Análisis

Visualización avanzada – Debe proporcionar la habilidad de desplegar numerosos aspectos de los datos en forma de gráficas y diagramas interactivos, en lugar de reportes con columnas y renglones.

La ciencia de datos - “es un campo interdisciplinario que involucra métodos científicos, procesos y sistemas para extraer conocimiento o un mejor entendimiento de datos en sus diferentes formas, ya sea estructurados o no estructurados, lo cual es una continuación de algunos campos de análisis de datos como la estadística, la minería de datos, el aprendizaje automático y la analítica predictiva” (Wikipedia 2019). Ha representado la evolución natural de los sistemas de administración de datos basados en conocimiento y su objetivo es automatizar el proceso de descubrimiento de tendencias y patrones ocultos, tendencias y correlaciones que pueden ser recuperados con el mínimo de entradas por parte del usuario. Las operaciones típicas son la clasificación (categorizar nuevos elementos), asociación (identificación de patrones y tendencias) y análisis de agrupamientos (identificación de agrupamiento de datos a través de similitud de atributos). La ciencia de los datos incorpora la utilización de tecnologías basadas en redes neuronales, árboles de decisión, reglas de inducción, análisis de series temporales y visualización de datos entre otras tecnologías.

Cuadro de mando analítico (Balanced Scorecard) - Este modelo señala que la estrategia de la empresa es el punto de referencia para todo proceso de gestión interno. Con él, los diferentes niveles de dirección y gestión de la organización disponen de una visión de la estrategia de la empresa traducida a un conjunto de objetivos, iniciativas de actuación e indicadores de evolución.

OLAP - El procesamiento analítico en línea extiende las capacidades básicas de la obtención de reportes de los sistemas de procesamiento de información, permitiendo un análisis multidimensional de los datos almacenados en una variedad de perspectivas y jerarquías.

El término OLAP se refiere al tipo de aplicaciones que le permiten al usuario analizar los datos interactivamente. La tecnología OLAP es una categoría del software que permite a los analistas, directores y ejecutivos llegar a comprender los datos accediendo a ellos de forma rápida, coherente e interactiva, y con una amplia variedad de puntos de vista sobre la información que ha sido transformada a partir de datos sin procesar, para reflejar la dimensionalidad real de la empresa tal como la entienden los usuarios. La función de OLAP se caracteriza por un análisis

dinámico multidimensional de los datos corporativos consolidados que ayudan al usuario final en tareas de navegación y de análisis, tales como:

- a) Cálculos y aplicación de modelos en todas las dimensiones, a través de jerarquías y/o todos los miembros.
- b) Análisis de tendencias en períodos de tiempo secuenciales.
- c) Fragmentación de subgrupos para visualizarlos en pantalla.
- d) Rastreo minucioso a niveles más detallados de consolidación.
- e) Alcanzar detalles de datos subyacentes.
- f) Rotación hacia nuevas comparaciones de dimensión en la zona de visualización.

El análisis estadístico suele necesitar el agrupamiento de varios atributos. Los atributos se pueden clasificar en dos tipos: a) atributos de medida, que miden un valor y pueden agregarse y b) atributos de dimensión, que definen la dimensión en la que se ven los atributos de medida y los resúmenes de los atributos de medida. Los datos que pueden modelarse como atributos de valor y atributos de medida se denominan datos multidimensionales.

Existen diferentes formas de implementar los sistemas OLAP los primeros sistemas utilizaban arreglos de memoria multidimensionales para almacenar los cubos de datos, a estos sistemas se les denomina OLAP multidimensionales o MOLAP (por sus siglas en inglés). Posteriormente, los servicios OLAP se integraron a los sistemas relacionales y los datos se almacenaron en las bases de datos relacionales, a estos sistemas se les denomina OLAP relacionales (ROLAP, por sus siglas en inglés). Los sistemas híbridos, que almacenan algunos resúmenes en memoria, y los datos básicos y otros resúmenes en base de datos relacionales se denominan OLAP híbridos (HOLAP, por sus siglas en inglés).

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente el procesamiento de datos y la toma de decisiones se caracterizan por aplicaciones que involucran el acceso y manipulación de la información almacenada en diferentes sistemas de bases de datos y sistemas de información. Estos sistemas normalmente se localizan en software autónomo y heterogéneo, así como en plataformas de cómputo que se encuentran distribuidas en varios nodos de una red de computadoras. Su distribución refleja la naturaleza descentralizada de las empresas modernas en el mundo, mientras que su heterogeneidad y autonomía surgen como una consecuencia de la diversidad de los requerimientos de procesamiento de información. Originalmente estos sistemas se ejecutaban en forma aislada para soportar aplicaciones individuales, pero dadas las condiciones actuales de operación, es evidente la necesidad de cooperación y la integración entre ellos.

Para integrar los sistemas antes mencionados se realizó la integración de todos los datos dentro de una sola base de datos. Esta solución se conoce como Almacén de Datos (Datawarehousing). Un *Almacén de Datos* (Inmon et al 1998, Kimball 1996) es una base de datos que se diseña con el objetivo fundamental de consultar y analizar información y no para el procesamiento de transacciones. Usualmente tiene datos históricos recolectados de otros sistemas. Un *Almacén de Datos* soporta la administración de datos a nivel empresarial y cumple con las siguientes características: a) es orientada al tema, b) integrada, c) persistente, d) variante en el tiempo y e) contiene datos consolidados y a detalle. Por su parte un *data mart* es un subconjunto de un *Almacén de Datos* enfocado hacia una unidad de negocios en especial, por ejemplo, para un departamento o una división (Inmon et al 1998, Kimball 1996). La metodología utilizada para el diseño, desarrollo e implementación de este *Almacén de Datos*, así como el modelo de datos multidimensional utilizado en su diseño (Rafanelli 2003, Torben 2000) queda fuera del alcance de este artículo, el cual se enfoca a BI.

Dadas las características de los *Almacenes de Datos* y las bondades de la tecnología Web se requiere desarrollar un sistema Web que permita el análisis de la información multidimensional para la toma de decisiones utilizando tecnología OLAP y BI.

4. SOLUCIÓN PROPUESTA

Dados los problemas anteriormente expuestos, se realizó una investigación exhaustiva sobre los principales productos BI disponibles en el mercado (Bussines Object, Oracle, Cognos, SAS, OLAP sobre SQL Server) (Biere 2003, Moss et al 2003, Reinhold 2007, Gartner 2007) y todos ellos nos llevan a una arquitectura típica como se muestra en la figura 2. Esta arquitectura muestra que los sistemas frontales utilizados para el análisis de la información son propietarios de los servidores OLAP utilizados y a su vez estos toman la información de los *Almacenes de Datos* o de los *Data Mart*.

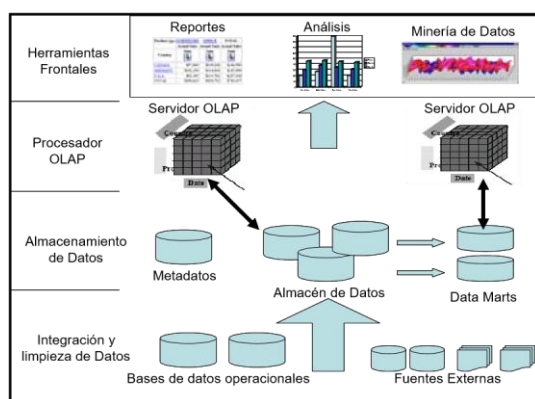


Figura 2. Arquitectura típica de un sistema OLAP.

En este trabajo se presenta una arquitectura que incluye dos elementos básicos que permiten el análisis de la información a través del Web, los elementos son: a) un servidor Web y Microsoft Excel como herramienta OLAP. Esta propuesta tiene la ventaja que utiliza componentes disponibles universalmente y que son libres o de bajo costo, por ejemplo el servidor de aplicaciones TOMCAT (Tomcat 2019), o el servidor Web Apache y Microsoft Excel (Frye et al 2003, Wayne 2007, Walkenbach 2003).

5. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

La figura 3 muestra la arquitectura de la plataforma BI basado en Web para el análisis de información en BI. A continuación se describen cada uno de los componentes:

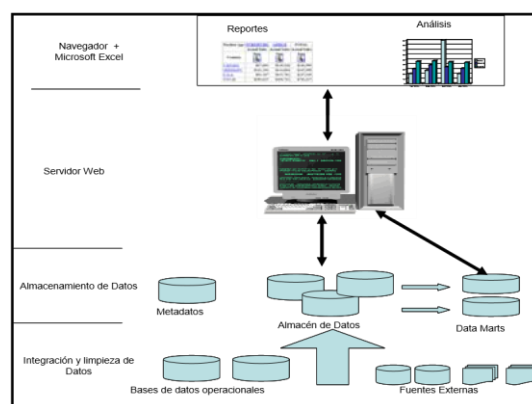


Figura 3. Arquitectura de sistema basado en Web.

- Actualmente los navegadores (Microsoft Explorer, Firefox, Opera, entre otros) pueden capturar programas junto con los documentos HTML y ejecutarlos en el navegador, en modo seguro, es decir sin dañar los datos de la computadora del usuario. El servidor Web o el servidor de aplicaciones (TOMCAT, Apache) permiten administrar documentos de multimedia o cualquier tipo de documentos almacenados en el servidor.
- Microsoft Excel (Frye et al 2003, Wayne 2007, Walkenbach 2003) permite el análisis en línea, proporciona funciones para la manipulación instantánea de la estadística, generación de reportes en línea, presentación de la información en diferentes tipos de gráficas de las múltiples variables, permite identificar tendencias, patrones o excepciones de comportamientos de la información, facilita el proceso de transformar la estadística tradicional, en modelos de datos y a su vez en cubos de datos, lo que permite analizar en forma multidimensional a través de la reportes y gráficas dinámicas (Pívor Table o Pívor Chart). Los reportes de tablas dinámicas son tabulaciones cruzadas de una lista de datos.
- El *Almacén de Datos* que contiene la base de datos multidimensional.

6. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

Para la implementación del sistema se realizó lo siguiente:

- Se desarrolló un sitio Web de la forma tradicional.
- Se definieron los libros de Microsoft Excel con un comportamiento predefinido (macros) y programado con el lenguaje *Visual Basic for Application* (VBA, por sus siglas en inglés). Las nuevas versiones de Excel permiten obtener información de diferentes fuentes de datos como son: bases de datos, archivos tradicionales, cubos de datos, archivos XML, Servicios Web y también de páginas Web.
- Los libros de Excel se almacenaron en el servidor Web y se generaron las páginas HTML que hacen referencias a estos libros. Cuando se presentan estas páginas en el navegador y se invoca a los libros de Excel, sucede lo siguiente: el archivo XLS de Excel es enviado del servidor Web al navegador y éste al recibirlo invoca a la aplicación Microsoft Excel y ejecuta en forma automática todos los macros programados. Asociado a cada libro de Excel existe una página JSP (Java Server Page) que realiza la consulta a la base de datos y presenta los datos como una página HTML de donde el libro de Excel toma los datos.

7. CONCLUSIONES

Con el presente trabajo los diferentes tipos de usuario, como analistas, ejecutivos de mandos medios y superiores podrán contar con información precisa y adecuada para su labor en la toma de decisiones. El sistema cuenta con las siguientes características:

- Acceso a los datos a través de la Web.
- Integración total y transparente con Microsoft Excel que permite el uso de toda su funcionalidad para el análisis de información en la ayuda de tomas de decisiones.
- Visión conceptual multidimensional.
- Dimensionalidad genérica.
- Operación de dimensiones cruzadas sin restricciones.
- Soporte multiusuario.
- Accesibilidad.
- Transparencia.
- Manipulación de datos intuitiva.
- Buen rendimiento para crear informes consistentes.
- Creación de informes flexibles.
- Generación de reportes flexibles con diferentes tipos de gráficas.

Esta propuesta cumple con los requerimientos de una plataforma BI, con la ventaja que el costo de la infraestructura utilizada es mínima, lo que permite que esta plataforma se encuentre al alcance de todo tipo de usuarios.

REFERENCIAS

- Biere Mike, (2003). *Business Intelligence for the Enterprise*, Prentice Hall PTR, ISBN: 0-13-141303-1.
- Decker Reinhold, Lenz Hans-J, (2007). *Advances in Data Analysis*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3540-70980-0.
- Epstein, M.J., Westbrook, R.A., (2001). *Linking Action to Profits in Strategic Decision Making*, MIT Sloan Management Review, Spring, 42, 3, pp. 39-49
- Franceschini F., Galetto M., Maisano D., (2007). *Management by Measurement – Design Key Indicators and Performance Measurement Systems*.
- Frye Curtis, Freeze Wayne S. and Buckingham Felicia, (2004). *Microsoft Excel 2003 Programming Inside Out*, Editorial Microsoft Press, ISBN:0735619859
- Gartner, (2007). *Magic Quadrant for Business Intelligence Platforms, 1Q07*. Gartner RAS Research Note G00145507.
- Hall Marty, (2000). *Servlets and JavaServer Page*, Editorial Pearson Education.
- Inmon W.H., Imhoff C., and Sousa R., (1998). *Corporate Information Factory*, Wiley Computer Publishing.
- Kimball R., (1996). *The Data Warehouse Toolkit, Practical Techniques for Building Dimensional Data Warehouse*, John Wiley & Sons. Inc.
- Moss Larissa T., Atre Shaku, (2003). *Business Intelligence Roadmap: The Complete Project Lifecycle for Decision Support Applications*, ISBN: 0-201-78420-3.
- Parmenter, D., (2007). *Key Performance Indicators - Developing, Implementing and Using Winning KPIs*.
- Rafanelli Maurizio, (2003). *Multidimensional Databases: Problems and Solutions*, Idea Group Publishing, ISBN:1591400538.
- Tomcat (2019). *Contenedor Web Tomcat*, <http://jakarta.apache.org/tomcat/index.html>. Consultada sept. 2019.
- Tsai, Edison, E., (2003). *Developing a Data Warehouse Using MDBMS and OLAP Techniques*, A Thesis Presented to the Faculty of the College of Computer Studies Graduate Studies program De La Salle University Professional Schools Inc.
- Torben Bach Pedersen, (2000). *Aspects of Data Modeling and Query Processing for Complex Multidimensional Data*, Ph.D. Dissertation, faculty of Engineering and Science at Aalborg University, Denmark.
- Walkenbach John, (2003). *Excel 2003 Bible*, Editorial Wiley Publishing, Inc. ISBN: 0-7645-3967-1.
- Wayne L. Winston, (2007). *Microsoft Office Excel 2007: Data Analysis and Business Modeling*, Editorial Microsoft Press, ISBN: 9780735623965.
- Wikipedia, (2019). https://es.wikipedia.org/wiki/Ciencia_de_datos, consultada en septiembre de 2019.

Creación de la Ontología Temporal del Patrón de Análisis para Inventarios

Valentino Velázquez Olivera, Moisés González García,
René Santaolaya Salgado, Noé Alejandro Castro Sánchez

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET)
e-mail: {valentino.velazquez18ce, moises, rene}@cenidet.edu.mx, noe.acastro@gmail.com

Resumen: En el contexto de la investigación para definir un método para combinar patrones de análisis considerando su estructura y su dinámica, mediante ontologías temporales, fue necesario construir la descripción del patrón de análisis para inventarios (PAI), mediante una ontología temporal, que represente su comportamiento dinámico, para su combinación con alguno de los dos patrones de análisis que se tienen descritos de esta manera, hasta ahora, en nuestro grupo de investigación. En este artículo se presentan: la creación de la Ontología Temporal (OTPAE) del PAI; la verificación de la consistencia semántica temporal y; la verificación de la satisfacibilidad de las fórmulas de la lógica de descripción temporal ALC_{LTL} (una combinación de la lógica descriptiva ALC y la lógica temporal LTL) que lo representan. La OTPAE del PAI representa los aspectos estructurales y de comportamiento dinámico en el dominio de inventarios. Por cada requerimiento funcional del PAI se construye una fórmula de la lógica de descripción temporal ALC_{LTL} , que representa formalmente el comportamiento dinámico en el PAI. Estas fórmulas se incorporan en la ontología temporal, con ayuda del plugin Chronos, en el editor de ontologías Protegé y se construyen secuencias de interpretaciones, que se ajustan a cada fórmula ALC_{LTL} . Para verificar la consistencia semántica temporal de la ontología se utiliza el razonador Pellet. Además, se utiliza el verificador de modelos nuXmv como herramienta para verificar la satisfacibilidad de las fórmulas ALC_{LTL} , en las rutas de computación consideradas. La OTPAE del PAI servirá para obtener patrones de análisis compuestos, mediante la combinación de dos o más ontologías temporales.

Keywords: Patrones de Análisis, Ontologías, Ontologías Temporales, Lógica Descriptiva, Lógica Temporal.

1. INTRODUCCIÓN

Los patrones de análisis son una técnica de reutilización utilizada en la comunidad de ingeniería de software, debido a que agilizan el proceso de análisis y mejoran la calidad en el desarrollo de sistemas de software, pues incluyen las mejores representaciones consensuadas de sus dominios. Además, ayudan a reducir tiempos, costos y esfuerzo, ya que representan correctamente el dominio del problema.

La representación de patrones de análisis mediante ontologías, ha permitido describir formalmente las entidades del dominio y sus propiedades, relaciones, restricciones y comportamiento. Y con ello representar, intercambiar y compartir el conocimiento utilizando un vocabulario común, ya sea entre personas o entre agentes de software (Barchini & Álvarez, 2010).

Para construir ontologías de patrones de análisis, en nuestro grupo de investigación se definió la metodología para construcción de ontologías de patrones de análisis (MECOPA) (Juárez, 2016). Sin embargo, con esta metodología solamente es posible formalizar el comportamiento estático de los patrones de análisis, el comportamiento dinámico no se toma en cuenta.

Para incluir el comportamiento dinámico en las ontologías de patrones de análisis, en nuestro grupo de investigación se definió la metodología para la construcción de ontologías temporales de patrones de análisis (MECOTPA) (Piedrola, 2019). Que es una actualización de la metodología MECOPA, para facilitar a los ingenieros de software la inclusión de comportamiento dinámico en las ontologías de patrones de análisis mediante aspectos de temporalidad.

Con MECOTPA es posible construir Ontologías Temporales de Patrones de Análisis Estables (OTPAEs) (González et al., 2015) consistentes con comportamientos satisfacibles que facilitan también el uso automatizado de aspectos estructurales como de comportamiento dinámico de los patrones de análisis. En MECOTPA, se utiliza la lógica de descripción temporal ALC_{LTL} , que es una combinación de la lógica descriptiva ALC (Lenguaje de Atributos con Complementos, por el inglés *Attribute Language with Complements*) y la lógica temporal lineal LTL (Lógica Temporal Lineal, por el inglés *Lineal Temporal Logic*) para representar formalmente el comportamiento estático y dinámico del patrón de análisis. Con la formalización complementaria de patrones de análisis con aspectos de temporalidad es posible razonar e inferir

información basada tanto en aspectos estructurales como de comportamiento.

Hoy en día es común que se requiera la combinación de dos o más patrones de análisis para representar la problemática de una empresa o de un problema más grande (Jiang & Fernandez, 2009). Para ello, es necesario contar con la mayor cantidad de OTPAEs posibles debido a que, mientras más OTPAEs existan, la cantidad de problemas a representar será mayor. Sin embargo, actualmente, solamente existen dos ontologías temporales (OTPAEs) documentadas de patrones de análisis creadas con la metodología MECOTPA: La Ontología Temporal del Patrón de Análisis de Entidades Reutilizables (OTPAE del PAER) y la Ontología Temporal del Patrón de Análisis de Cuentas (OTPAE del PAC). Ante esta situación, es necesario incrementar el número de OTPAEs con la finalidad de aumentar el reúso y disminuir las dificultades para adoptar los patrones de análisis en dominios diferentes.

Actualmente, los autores, desarrollan la investigación que define un método para combinar patrones de análisis considerando su estructura y su dinámica, mediante ontologías temporales. Para este fin es necesario construir la descripción del patrón de análisis para inventarios (PAI), mediante una ontología temporal, que represente su comportamiento. Para su combinación con alguno de los dos patrones de análisis que se tienen descritos de esta manera, hasta ahora, en nuestro grupo de investigación.

El PAI es un modelo genérico a partir de la abstracción de un inventario real y puede extenderse para complementar requerimientos detallados, mantiene un seguimiento de las cantidades y ubicaciones de artículos en un inventario, e incluye su actualización, de acuerdo a las diferentes etapas de manufactura o producción. Fue descrito por primera vez en (Fernandez, 1999) y en (Piedrola, 2019) se utilizó para identificar el tipo de razonamiento temporal descrito en el comportamiento. Sin embargo, solo se quedó en la identificación del tipo de razonamiento temporal.

En este artículo se presentan: la creación de la Ontología Temporal (OTPAE) del PAI, mediante la metodología de creación de ontologías temporales de patrones de análisis (MECOTPA); la verificación de la consistencia semántica temporal; y la verificación de la satisfacibilidad de las fórmulas ALC_{LTL} , que lo representan.

Este documento se estructura de la siguiente manera: en la sección 2, se presenta la creación de la OTPAE del PAI a través de la metodología MECOTPA. Posteriormente, en la sección 3 se presentan las conclusiones con base en el trabajo realizado. Finalmente, en la sección 4 se hace mención de las instituciones que dieron soporte a este trabajo.

2. CREACIÓN DE LA OTPAE DEL PAI

En esta sección, se describe el proceso realizado para la creación de la OTPAE del PAI a través de la metodología MECOTPA.

2.1 Metodología MECOTPA

La metodología MECOTPA se compone de diez fases, representadas en la Fig. 1.

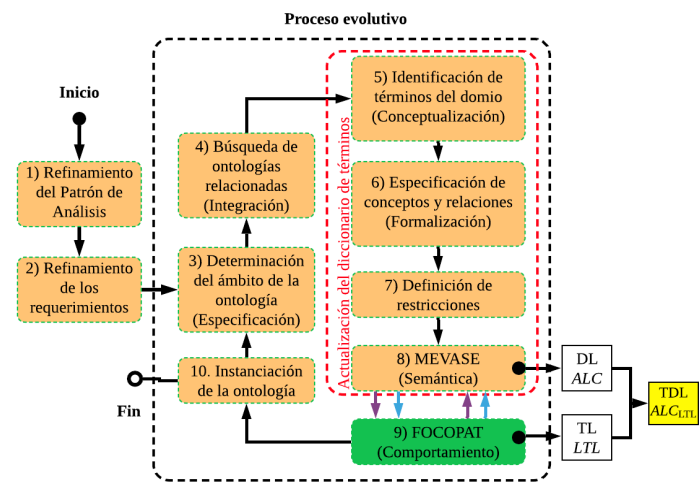


Fig. 1. Fases de la metodología MECOTPA.

A continuación, se describen los resultados obtenidos en cada fase de MECOTPA durante la construcción de la Ontología Temporal del Patrón de Análisis para Inventarios.

2.1.1 Refinamiento del Patrón de Análisis

En esta fase, se realizó una adaptación de las descripciones del PAI usando la plantilla del patrón de análisis estable (PPAE, que es la plantilla de (Raminhos et al., 2006) a la que se agregan conceptos de estabilidad (González et al., 2015)) y la ontología de la plantilla del patrón de análisis estable (OPPAE), para obtener como resultado un nuevo individuo de la ontología OPPAE. El individuo resultante de la ontología OPPAE es una descripción del patrón de análisis PAI (Fig. 2), usando el lenguaje OWL-DL. Tomando como referencia la plantilla PPAE y la ontología OPPAE, se identificó y documentó el tipo de razonamiento temporal utilizado en las especificaciones de comportamiento del patrón de análisis PAI, para ello se elaboró el documento de razonamiento temporal (DRT), un documento de apoyo para la identificación del tipo de razonamiento temporal empleado en las especificaciones de comportamiento del patrón de análisis PAI.

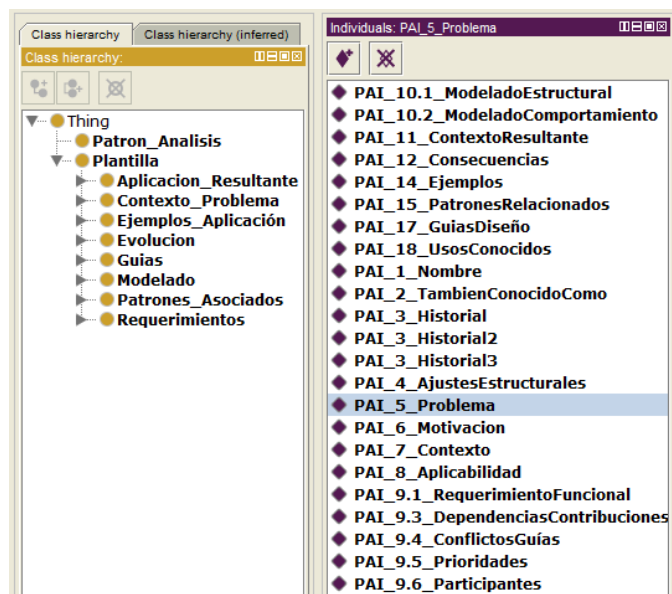


Fig. 2. OPPAE del patrón de análisis PAI en el editor de ontologías Protegé.

2.1.2 Refinamiento de los requerimientos

El patrón de análisis PAI cuenta con tres requerimientos funcionales (RFs): 1. Separar diferentes tipos de existencias, 2.

Realizar el seguimiento de cantidades de artículos en existencias y 3. Realizar el seguimiento de las ubicaciones de los artículos. En esta fase, se realizó el refinamiento de los requerimientos mediante el uso de los lenguajes de la Notación de Requerimientos de Usuario (URN, *User Requirement Notation*) como son el Lenguaje de Requerimientos Orientado a Metas (GRL, *Goal-Oriented Requirement Language*) y Mapas de Casos de Uso (UCM, *Use Case Maps*). En la Fig. 3 y en la Fig. 4, se presenta el diagrama GRL y UCM, respectivamente, del RF Realizar el seguimiento de las cantidades de artículos en existencias.

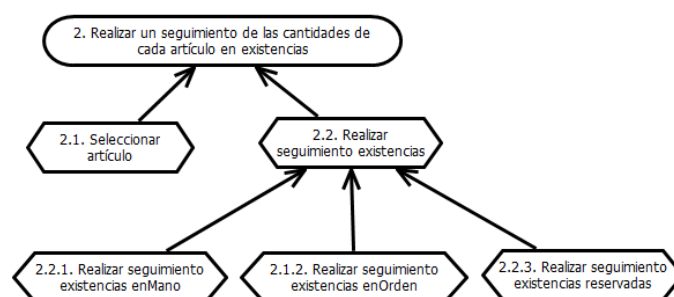


Fig. 3. Diagrama GRL del RF Realizar el seguimiento de las cantidades de artículos en existencias.

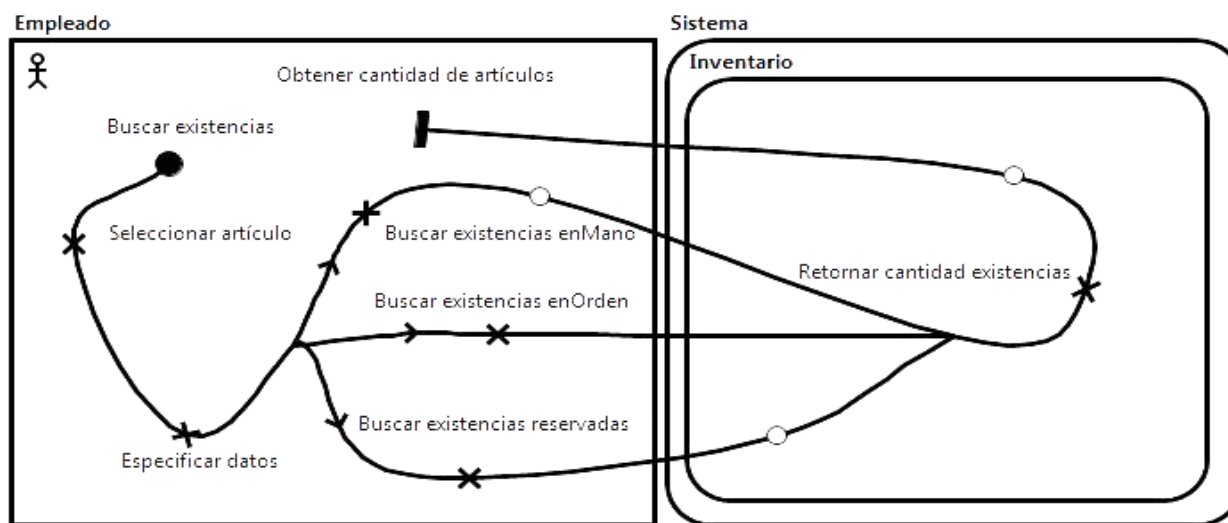


Fig. 4. Diagrama UCM del RF Realizar el seguimiento de las cantidades de artículos en existencias.

Los diagramas GRL y UCM de los RFs se utilizaron para complementar el documento DRT del patrón de análisis PAI generado en la fase anterior. En el documento DRT, se incluyó una tabla que hace referencia a los diagramas GRL y UCM (Fig. 3 y Fig. 4), en los que se representan especificaciones de comportamiento y una clarificación (texto con descripción en lenguaje natural) de las mismas. A partir de estos diagramas y sus clarificaciones, se identificó el tipo de razonamiento temporal utilizado y las proposiciones atómicas necesarias para generar especificaciones clarificadas.

2.1.3 Determinación del ámbito de la ontología (Especificación)

En esta fase se definieron los usuarios, el dominio, el propósito y el tipo de ontología, así como el cuestionario de competencias:

Usuarios: Los usuarios finales previstos para la OPAI son los responsables de análisis en el dominio de la administración de inventarios, los desarrolladores de aplicaciones para patrones de análisis, los investigadores y expertos en el dominio, para la retroalimentación y mejora continua.

Dominio: La OPAI se desarrolló en el dominio de Administración de Inventarios. En una compañía o institución, los artículos pueden ser materiales usados para fabricación o productos terminados. Existe la posibilidad de pérdida o destrucción de existencias. La institución debe ser capaz de realizar un seguimiento del número actual de artículos en existencia.

Propósito: El propósito fundamental de la OPAI es representar, organizar, formalizar y estandarizar el conocimiento relacionado con el dominio del patrón de análisis para la administración de inventarios.

Tipo de ontología: La OPAI es una ontología de dominio.

Cuestionario de competencias (CC). Por motivos de espacio, se omite la lista de preguntas del cuestionario de competencias para el PAI.

2.1.4 Búsqueda de ontologías relacionadas (Integración)

Un conjunto representativo de ontologías de tiempo, enfocadas en los criterios de representación temporal (p. ej., puntos de tiempo, tiempo absoluto y tiempo relativo), se presentan a continuación (Fernández & Gómez, 2004): Upper Cyc, Ontología de tiempo no restringida, Ontología de tiempo simple, Ontología de tiempo Kestrel, Ontología de combinación superior sugerida (SUMO, *Suggested Upper Merged Ontology*), Ontología de tiempo OWL-Time (formalmente DAML-Time).

2.1.5 Identificación de términos del dominio (Conceptualización)

Con ayuda de los diagramas GRL y UCM, documento DRT y el cuestionario CC, se identificaron los conceptos (clases) y roles (propiedades) de la ontología. Para esto, se escribió una lista de términos que se usarán para redactar oraciones en el dominio del patrón de análisis PAI considerando los términos que podrán sufrir alguna variación en el tiempo con base en el comportamiento dinámico que se describe. Cada concepto está asociado a un conjunto de atributos que lo caracterizan (Tabla 1), algunos de estos atributos corresponden a conceptos en el modelo de estabilidad de SSM (comportamiento, especificidad, nivel de estabilidad y percepción) (González et al., 2015).

Tabla 1. Propiedades de los conceptos del PAI.

Concepto	Roles concretos (atributos)
Persona	tieneId, tieneNombre, tieneEdad, tieneComportamiento, tieneEspecificidad, tieneNivelEstabilidad, tienePercepcion
Empleado	tieneId, tieneNombre, tieneEdad, tieneComportamiento, tieneEspecificidad, tieneNivelEstabilidad, tienePercepcion
Institucion	tieneId, tieneNombre, tieneGiro, tieneComportamiento, tieneEspecificidad, tieneNivelEstabilidad, tienePercepcion
Inventario	tieneId, tieneNombre, tieneComportamiento, tieneEspecificidad, tieneNivelEstabilidad, tienePercepcion
Artículo	tieneId, tieneNombre, tieneTipo, tieneCantidad, tieneUbicacion, tieneComportamiento, tieneEspecificidad, tieneNivelEstabilidad, tienePercepcion

2.1.6 Especificación de conceptos y relaciones (Formalización)

En esta fase, mediante una jerarquía, se especificaron de manera explícita los conceptos obtenidos en la fase 2.1.5. Identificación de términos del dominio (Conceptualización) así como las relaciones entre conceptos y los roles concretos estáticos de cada concepto. A continuación, en la Tabla 2 se presenta las relaciones entre conceptos por cada RF del PAI.

Tabla 2. Relaciones entre conceptos por RF del patrón de análisis PAI.

Concepto del dominio	Rol abstracto	Concepto del rango	Rol abstracto inverso
1. Separar diferentes tipos de existencias			
Empleado	separa	Artículo	esSeparadoPor
Empleado	verificaExistenciaDe	Artículo	existenciaEsVerificadaPor
Empleado	actualiza	Artículo	esActualizadoPor
Empleado	registra	Artículo	esRegistradoPor
Empleado	actualiza	Inventario	esActualizadoPor
2. Realizar el seguimiento de las cantidades de cada artículo en existencias			
Empleado	buscaExistenciasDe	Artículo	existenciasEsBuscadaPor
Empleado	verificaExistenciaDe	Artículo	existenciaEsVerificadaPor
Empleado	especificaTipoExistenciasDe	Artículo	tipoExistenciasEsEspecificad oPor
Empleado	obtieneExistenciasDe	Artículo	existenciasEsObtenidaPor
3. Realizar el seguimiento de las ubicaciones de los artículos			
Empleado	ubica	Artículo	esUbicadaPor
Empleado	verificaExistenciaDe	Artículo	existenciaEsVerificadaPor
Empleado	solicitaUbicacionDe	Artículo	ubicacionEsSolicitadaPor
Empleado	obtieneUbicacionDe	Artículo	ubicacionEsObtenidaPor

Los conceptos y roles especificados en esta fase se integraron a una ontología OWL-DL mediante el editor de ontologías Protégé, en donde los conceptos representan las clases o subclases (Fig. 5), los roles abstractos representan propiedades de objetos y los roles concretos representan las propiedades de datos. La ontología creada, representa una ontología estática del patrón de análisis estable. Es decir, una OPAE que representa solamente la estructura estática del patrón de análisis PAI.

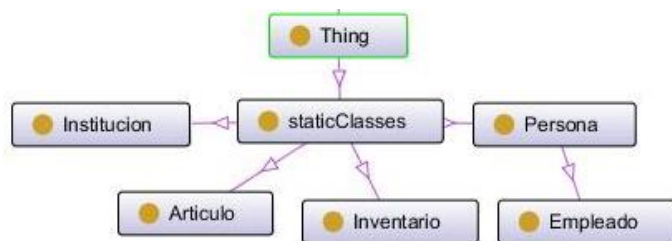


Fig. 5. Jerarquía de clases estáticas en la base de conocimiento KB del patrón de análisis PAI en Protégé.

2.1.7 Definición de restricciones

En esta fase, se definieron las restricciones de cuantificación existencial y universal en la OPAE del PAI y se agregaron a la OPAE del PAI. En el editor de ontologías Protégé, las restricciones de cuantificación existencial se definen usando la palabra “some” para especificar que un concepto se relaciona con al menos otro, y las restricciones de cuantificación universal se definen empleando la palabra “only” para indicar que un concepto se relaciona únicamente con otro.

2.1.8 MEVASE (Semántica)

En esta fase se llevó a cabo la formalización del patrón de análisis PAI de manera implícita a través de la lógica matemática, se utilizó como lenguaje formal la “Lógica descriptiva” (DL, *Description Logics*) (Juárez, 2016). Se retroalimentó la información de las fases 2.1.5. Identificación de términos del dominio (Conceptualización), 2.1.6 Especificación de conceptos y relaciones (Formalización) y 2.1.7 Definición de restricciones, para refinar los conceptos y roles estáticos que modelan el dominio del problema que describe el patrón de análisis PAI.

2.1.9 FOCOPAT (Comportamiento)

En esta fase se realizó una formalización complementaria del patrón de análisis PAI con aspectos de temporalidad. En las fases anteriores solamente se había trabajado con la parte estática. Sin embargo, en esta fase se especificó el comportamiento dinámico descrito en el patrón de análisis PAI y se incluyó como conocimiento en la ontología temporal

(OTPAE) del PAI. Para especificar el comportamiento dinámico, se integró la ontología OWL-Time (conocimiento sobre conceptos, roles abstractos y roles concretos temporales) a la ontología OPAE del PAI con ayuda del plugin Chronos (Piedrola, 2019) en el editor de ontologías Protégé para incluir aspectos de temporalidad. En la Fig. 6, se presenta la OTPAE del PAI en donde se visualizan los elementos estáticos (Dominio PAI) y los elementos temporales (originalmente de la ontología OWL-Time).

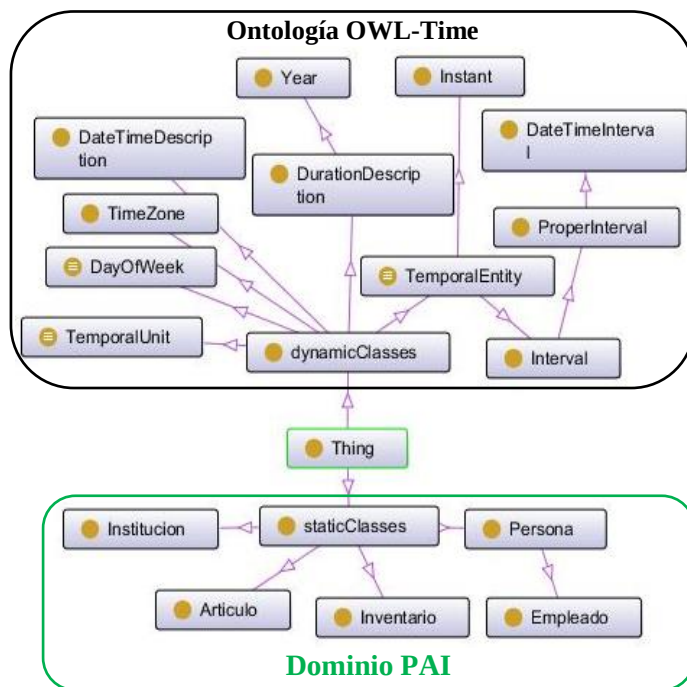


Fig. 6. Ontología OTPAE del patrón de Análisis PAI.

Se especificó el comportamiento dinámico descrito en el patrón de análisis PAI a través de fórmulas matemáticas de la TDL. Por cada requerimiento funcional del patrón de análisis PAI se propuso una fórmula de la TDL ALC_{LTL} que representa formalmente el comportamiento dinámico. A continuación, en la Tabla 3 se presentan las fórmulas ALC_{LTL} de los tres requerimientos funcionales del patrón de análisis PAI.

Tabla 3. Fórmulas ALC_{LTL} correspondientes a cada RF del patrón de análisis PAI.

RF1 Separar diferentes tipos de existencias $\mathcal{G}(\mathcal{X}(\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{separa}.\text{Articulo}) \rightarrow (\mathcal{XX}(\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{verificaExistenciaDe}.\text{Articulo}) \wedge \mathcal{F}(\neg \mathcal{XX}\mathcal{X}(\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{actualiza}.\text{Articulo} \vee (\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{registra}.\text{Articulo}))) \wedge \neg \mathcal{XX}\mathcal{X}\mathcal{X}(\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{actualiza}.\text{Inventario})))$
--

RF2 Realizar seguimiento de las cantidades de artículos en existencias $\mathcal{G}(\mathcal{X}(\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{buscaExistenciasDe.Articulo}) \rightarrow (\mathcal{XX}(\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{verificaExistenciaDe.Articulo}) \wedge \mathcal{F}(\neg \mathcal{XX}(\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{especificaTipoExistencias.Articulo}) \wedge \neg \mathcal{XX}(\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{obtieneExistenciasDe.Articulo})))$
RF3 Realizar seguimiento de las ubicaciones de los artículos $\mathcal{G}(\mathcal{X}(\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{ubica.Articulo}) \rightarrow (\mathcal{XX}(\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{verificaExistenciaDe.Articulo}) \wedge \mathcal{F}(\neg \mathcal{XX}(\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{solicitaUbicacionDe.Articulo}) \wedge \neg \mathcal{XX}(\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{obtieneUbicacionDe.Articulo})))$

Definición 1: Una fórmula LTL ϕ tiene la siguiente sintaxis:
 $\phi, \psi ::= \top \mid p \mid \neg \phi \mid \phi \wedge \psi \mid \mathcal{X} \phi \mid \phi \mathcal{U} \psi \mid \mathcal{G} \phi \mid \mathcal{F} \phi$

Donde $\top$ es el valor booleano “True” (Verdad), $p \in \text{Pas}$ (conjunto de proposiciones atómicas), $\neg$ y $\wedge$ son los operadores booleanos de negación y conjunción respectivamente, $\mathcal{X}$ (o $\bigcirc$) es el operador “next” (siguiente), $\mathcal{U}$ es el operador “until” (hasta), $\mathcal{G}$ (o $\Box$) es el operador “always” (siempre) y $\mathcal{F}$ (o $\Diamond$) es el operador “eventually” (eventualmente). Los operadores booleanos $\vee$, $\Rightarrow$, $\Leftrightarrow$ son operadores derivados de disyunción, implicación y equivalencia respectivamente, definidos por medio de abreviaciones estándar. Como ejemplo, la fórmula del

RF Realizar el seguimiento de las cantidades de artículos en existencias (Tabla 3) se leerá de la siguiente manera: “Siempre ($\mathcal{G}$) ocurre que, en un primer momento ($\mathcal{X}$) el empleado busca la cantidad de existencias de un artículo ($\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{buscaExistenciasDe.Articulo}$), lo cual implica que posteriormente ($\mathcal{XX}$) el empleado verificará la existencia del artículo ($\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{verificaExistenciaDe.Articulo}$). Eventualmente ($\mathcal{F}$), en otro momento ($\mathcal{XX}$), el empleado (**no** $\neg$) especificará el tipo de existencia a obtener del artículo ($\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{especificaTipoExistencias.Articulo}$) y después ($\mathcal{XX}$) el empleado (**no** $\neg$) obtendrá la cantidad de existencias del artículo ($\text{Empleado} \sqsubseteq \exists \text{obtieneExistenciasDe.Articulo}$)”.

Para representar el comportamiento dinámico en la OTPAE del PAI, se integraron secuencias de interpretaciones (para casos de éxito y casos de éxito y/o fracaso) con base en la experiencia y de acuerdo a cada especificación de comportamiento (fórmulas ALC_{LTL} reducidas a fórmulas LTL). En la Fig. 7 se detallan de manera gráfica los primeros cuatro axiomas de aserción correspondientes al primer caso de éxito de acuerdo al RF Realizar el seguimiento de las cantidades de artículos en existencias.

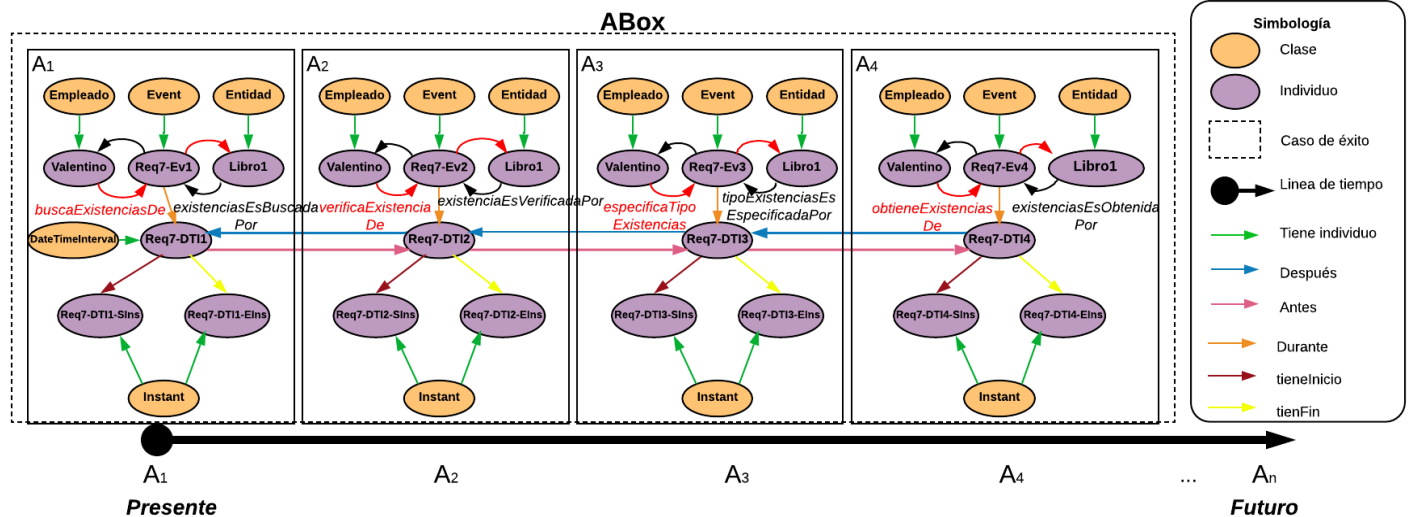


Fig. 7. Caso de éxito 1 en la ABox de casos de éxito de acuerdo al RF Realizar seguimiento de las cantidades de artículos en existencias.

Con ayuda del razonador Pellet (Piedrola, 2019), se verificó la consistencia semántica temporal (VCST) por cada secuencia de interpretaciones (SoIs, *Sequences of Interpretations*) almacenada como conocimiento en la OTPAE del PAI, mediante el editor de ontologías Protegé. En la Tabla 4, se presentan los resultados en la VCST de la OTPAE del PAI.

Tabla 4. Resultados por RF en la VCST de la OTPAE del patrón de análisis PAI.

Requerimiento	Caso de Verificación	Resultado de la Verificación
RF1	01 - Éxito	Consistente
	02 - Éxito y Fracaso	Consistente con conceptos insatisfacibles
RF2	03 - Éxito	Consistente
	04 - Éxito y Fracaso	Consistente con conceptos insatisfacibles
RF3	05 - Éxito	Consistente
	06 - Éxito y Fracaso	Consistente con conceptos insatisfacibles

Las secuencias de interpretaciones de acuerdo a los requerimientos funcionales para el caso de éxito resultaron ser consistentes, es decir, no existen inconsistencias en la KB. Sin embargo, para los casos de éxito y fracaso la KB resultaron ser consistentes pero con conceptos insatisfacibles debido a las restricciones establecidas por las reglas SWRL de aserciones negativas.

Además, con ayuda de la herramienta para la verificación automática de modelos (MC, *Model Checking*) nuXmv (Piedrola, 2019) se verificó la satisfacibilidad (VS) de cada fórmula LTL en la ruta de computación (SoIs reducidas a trayectorias de estados) considerada. En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en la VS de las fórmulas LTL de los RFs del PAI.

Tabla 5. Resultados de la VS de las fórmulas LTL de los RFs del patrón de análisis PAI.

Requerimiento	Caso de Verificación	Resultado de la Verificación
RF1	01 - Éxito	Satisfacible
	02 - Éxito y Fracaso	Satisfacible
RF2	03 - Éxito	Satisfacible
	04 - Éxito y Fracaso	Satisfacible
RF3	05 - Éxito	Satisfacible
	06 - Éxito y Fracaso	Satisfacible

Los resultados de la verificación VS demostraron que las fórmulas LTL son satisfacibles en las trayectorias de estados consideradas al no generar contraejemplos.

3. CONCLUSIONES

La metodología MECOTPA es relativamente nueva, y es por ello que la cantidad de patrones de análisis representados mediante ontologías temporales es muy pequeña. Sin embargo, con la creación de la OTPAE del PAI, se pretende incrementar el catálogo de OTPAEs con la finalidad de aumentar el reúso y disminuir las dificultades para adoptar los patrones de análisis en dominios diferentes.

La ontología temporal del PAI es una ontología que se encuentra en el dominio de la Administración de Inventarios. Sin embargo, si se quisiera ampliar el dominio, es decir, si en lugar de abarcar solo el dominio de Inventarios también se quisiera abarcar el dominio de Cuentas, entonces, se podría combinar la OTPAE del PAI con la OTPAE del PAC. Esta combinación, es uno de los beneficios más importantes de crear OTPAEs, debido a que mientras más OTPAEs se tengan, la cantidad de dominios a representar (combinar) será mayor y por ende, la posibilidad de reúso aumentará.

La ontología temporal del PAI, almacena SoIs basadas en las especificaciones de comportamiento de tres requerimientos funcionales. Se podrían describir más requerimientos funcionales. Sin embargo, mientras más requerimientos funcionales se describan, la posibilidad de reúso disminuirá, debido a que se podrán aplicar a menos entornos. Por lo tanto, mientras más general se encuentre la descripción de los patrones de análisis, la posibilidad de reúso será mayor.

4. RECONOCIMIENTOS

Esta investigación tuvo soporte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), México, y del Tecnológico Nacional de México TecNM.

REFERENCIAS

- Barchini, G. E., & Álvarez, M. M. (2010). Dimensiones e indicadores de la calidad de una ontología Dimensions and indicators of the ontology quality. *Revista Avances En Sistemas e Informática*, 7(1).
- Fernandez, E. B. (1999). Stock Manager: An Analysis Pattern for Inventories. *Dept. of Computer Science and Engineering, Florida Atlantic University, Boca Raton, FL 33431*.
- González, Moisés, C., Martínez, R. C. C., Villamil, J. M. C., & López, Ramiro Mar, C. (2015). Stable Template for Stable Analysis Patterns. *IEEE Latin America Transactions*, 13(7), 2430–2440.
- Jiang, Z., & Fernandez, E. (2009). Composing analysis patterns to build complex models: Flight reservation. *Pattern Languages of Program*, 1–27. <https://doi.org/10.1145/1943226.1943240>
- Juárez Hernández, J. D. C. (2016). *Metodología de Validación de Consistencia de Patrones de Análisis*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).
- Piedrola Domínguez N. (2019). *Formalización Complementaria de Patrones de Análisis con Aspectos de Temporalidad*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).
- Raminhos, R., Pantoquillo, M., Araújo, J., & Moreira, A. (2006). A Systematic Analysis Patterns Specification. *{ICEIS} 2006 - Proceedings of the Eighth International Conference on Enterprise Information Systems: Databases and Information Systems Integration, Paphos, Cyprus, May 23-27, 2006*, 453–456.

Control de iluminación por sistema difuso y prototipo persiana automatizada implementado en microcontrolador Atmega328P.

Borboya, M., Hernández, R., Lira, T., Gudiño, F.

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán/ FESC

Cuautitlán Izcalli, Edo. México, México

e-mail:{bm.mike07, roberto.her3130, ITSE.LIRA}@gmail.com, ilciarmin@comunidad.unam.mx

Resumen: El presente trabajo presenta un prototipo de persiana inteligente basado en controlador difuso Mamdani, el cual toma como referencia el nivel de iluminación actual y la posición de la persiana, como entradas del sistema y como salida entrega la posición de la persiana. La idea surge de la creciente necesidad de reducir los costos elevados en el consumo de energía eléctrica que en un hogar representa más del 60 % del consume total de energía. Se utiliza Lógica Difusa, por ser una herramienta cuya robustez y eficiencia ha sido comprobado en sistemas lineales.

Palabras Clave: Controlador Difuso, Domótica, ahorro energía, automatización

1. INTRODUCCION

En los últimos años la tecnología ha crecido a pasos agigantados debido a esto se ha buscado apoyarse de esta tecnología para desarrollar aparatos de uso cotidiano que puedan realizar la tarea para la que fueron diseñados de manera autónoma. Un área que nació a partir de este crecimiento fue la Domótica, en esta área de desarrollan aparatos de funcionamiento autónomo para realizar alguna actividad del hogar. Conforme avanza el tiempo se desarrollan nuevos dispositivos por lo que encontrar algo que no se haya desarrollado.

Uno de los objetivos de la Domótica es el aprovechamiento óptimo de los recursos, tal es el caso de energía eléctrica, calefacción, agua, etcétera. De ellos el consumo de energía en iluminación es el que mas recursos económicos representa(Cruz,2015), por lo cual es necesario diseñar sistemas que permitan la reducción de este gasto en los hogares. El dispositivo que se propone es un sistema para el control de luminosidad haciendo uso de lógica difusa. Estos controladores buscan simular una parte del funcionamiento del cerebro en la toma de decisiones. Este tipo de sistemas es recomendable usarlos cuando lo que se busca es obtener una salida muy exacta a partir de la entrada y en el estado anterior a partir de niveles de pertenencia que son establecidos seccionando los valores de entrada y salida.

Para aprovechar la luz natural y tener un ahorro de energía se desarrolló una persiana que funciona con sensores de luz que se active al sobrepasar ciertos niveles de luminosidad.

A diferencia de un controlador tipo **PID**, el control difuso ha resultado ser mas robusto, más eficiente y menos sensible a los cambios drásticos en el Sistema. Por otra parte la lógica difusa permite la modelación de la experiencia de los expertos, en forma de reglas o expresiones matemáticas que son fáciles de visualizar, ingresar al sistema o modificar, aspectos que el razonamiento en cadena de un sistema experto tradicional no agrega(Medsker,1995). Así mismo el sistema difuso maneja las ambigüedades del entorno de una manera mas flexible comparada con otras técnicas que limitan sus opciones a un numero determinado de posibilidades, tal es el caso de un espacio de estados (Friedland, 2012).

2. ANTECEDENTES

2.1 Lógica difusa

Dentro del mundo digital se sabe que la lógica binaria es la base de su funcionamiento, dentro de esta lógica solo se pueden obtener dos resultados verdadero o falso. Lo que busca la lógica difusa es encontrar un punto exacto entre un mínimo y un máximo a partir de conjuntos de valores establecidos.

Los conjuntos difusos fueron propuestos inicialmente por Lofti A. Zadeh(1965). Este artículo establece los fundamentos de la lógica difusa que se deduce de la definición de conjunto difuso y sus propiedades. Esta definición es: (Caparrini, 2017).

Sea X un conjunto clásico. Un conjunto difuso, A , en X viene caracterizado por la función de pertenencia $F_A(x)$ que asocia a cada punto $x \in X$ un número real del intervalo $[0,1]$, donde los valores de $F_A(x)$ representan el "grado de pertenencia" de x en A .

De forma que, cuanto más cerca esté el valor de $A(x)$ a 1, mayor es el grado de pertenencia de x a A .

Podemos establecer que el razonamiento humano es, inherentemente, difuso, dado que el mundo está cambiando continuamente y no siempre se puede definir en términos de sentencias verdaderas o falsas.

2.2 Luminotecnia

Las magnitudes luminotécnicas informan sobre las características de las lámparas y permiten el cálculo de las instalaciones de alumbrado. Algunas magnitudes son las siguientes: (Peter-Bastian, 1996)

Flujo luminoso: Potencia luminosa total emitida por la fuente luminosa en todas direcciones.

Rendimiento luminoso: Es la relación costo beneficio entre el flujo luminoso obtenido a y potencia consumida por la fuente de luz.

Intensidad de iluminación: La intensidad de iluminación expresa la luz que incide sobre una superficie y su unidad es el lux.

Luminosidad: Flujo luminoso radiado en determinada dirección. Su unidad es la candela (cd).

Densidad luminosa: Relación que hay entre luminosidad y el tamaño de la superficie luminosa o iluminada.

En México los niveles de iluminación adecuados para los distintos espacios de trabajo están regidas por la norma NOM 025-STPS-2008 de la secretaria del Trabajo (Iluminet, 2018). En esta norma se establecen los niveles adecuados dependiendo la tarea que se realice en los espacios cerrados por ejemplo, para un estacionamiento los niveles mínimos requeridos son de 20 luxes mientras que para procesos de ensamble de piezas complejas se necesitan un mínimo de 1000 lx para estar dentro de la norma. (Iluminet, 2018).

Por practicidad y economía utilizamos un módulo de 5 LEDs con un ángulo de apertura de 140° , un flujo luminoso de 60-70 lm y un consumo de $1.0/84.0 \text{ W/mA}^2$.

2.3 Microcontrolador ATMEGA328P

Los microcontroladores de la marca Atmel, ahora pertenecientes a Microchip, contiene procesadores con arquitectura RISC (del inglés reduced instruction set computer), es decir tiene un conjunto de instrucciones simples y reducidas que toman menor tiempo para ejecutarse que las instrucciones de un microprocesador de arquitectura CISC. De esta manera el procesador es capaz de ejecutar una instrucción en cada ciclo de reloj. Este tipo de microcontroladores fueron diseñados para

poder ser programados con lenguajes de programación de bajo nivel (ensamblador) y lenguaje de alto nivel (C)(Ferrerira, 2006).

El Atmega328P es un microcontrolador CMOS de bajo consumo de 8 bits, por ser de arquitectura RISC es capaz de ejecutar una instrucción por cada ciclo de reloj, por default trabaja con una señal de reloj interna de 1 MHz, esto quiere decir que ejecuta una instrucción en 1 microsegundo. Si se requiere mayor velocidad es posible aumentar la señal de reloj hasta 16 MHz, solamente que esta señal tiene que ser externa y el microcontrolador está diseñado para poder trabajar a esa velocidad.

2.4 Protocolo de comunicación

Para la interconexión de los elementos del Sistema propuesto se utiliza dos protocolos de comunicación.

SPI (Serial Peripheral interface). Este protocolo de comunicación consiste fundamental en un sistema de comunicación serie síncrono de alta velocidad, el cual puede ser utilizado simplemente como un Puerto bidireccional facilitando la comunicación entre diferentes dispositivos electrónicos.

Protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit). El bus I2C es uno de los más buses de comunicación más útiles y versátiles inventados hasta el momento, debido a su poca complejidad a nivel circuital y su eficiencia en el proceso de comunicación con otros dispositivos que comparten la misma estructura de comunicación, favoreciendo así la creación de redes de sensores y dispositivos de control.

3. CONTROL DIFUSO DE ILUMINACION

3.1 Antecedentes del controlador

El modelo difuso para el control de iluminación de Fig. 1. necesita que se tenga un modelo para el posicionamiento de la persiana inteligente y otro modelo para la trayectoria que se recorrerá. Se desarrollará a continuación un modelo matemático, tanto para la posición como para la trayectoria a seguir; los cuales serán utilizados posteriormente en el control difuso.

Para manipular el control de movimiento de la persiana se utilizó un motor de CD. La mejor manera de controlar la velocidad del motor es haciendo uso del convertidos Digital-Analógico con el que cuenta el microcontrolador. Dicho convertidor es de 8 bits así que el número de niveles es de 256, por lo tanto podremos variar la velocidad de 0 a 255.

Haciendo pruebas se llega a la conclusión que era necesario encender el motor durante 600 ms a una potencia de 80 para bajar la persiana a nivel de suelo y se necesita encender el

motor durante 1.2 segundos con una potencia de 100 para subirla. De esta manera es como hacemos subir y bajar la persiana.

Para hacer que funcione de manera autónoma fue necesario conectar una fotorresistencia LDR que funciona como comparador analógico y se dispara al cruzar cierto nivel de luminosidad, en este caso con ayuda de un potenciómetro fije el comparador para que se active al cruzar el valor de 50 lx que es el nivel al cual inicia a oscurecer.

La fotorresistencia activara una interrupción de tipo “Change” que realiza una función que se desea al detectar un cambio de estado (Alto, bajo), esta interrupción nos sirve perfectamente ya que utilizamos el estado del comparador para saber en que posición se encuentra la persiana.

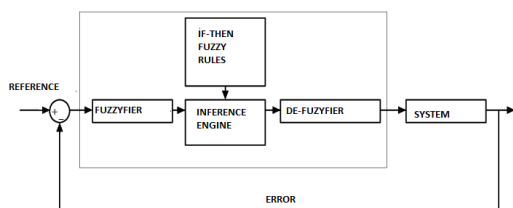


Fig 1 Arquitectura de un Controlador Difuso Realimentado

3.2 Diseño del control

En el presente proyecto los controladores difusos están caracterizados por dos entradas y una salida., en este caso se decidió tomar como entradas el error que tomamos como relación entre el nivel de luminosidad deseados (750 lx) y la obtenida por el sensor, es decir cuando tengamos un valor nulo en el sensor obtendremos nuestro error máximo que será 750, y el error menor estaría por encima de los 9000, sin embargo solo tomaremos como valor máximo 2000. Y por otro lado tomamos como entrada la potencia suministrada al modulo LED, para conocer el estado anterior del sistema. En las tablas 1 y 2 se ven las particiones difusas empleadas.

Tabla 1. Parámetros de los conjuntos difusos para la variable de entrada Error

Conjunto	Tipo	Rango
Negativo Grande	Trapezoidal	(-2000, -2000, -230, -190)
Negativo Bajo	Trapezoidal	(-200, -150, -50, -5)
Zero	Trapezoidal	(-10, 0, 10)
Positivo Bajo	Trapezoidal	(5, 50, 150, 200)
Positivo Grande	Trapezoidal	(190, 230, 2000, 2000)

Tabla 2. Parámetros de los conjuntos difusos para la variable de entrada Error

Conjunto	Tipo	Rango
Baja	Trapezoidal	(0, 10, 15, 25)
Media	Trapezoidal	(20, 40, 60, 90)
Alta	Trapezoidal	(80, 100, 255, 260)

De la misma manera creamos el conjunto de valores a la salida a la cual llamamos potencias, como podemos ver el valor máximo que podemos obtener es 255.

Tabla 3. Parámetros de los conjuntos difusos para la variable de salida potencia_s

Conjunto	Tipo	Rango
Ultra Baja	Trapezoidal	(-5,0, 5, 10)
Muy Baja	Trapezoidal	(5, 10, 30, 40)
Baja	Trapezoidal	(30, 50, 100, 140)
Media	Triangular	(98, 122, 150)
Alta	Trapezoidal	(131, 149, 173, 195)
Muy Alta	Trapezoidal	(183, 206, 233, 245)
Ultra Alta	Trapezoidal	(213, 235, 255, 255)

La base de reglas utilizada en el mecanismo de inferencia de cada controlador cuenta con 15 reglas respectivamente con siete estados de salida posibles. Un ejemplo es:

Si error es Zero y potencia es baja **entonces** potencia_s es Ultra Baja

La superficie de implicación difusa se muestra en Fig 2. En ella se observa que aunque podría considerarse que con tan solo un control incremental se puede lograr un buen desempeño, las variaciones sutiles cerca de la posición zero afectan de manera considerable la posición de la persiana.

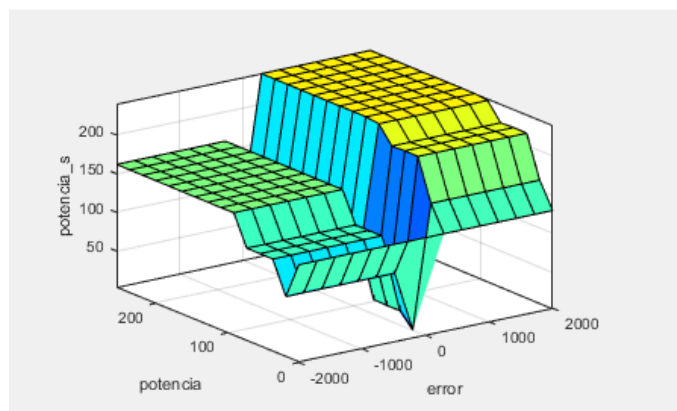


Fig 2 Inferencia Difusa para el control de iluminación

Las salidas obtenidas, de los controladores implementados, se agregan entre sí para obtener una única señal de control que

permite optimizar el funcionamiento del sistema total. El mecanismo de de-borrosificación es el de centroides(Zhang,2010) .

3. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

En la Fig. 3 se observa la simulación del modelo. Se observa la activación de las reglas y el valor de salida del controlador, la cual representa el nivel de potencia de salida de la luminaria.

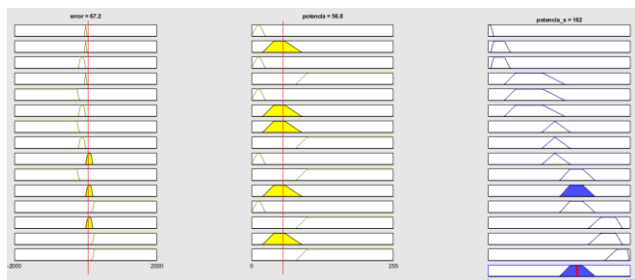


Fig 3. Simulación del Sistema de persiana con Control Difuso

Finalmente se observa en Fig 4 se observa el esquema general del Sistema implementado , mientras que Fig 5. Se puede observar el prototipo desarrollado.

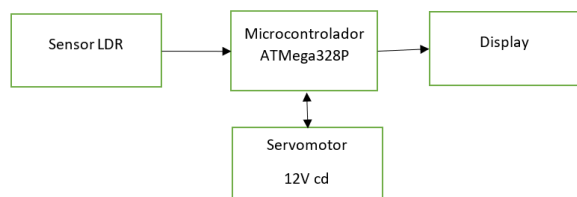


Fig 4 Arquitectura de un Sistema de persiana controlada por inferencia difusa



1

2

Fig 5 Implementación de prototipo de persiana. En 1 el modelo complete, en 2, el display que indica el nivel y la posición y el error entre el nivel óptimo y el real

Para comparar el modelo se establece un controlador PID auto ajustado por la técnica de Ziegler Nichols(1942) la cual es utilizada recurrentemente en sistemas de auto ajuste. La diferencia entre el error en estado estable de los dos modelos se observa en Fig 6.

Podemos observar que el Sistema difuso implementado tiene un error en estado estable menor que el que tiene el Sistema de control PID, así mismo se ve que el máximo sobre impulso es menor y que el tiempo de establecimiento del Sistema es menor, mientras que el controlador PID tarda casi 8 segundos en alcanzar el objetivo, el controlador difuso tarda aproximadamente 6.7 segundos en lograr llegar al punto óptimo.

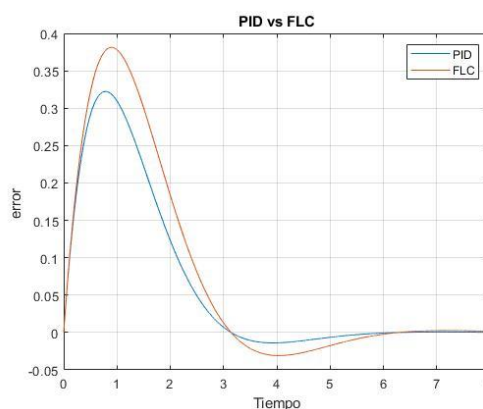


Fig 6. Comparativo de controlador PID Z-N y Controlador Difuso propuesto

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema de control difuso presenta ventajas en cuanto al tiempo de respuesta y el error en estado estable del sistema, existe una precisión aceptable y se logra la reducción del uso de la iluminación artificial dentro de un recinto , sin embargo de las pruebas realizadas se comprobó que en los medios en los cuales existe una variación recurrente de los niveles de iluminación en sistema puede llegar a ser exigido constantemente, lo que provoca que dichos cambios afecten de manera considerable a los actuadores del sistema. Esto se puede reducir añadiendo un lazo de histéresis al sistema que evite dichas variaciones o mediante la sintonización de un controlador PID difuso.

Los microprocesadores de características reducidas como la familia AVR de Atmel han sido utilizados para diversos proyectos tanto estudiantiles como de desarrollo de prototipos de bajo consumo energético y de procesamiento,. Se

consideran sistemas de bajo nivel y se desprecia su utilización en sistemas complejos, en los cuales se prefiere utilizar otras alternativas como FPGA, PLC-microcontrolador, o sistemas mas complejos, sin embargo, se pueden utilizar estas tecnologías con la adecuación correcta de las técnicas, sin sacrificar desempeño y funcionalidad.

REFERENCIAS

- Caparrini, F. S. (2017). Introducción a la Lógica Difusa. Retrieved Diciembre 6, 2018, from Fernando Sancho Caparrini: <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=97>
- Cruz, G. (2015). El consumo de energía eléctrica en los hogares de México por nivel de ingresos, 2012. *Tiempo Económico* Núm. 31, vol. X Tercer cuatrimestre de 2015
- Ferreira, J. (2008). *Microcontroladores Motorola*. Alfaomega.
- Friedland, B. (2012). *Control system design: an introduction to state-space methods*. Courier Corporation.
- Iluminet. (2018). Norma Mexicana para la correcta iluminación de los sitios de trabajo. Retrieved Diciembre 6, 2018, from Iluminet. Revista de iluminación en on line: <https://www.iluminet.com/nom-025-iluminacion-trabajo/>
- Medsker L.R. (1995) *Fuzzy Logic and Expert Systems*. In: *Hybrid Intelligent Systems*. Springer, Boston, MA
- Peter-Bastian, W. E. (1996). *Electrotecnia*. Madrid: Akal.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*. 8 (3): 338–353.
- Zhang,P.(2010). *Advanced Industrial Control Technology*. William Andrew Publishing ,2010.
- Ziegler, J.G and Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*. 64: 759–768.

Improving the Dynamic Behaviour of a Multi-terminal DC System through Droop Control Gain Optimization

Miguel Ramírez *. Rafael Castellanos**

*Transmission and Distribution Department, National Institute for Electricity and Clean Energy,
Cuernavaca, Morelos, Mexico (e-mail: *miguel.ramirez@ineel.mx; **rcb@ineel.mx).*

Abstract: An approach for the optimization of voltage droop control gains (VDCGs) to enhance the dynamic response of a multi-terminal DC (MTDC) system is investigated in this paper. In this regard, an iterative tuning process, based on the Bat Optimization Algorithm, is used to determine the VDCGs by minimizing a defined cost function in a constrained optimization formulation. Non-linear time-domain simulations and resultant MTDC system response to the loss of converters are used for this purpose. Simulation studies show the proposed approach can improve DC voltage dynamics and steady-state deviations.

Keywords: Multi-terminal HVDC, droop control, voltage source converter, system dynamics, bat optimization algorithm.

1. INTRODUCTION

VSC-HVDC is a key technology to provide the flexibility and reliability for power delivery required in modern, large interconnected grids (Hertem *et al.*, 2016). Typically, in a two-terminal HVDC system, one converter controls the active power through the link, and the other one regulates the DC voltage. For Multi-terminal DC (MTDC) networks, since power balance in HVDC transmission systems affects DC voltage, then at least one converter should regulate DC voltage and the rest of them could be operated in constant active power control. However, the converter regulating DC voltage will always try to compensate for any DC power imbalance to keep the terminal voltage to the reference value. Under this situation, the converter rated power could be exceeded on one side or converter power flow could be reversed on the other side, leading to an important impact on the interconnected AC system. Therefore, voltage regulation in MTDC systems should be shared among several converters (Chaudhuri *et al.*, 2014).

Basically, two DC voltage control strategies are proposed in the literature for autonomous power sharing in MTDC networks: voltage margin control (VMC) and voltage droop control (VDC). In VMC, successive converters can assume voltage control one after another according to marginally offset voltage references (voltage margins). However, DC voltage control of the whole MTDC system depends on only one converter at a time. Moreover, voltage margin settings are critical for an appropriate power sharing, but their selection becomes increasingly complex with the number of converters (Dierckxsens *et al.*, 2012). On the other side, the VDC method allows a distributed DC voltage control by assigning a droop characteristic between DC voltage and active power to each converter. In this way, all of them can participate in any power

imbalance. However, despite VDC gains can be set according to converter ratings, their proper selection may not always be straightforward when considering system dynamics under special operating conditions and disturbances (Thams *et al.*, 2017). For example, converter outage is considered as one of the most severe events that may affect the stability of the system and lead to voltage excursions that exceed acceptable limits. In this regard, the potential implications of different VDC strategies on the dynamic behaviour of MTDC systems have been analyzed but usually with arbitrary VDC gains (Dierckxsens *et al.*, 2012; Thams *et al.*, 2017; Gonzalez-Longatt *et al.*, 2016; Torres-Olguin *et al.*, 2014).

Based on the above, a strategy to select the VDC gains of converters and improve the MTDC system dynamics is investigated in this paper. The proposed approach is based on an iterative tuning process with the Bat Optimization Algorithm (BOA), which is a recently introduced bio-inspired technique that can achieve more accurate and efficient solutions than other modern and popular optimization alternatives (Yang, 2014). The VDC gain selection is formulated as a constrained optimization problem, where a cost function based on converters DC voltage and active power is defined. Cost function is minimized from non-linear time-domain simulations considering MTDC system response after converter outages. Performance of the proposed BOA approach is compared to no VDC and VDC with non-optimized gain approaches.

2. TEST SYSTEM

The power system used in the study is shown Fig. 1, which includes an MTDC network interconnected to two AC grids. Each AC grid consists of two areas interconnected by AC transmission lines. The MTDC network includes four voltage-source converters (VSCs) and several DC transmission lines.

For initial and steady state conditions, VSC1 is chosen as the DC slack station to control DC voltage and provide a voltage reference to the DC network, while VSC2, VSC3 and VSC4 are set to constant power control. Therefore, any active power mismatch among injected power, power extracted and losses is accommodated by VSC1. In this way, and according to the power flow solution, VSC1 and VSC3 are injecting a power of 107.5 MW and 100 MW, respectively, to the DC network, and VSC2 and VSC4 are extracting a power of 50 MW and 150 MW, respectively.

Parameters of all generators and AC lines can be obtained from (Ramírez *et al.*, 2018) for the AC grid 1, and from (Powertech, 2006a) for the AC grid 2. System generation and load conditions, as well as parameters of the DC lines and VSCs data, are provided in Appendix A.

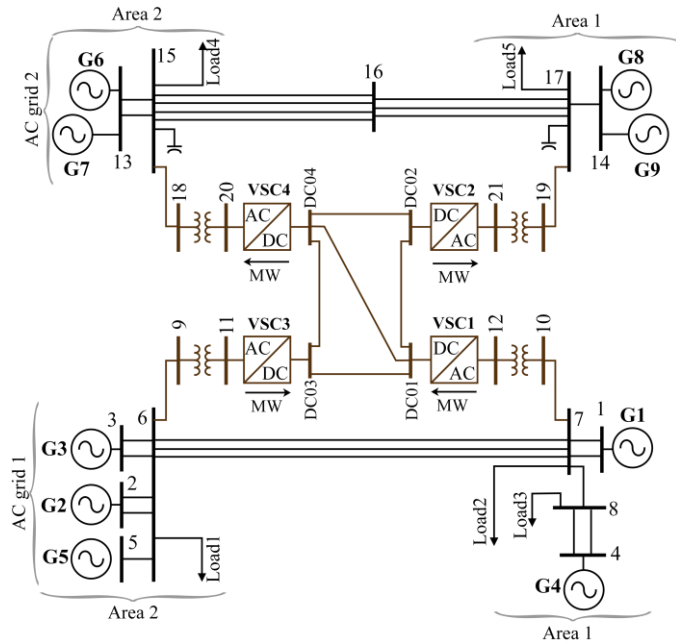


Fig. 1. Sample power system.

3. MTDC STEADY-STATE AND DYNAMIC MODELLING

The load flow representation of the system in Fig. 1 was carried out with PSAT (Powertech, 2006b). For this purpose, VSC1 was set to constant voltage control and VSC2, VSC3 and VSC4 were configured to regulate active power. On the other hand, for dynamic analysis, all the converters were modelled in TSAT (Powertech, 2006a) according to the VSC representation in Fig. 2, where V_d is the converter DC voltage, I_d is the converter DC current, V_i is the internal AC voltage, V_1 and V_2 are AC voltages, θ_i , θ_1 and θ_2 denote the angles of V_i , V_1 , and V_2 , X_L is a series inductive reactance per bridge, X_t is the transformer reactance per bridge, and P and Q are the active and reactive powers injected by the converter. In this case, P and Q are computed according to equations (1)-(5), where V_c is the commutating voltage, γ is the modulation ratio, α is the converter power angle, θ_c is the commutating angle, X_c is the

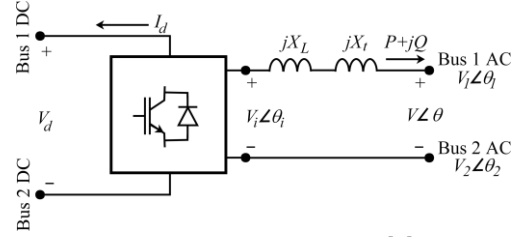


Fig. 2. VSC converter model.

$$P = -V_d \cdot I_d = \frac{V_d \cdot V_c \cdot \gamma \cdot \sin(\alpha + \theta_c)}{X_c} \quad (1)$$

$$Q = \frac{V_d \cdot V_c \cdot \gamma \cdot \cos(\alpha + \theta_c)}{X_c} - \frac{V_{base}^2 V^2}{X_c} \quad (2)$$

$$V_i = \frac{k_c \cdot V_d \cdot \gamma}{n_t a_t V_{base}}, \quad \theta_i = \theta_1 + \alpha \quad (3)$$

$$V_c = \frac{k_c \cdot V_{base} \cdot V}{n_t a_t} \quad (4)$$

$$X_c = N_b \cdot (X_L + X_t) \quad (5)$$

commutating reactance, V is the converter AC voltage, k_c is the DC to AC gain of the converter at $|\gamma|=1.0$ pu, n_t is the transformer nominal voltage ratio of DC to AC side, a_t is the transformer tap position at converter side, and N_b is the number of bridges in series on the DC side (Powertech, 2006a).

High level control at converter terminals (Zhang, 2015) is achieved according to Fig. 3 for VSC1, and in accordance with Fig. 4 for VSC2, VSC3, and VSC4.

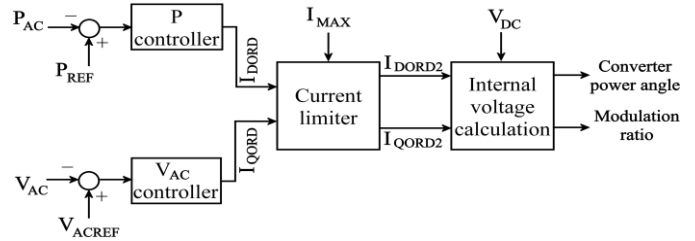


Fig. 3. DC voltage /AC voltage control.

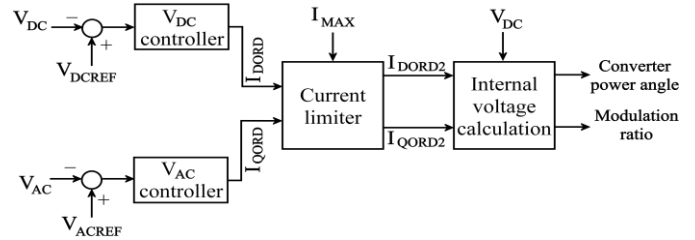


Fig. 4. Active power/AC voltage control.

For power sharing control in the DC network of Fig. 1, the control structure in Fig. 5 is included in VSC1, and the one in Fig. 6 is incorporated into VSC2, VSC3 and VSC4 for VDC, where k_{pv} and k_{vp} represent the VDC gains in each scheme.

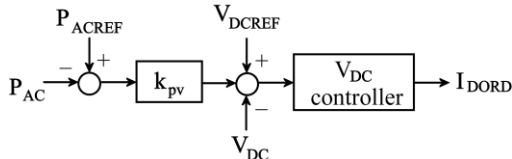


Fig. 5. DC voltage droop control structure 1.

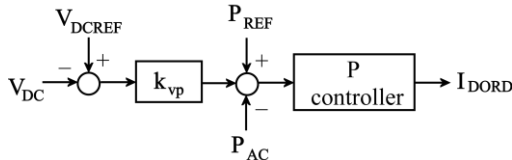


Fig. 6. DC voltage droop control structure 2.

4. OPTIMIZATION AND PROBLEM FORMULATION

4.1 Bat Optimization Algorithm (BOA) review

In the search for best and more efficient optimization algorithms, the BOA approach was recently introduced (Yang, 2014). It is a bio-inspired strategy based on the echolocation behaviour of micro-bats. Briefly, by associating each member in the bat population with a pulse frequency f_i , a velocity v_i and a location x_i , the main equations of the algorithm are:

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta_i \quad (6)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x^*)f_i \quad (7)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (8)$$

where $f_{\min}$ and $f_{\max}$ are respectively the minimum and maximum values of pulse frequency, β is a random number in the interval 0 to 1, and x^* is the best solution up to the present time. BOA automatically switches from explorative shifts to intensive and local exploitation as the search approaches global optimality by regulating loudness A and pulse rate r in the following way:

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (9)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (10)$$

with α and γ being constants. Diversity of solutions is locally increased through random walks according to:

$$x_{\text{new}} = x_{\text{old}} + \lambda A_a^t \quad (11)$$

where λ is a random number in the range $\{-1, 1\}$, x_{new} is a new locally generated solution, x_{old} is the selected solution among current best solutions, and A_a is the average loudness of all bats. Detailed information of this algorithm and its applications can be found in (Yang, 2014).

4.2 Constrained optimization problem

Considering that k_{pv} and k_{vp} in Figs. 5 and 6 will affect the dynamic behaviour of the MTDC network in Fig. 1, a constrained optimization problem for the minimization of a cost function J can be formulated according to the following to determine their values:

Minimize J subject to :

$$\begin{aligned} k_{pv}^{\min} &\leq k_{pv} \leq k_{pv}^{\max} \\ k_{vp}^{\min} &\leq k_{vp} \leq k_{vp}^{\max} \end{aligned} \quad (12)$$

where J is defined in this study by the following equations based on the total variation of signal method (Leondes, 1995):

$$J = \sum_{k=1}^{t_{\text{sim}}} \Delta \varepsilon_k \cdot t_k \quad (13)$$

$$\Delta \varepsilon_k = \sum_{n=1}^{n=4} |V_k^{\text{VSCn}} - V_{k-1}^{\text{VSCn}}| + \sum_{n=1}^{n=4} |P_k^{\text{VSCn}} - P_{k-1}^{\text{VSCn}}| \quad (14)$$

The pseudocode of the BOA process for the determination of k_{pv} and k_{vp} , as applied in this study, is given in Fig. 7.

```

Initialize algorithm parameters
Initialize population of bats ( $x_i, i=1,2,\dots,m$ )
Initialize  $v_i, f_i, r$  and  $A$  for each bat
Evaluate initial population according to  $J(x)$ 
Find the initial best solution
WHILE  $l \leq$  maximum number of iterations
    FOR  $i=1,2,\dots,m$ 
        Adjust frequency  $f_i$  to generate new solutions
        Update  $v_i$  and  $x_i$  of bats
        IF  $\text{rand} > r_i$ 
            Generate local solution around current best
        END IF
        Compute  $J(x_i)$  for the new candidate solution
        IF  $(J(x_i) \text{ new} < J(x_i) \text{ old}) \& (\text{rand} < A_i)$ 
            Accept new solution
            Update  $r_i$  and  $A_i$ 
        OTHERWISE
            Keep previous solution
        END IF
        Update  $x^*$ 
    END FOR
    Increase iteration counter,  $l=l+1$ 
END WHILE
Save results
    
```

Fig. 7. BOA pseudocode.

5. SIMULATIONS RESULTS

The BOA process was implemented in MATLAB and the dynamic response of the MTDC system to a converter outage was considered for VDC gain optimization. In this regard, the number of generations and population size were respectively set to 100 and 20, and initial population was randomly set through the search space. $f_{\min}$ and $f_{\max}$ were set to 0 and 2, respectively, initial loudness was randomly chosen in the range $\{1, 2\}$, pulse rate was initially set as 0.1, and α and γ were both settled to 0.9 (Yang, 2014). The average performance of the BOA based optimization process for the minimization of J over ten runs is shown in Fig. 8. The best final solution to the problem in (12), after ten runs, is given in Table 1.

Dynamic performance of the study MTDC system is illustrated here for the following alternatives to a converter outage:

- 1) No voltage droop control.
- 2) Voltage droop control with non-optimized gains k_{pv} and k_{vp} (based on converter rating and $\pm 5\%$ DC voltage limit).
- 3) Voltage droop control with BOA based optimized gains k_{pv} and k_{vp} .

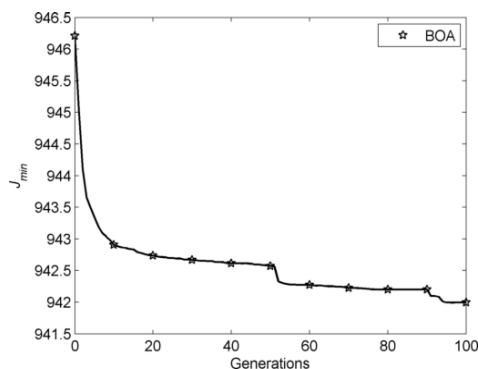


Fig. 8. Averaged J_{min} versus generations.

Table 1. Best final solution.

Algorithm	Parameter			
	k_{pv}^{VSC1}	k_{vp}^{VSC2}	k_{vp}^{VSC3}	k_{vp}^{VSC4}
BOA	3.13283	21.69351	26.02458	44.52661

Figs. 9 through 12 show the DC voltage response at VSC1 considering the outage of one converter at a time. On the other hand, Figs. 13 and 14 illustrate the behaviour of converter active power for the loss of converter VSC2.

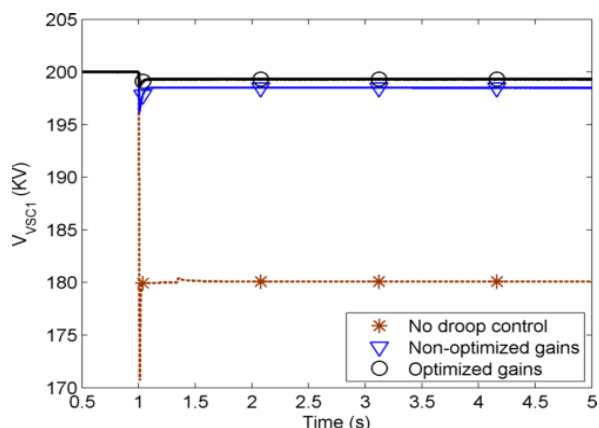


Fig. 9. Outage of VSC1: DC voltage at converter VSC1.

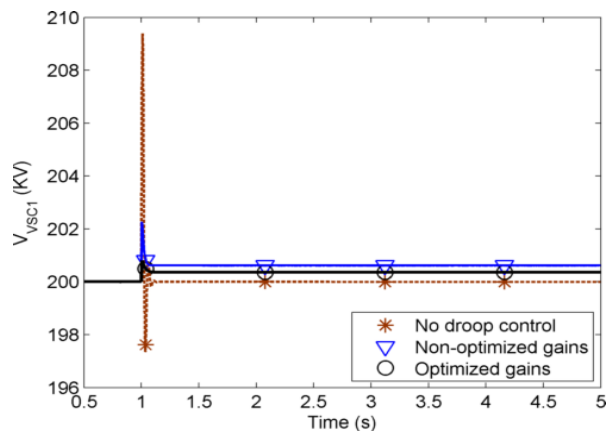


Fig. 10. Outage of VSC2: DC voltage at converter VSC1.

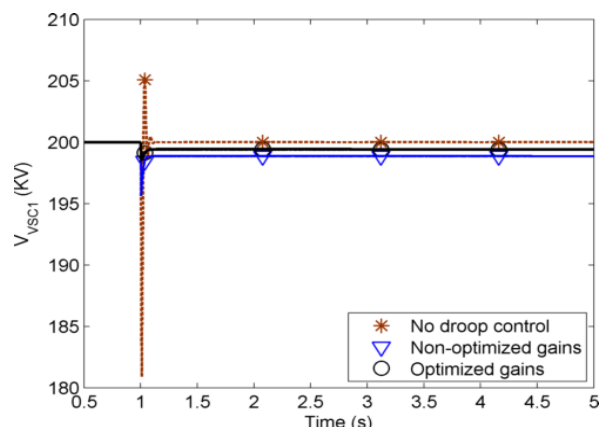


Fig. 11. Outage of VSC3: DC voltage at converter VSC1.

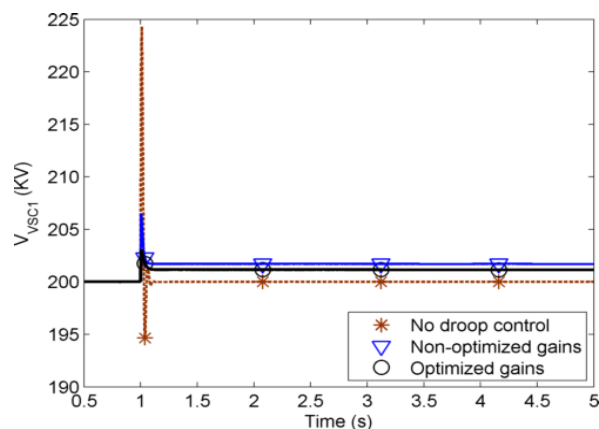


Fig. 12. Outage of VSC4: DC voltage at converter VSC1.

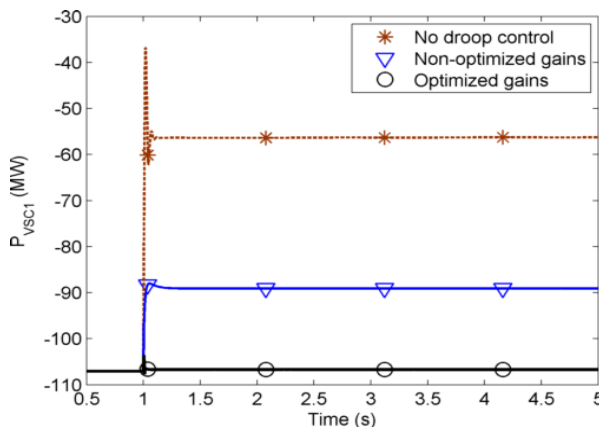


Fig. 13. Outage of VSC2: active power of converter VSC1.

From the results in Figs. 9 through 12, it is clear that the VDC alternative based on the optimization of k_{pv} and k_{vp} provides a significantly enhanced dynamic behaviour, since DC voltage overshoots and steady-state deviations are minimized, as compared to the cases with no VDC or with non-optimized VDC gains. By looking at Figs. 13 and 14, it is evident that, following the outage of converter VSC2, the entire burden of the resulting power imbalance is transferred to VSC1 when no VDC is considered. This is an undesirable situation since large

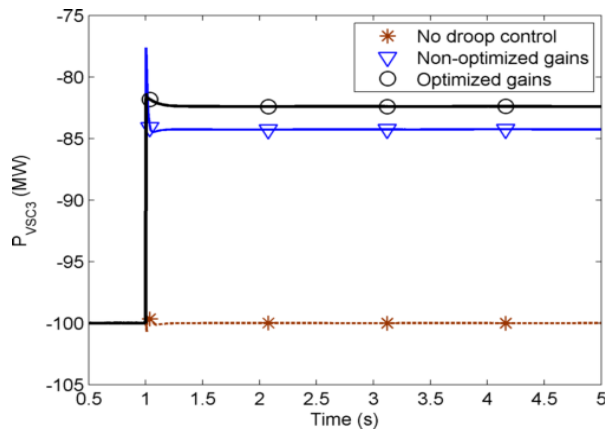


Fig. 14. Outage of VSC2: active power of converter VSC3.

changes will be experienced by the AC system connected to VSC1. For the case with VDC and non-optimized gains, remaining converters in operation share the resultant power imbalance in certain proportion, but with clear overshoots on the transient response of DC voltage. By looking at the behaviour of converter active power with VDC and optimized gains, MTDC dynamics are better improved since significantly reduced overshoots are observed during the transient response.

6. CONCLUSIONS

A BOA based optimization approach to determine converter VDC gains and improve the dynamic behaviour of a sample power system has been investigated in this paper. In this regard, the problem of VDC gain selection is formulated as a constrained optimization problem, with a cost function to be minimized directly from non-linear time-domain simulations and MTDC system dynamics under converter outages.

Simulation results indicate that the lack of VDC in an MTDC network can significantly impact system response following the loss of one of the converters. On the other hand, although VDC with non-optimized gains can provide an improved dynamic performance, as compared to the case with no VDC, the proposed approach is able to provide a much better dynamic behaviour by minimizing the impact of one converter outage on DC voltage transient response and steady-state deviations.

REFERENCES

- Hertem, D., Gomis-Bellmunt, O., and Liang, J. (2016). *HVDC Grids for offshore and supergrid of the future*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Chaudhuri, N., Chaudhuri, B., Majumber, R., and Yazdani, A. (2014). *Multi-terminal direct-current grids – Modeling, analysis and control*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Dierckxsens, C., Srivastava, K., Reza, M., Cole, S., Beertena, J., and Belmans, R. (2012). A distributed DC voltage control method for VSC MTDC systems. *Electric Power Systems Research*, **82**, 54-58.
- Thams, T., Eriksson, R., and Molinas, M. (2017). Interaction of droop control structures and its inherent effect on the

power transfer limits in multi-terminal VSC-HVDC. *Proc. IEEE PES General Meeting*.

- Gonzalez-Longatt, F., Arnaltes, S., and Rodríguez-Amenedo, J. (2016). Dynamic behaviour of multi-terminal VSC-based HVDC after a converter outage: DC Control Strategy. *Proc. ICREPQ*.
- Torres-Olguin, R., Ardal, A., Stoylen, H., Endegnanew, A., Ljokelsoy, K., and Tandea, J. (2014). Experimental verification of a voltage droop control for grid integration of offshore wind farms using multi-terminal HVDC. *Energy Procedia*, **53**, 104-113.
- Yang, X-S. (2014). *Nature-inspired optimization algorithms*. Elsevier, Waltham.
- Ramírez, M., Castellanos, R., Calderón, J., and Malik, O. (2018). Impact Assessment of a VSC-HVDC link on the oscillation modes of a multi-machine system. *Proc. IEEE PES T&DLA Conference and Exhibition*.
- Powertech. (2006a). TSAT - Transient Security Assessment Tool. Model manual.
- Powertech. (2006b). PSAT - Powerflow & Short-circuit Analysis Tool. User manual.
- Zhang, X. (2015). Emerging capability on power system modelling: HVDC systems. IET Special Interest Publication for the Council for Science and Technology.
- Leondes, C. (1995). *Digital control systems implementation techniques*. Academic Press, San Diego.

Appendix A. TEST SYSTEM DATA

- System operating conditions:

	AC grid 1					AC grid 2			
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
MW	763	858.3	80.5	856.7	85	471.2	700	719	700
MVAR	618.7	404.3	45.7	437.0	17.6	81.8	84.1	150.9	141.8

	AC grid 1			AC grid 2	
	Load1	Load2	Load3	Load4	Load5
MW	715.0	875.0	719.0	967.0	1767.0
MVAR	386.0	514.0	380.0	100.0	100.0

- DC line and VSC data:

	DC line		DC line	
	DC01-DC02	DC01-DC03	DC01-DC04	DC03-DC04
R (Ω)	0.92	1.84	2.1	
L (mH)	11.5	23	25.7	
From side C (μ F)	0.0	0.0	0.0	
To side C (μ F)	35.0	70.0	76.0	

	VSC converter			
	VSC1	VSC2	VSC3	VSC4
Bridges	1	1	1	1
X_C (Ω)	17.59	17.59	17.59	17.59
P_{REF} (MW)	—	50	100	150
V_{DCREF} (kV)	200	—	—	—
V_{AC} control	√	√	√	√
Rated MVA	250	250	250	250

Diagnóstico de fallas en transformadores empleando transformadas de Fourier de orden fraccionario

H.M. Cortés-Campos *, C.J. Zuñiga-Aguilar *,
J.F. Gómez-Aguilar **, V.M. Alvarado-Martínez *,
D. Granados-Lieberman ***

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Interior Internado
Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.*

** *CONACyT-Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Interior
Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca,
Morelos, México.*

*** *Departamento de Ingeniería Electromecánica y maestría en
ingeniería eléctrica, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato
(ITESI), Carr. Irapuato-Silao Km 12.5, Col. El Copal, C.P. 36821,
Irapuato, Gto., México.*

Resumen: Los transformadores son máquinas eléctricas fundamentales en los sistemas eléctricos, su funcionamiento anormal o avería puede provocar pérdidas económicas e inconvenientes para los usuarios. Debido a ello, es de suma importancia su monitoreo y los métodos de detección y diagnóstico de fallas se presentan como una solución que permite determinar el estado de operación de la máquina, así como identificar la naturaleza de las fallas presentadas, su localización y riesgo. En este artículo se aplica una metodología de diagnóstico de fallas basada en el comportamiento de señales de corriente de alimentación del transformador aplicando la transformada fraccionaria de Fourier, esta metodología se prueba con datos experimentales obtenidos de un transformador monofásico de 1.5 KVA con emulación de fallas de corto circuito en las vueltas 5, 10, 15, 20 y 25 del devanado primario y bajo condiciones de carga en vacío, con cargas lineales, no lineales y combinadas. La clasificación de las fallas se realiza mediante una red neuronal, la cual es entrenada y probada con los datos experimentales medidos. De acuerdo a los resultados obtenidos, el clasificador neuronal propuesto presenta un mejor desempeño en el análisis de las señales utilizando una transformada de orden fraccionario, por lo tanto se tendrá una mejor detección de falla por parte de la red neuronal.

Keywords: Transformadores, Diagnóstico de fallas, Clasificador neuronal, Transformada de Fourier fraccionaria.

1. INTRODUCCIÓN

Los transformadores tienen un papel importante en los sistemas eléctricos, son utilizados en distintas etapas para transmisión y distribución de energía eléctrica adecuando los niveles de voltaje sin cambiar su frecuencia. Existen distintos factores como el incremento de la energía eléctrica, mantenimiento inadecuado o influencias ambientales como descargas o tormentas eléctricas que hacen susceptibles las fallas en el transformador, estas fallas pueden ser de tipo mecánico, eléctrico o térmico, originando un daño en sus componentes y un funcionamiento anormal o degradado, Kulkarni (2017). Las fallas de corto circuito (CC) entre vueltas del devanado aparecen debido al deterioro del aislamiento en el embobinado. Este deterioro comúnmente está asociado a altos niveles de corriente o

voltaje y en especial a sobrecalentamientos en el equipo. En la literatura existen diversas metodologías para el diagnóstico de fallas en transformadores, en Mostafaei et al. (2018) se presenta un estudio de diversos métodos de monitoreo y detección de fallas en transformadores de potencia, los cuales se tienen como base magnitudes físicas de la máquina como: la corriente, voltaje, frecuencia, flujo magnético, flujo en el núcleo y flujos de fuga. Existen otros métodos como el de análisis de gas disuelto (DGA) en el cual se analiza la composición de los gases generados en un transformador sumergido en aceite, en Yu et al. (2016) se utiliza este método en conjunto con una red neuronal artificial (RNA) probabilística para el diagnóstico de fallas. Una RNA es un sistema de mapeos no lineales cuya estructura se basa en la distribución de información como en el sistema nervioso de los animales

la cual, está compuesta de neuronas altamente conectadas por medio de pesos sinápticos. En este artículo se utilizará una RNA debido a que es una herramienta útil para el reconocimiento de patrones permitiendo realizar la tarea de clasificación de fallas. En Mejia-Barron et al. (2017), se presenta una metodología partiendo del modelado de la corriente Inrush, el cual consta de dos modelos, uno considerando la señal en estado estacionario y otro en transitorio, para la parte transitoria se aproxima la señal mediante series de Fourier y en la parte estacionaria mediante una suma de funciones gaussianas.

Por otra parte, el cálculo fraccionario es la rama del análisis matemático que estudia las derivadas e integrales de orden arbitrario. Varios trabajos reportados con transformadas integrales de orden generalizado (Fourier fraccionario en particular) han demostrado interesantes resultados al analizar señales para diagnóstico de fallas, por ejemplo, en Pham and Gockenbach (2016) los autores consideran la transformada de Fourier fraccionaria discreta para el análisis de señales de vibración en un motor de inducción con fallas de barras rotas en el rotor y daños en los rodamientos, los resultados obtenidos por los autores fueron ms precisos que los obtenidos al aplicar transformada de Fourier discreta de orden entero. En este artículo se propone utilizar la transformada de Fourier fraccionaria y proponer una metodología de diagnóstico de fallas basada en el comportamiento de señales, para ello se considera la extracción de información y el análisis de señales mediante la transformada fraccionaria de Fourier para obtener las características del comportamiento de la falla; así mismo, se realiza la clasificación de las características o rasgos obtenidos mediante una RNA la cual es entrenada y probada con datos experimentales de un transformador considerando diferentes niveles de falla de CC emuladas y por ultimo se obtienen los modos de falla.

2. DEFINICIONES

A continuación se introducen algunas definiciones básicas para el desarrollo de este trabajo.

2.1 Transformadas integrales

Una transformada integral relaciona una función de un determinado conjunto de la forma siguiente:

$$F(s) = \int_{a2}^{a1} K(t, s) f(t) dt, \quad (1)$$

donde $K(t, s)$ es el kernel de la transformada, $a1$ y $a2$ son los límites de integración y $f(t)$ es la función a transformar, el núcleo de transformación cambia de acuerdo al tipo de transformada integral (Fourier, Laplace, Hilbert, Stockwell, Wavelet, Hankel, Mellin, entre otras).

2.2 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una transformación de una señal en tiempo a sus componentes frecuenciales mediante el kernel de transformación $e^{-i\omega t}$, esto es de la siguiente manera

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (2)$$

su transformada inversa es:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} dt, \quad (3)$$

En aplicaciones en ingeniería y en tratamiento de señales, es necesario utilizar la definición de la transformada de Fourier discreta, la cual se define en (4)

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad (4)$$

y su transformada inversa es definida como

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi kn}{N}}. \quad (5)$$

2.3 Transformada de Fourier fraccionaria

En la ecuación (6) se muestra la transformada de Fourier fraccionaria definida por Namias (1980) y formulada matemáticamente por McBride and Kerr (1987)

$$\mathcal{F}_\alpha[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) K_\alpha(t, \omega_\alpha) dt, \quad (6)$$

donde α es el orden de la transformada, $K_\alpha(t, u)$ es el kernel de la transformada definido por la ecuación (7).

$$K_\alpha(t, \omega_\alpha) = K_\phi e^{i\pi(\omega_\alpha^2 \cot \phi - 2\omega_\alpha t \csc \phi + t^2 \cot \phi)}, \quad (7)$$

donde $\phi = \frac{\alpha\pi}{2}$ y K_ϕ está dada por la ecuación (8).

$$K_\phi = \exp \frac{-i \left(\frac{\pi \operatorname{sgn}(\phi)}{4} \right) - \frac{\phi}{2}}{\sqrt{|\sin \phi|}}, \quad (8)$$

en los casos donde $\alpha = 0$ y $\alpha = \pm 2$ el kernel de transformación es $K_0(t, \omega_\alpha) = \delta(\omega_\alpha - t)$ y $K_{\pm 2}(t, \omega_\alpha) = \delta(\omega_\alpha + t)$, respectivamente. Se pueden encontrar distintos trabajos en cuanto a la discretización de esta transformada, por ejemplo, en Su et al. (2019) se realiza una comparación de las distintas formas de discretización de la transformada fraccionaria de Fourier, en este artículo se utiliza la discretización propuesta por Candan et al. (2000) donde la matriz de transformación en forma discreta se define para N impar tal como se muestra en (9).

$$K_\alpha(\omega_\alpha, n) = \sum_{k=0}^{N-1} \psi_k(\omega_\alpha) e^{-i \frac{\pi}{2} k \alpha} \psi_k(n), \quad (9)$$

y para N par:

$$K_{\alpha}(\omega_{\alpha}, n) = \sum_{k=0, k \neq (N-1)}^N \psi_k(\omega_{\alpha}) e^{-i \frac{\pi}{2} k \alpha} \psi_k(n), \quad (10)$$

donde $\psi_k(\omega_{\alpha})$ y $k(n)$ son la K^{th} función de Hermite-Gauss dada por:

$$\psi_k(f) = e^{-\frac{f^2}{2}} H_n(f). \quad (11)$$

donde $H_n(f)$ es la función considerada para calcular los polinomios de Hermite, la cual esta dada por:

$$H_n(f) = (-1)^n e^{f^2} \frac{d^n}{df^n} e^{-f^2}. \quad (12)$$

Finalmente la transformada de Fourier fraccionaria en forma discreta esta dada por:

$$X(\omega_{\alpha}) = x(n) K_{\alpha}(\omega_{\alpha}, n). \quad (13)$$

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

3.1 Diagnóstico de fallas

En la literatura se han propuesto múltiples enfoques para realizar la detección y el diagnóstico de fallas, los comúnmente utilizados son por modelo matemático y comportamiento de señales, en Isermann (2006) y Verde et al. (2013), se describe el procedimiento necesario para realizar los métodos de diagnóstico, en la Fig. 1 se muestran un diagrama con los métodos de detección y diagnóstico en base a datos y comportamiento de las señales. En este trabajo se considera el método por comportamiento de señales, el procedimiento consiste en la extracción de información, clasificación y creación de los modos de falla, obteniendo de esta última el componente con falla. En la Fig. 2, se muestran las tareas para la metodología implementada en este artículo.

En la extracción de información, se realizará el tratamiento de las señales medidas utilizando la transformada de Fourier fraccionaria en su definición discreta, el objetivo de implementar esta definición es la de obtener mejores características debido a que se puede ajustar el orden de transformación el cual permite obtener una señal semi transformada entre los dominios tiempo y frecuencia manteniendo su energía.

Para la etapa de clasificación, se propone utilizar un clasificador neuronal con la topología mostrada en la Fig. 3 cuyo modelo neuronal se muestra en la ecuación (14).

$$\mathbf{Y} = \mathbf{V} \varphi(\mathbf{W} \mathbf{X} + \mathbf{W}_h), \quad (14)$$

$$\mathbf{V} = \Phi^+ \mathbf{Y}, \quad (15)$$

donde $\mathbf{X}$ representa el vector de entradas de la RNA producidas por las ventanas de datos mostradas en la Fig. 6, $\mathbf{W}$ y $\mathbf{W}_h$ son pesos sinápticos y umbrales, respectivamente, definidos aleatoriamente con el fin de extender el co-dominio de las funciones de activación (φ) de la primera

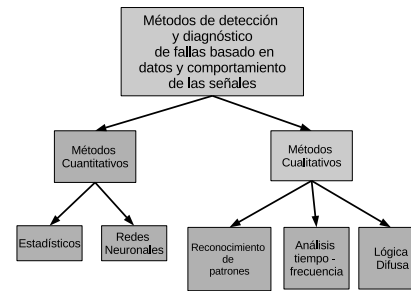


Figura 1. Metodos de deteccion y diagnostico de fallas.

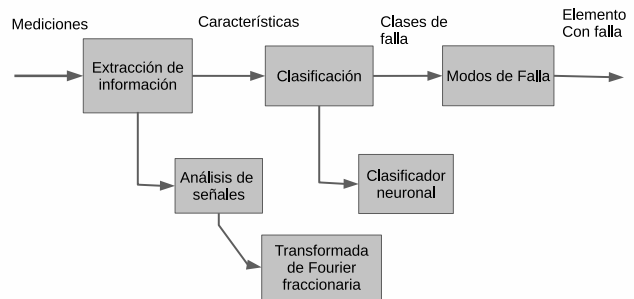


Figura 2. Metodología para el diagnóstico de fallas.

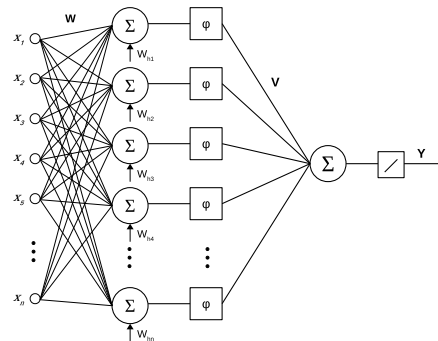


Figura 3. RNA usada como clasificador.

capa. La ecuación (15) representa el entrenamiento de los pesos sinápticos $\mathbf{V}$ de la capa de salida donde Φ^+ es la matriz pseudoinversa de la dinámica generada por $\varphi(\mathbf{W} \mathbf{X} + \mathbf{W}_h)$ y $\mathbf{Y}$ es un vector definido por las fallas que se desean clasificar.

4. EXPERIMENTACIÓN

Las características y configuraciones del equipo utilizado para realizar la emulación de fallas de CC en un transformador monofásico se describen a continuación.

4.1 Características del equipo utilizado.

El equipo utilizado en el experimento se enlista en la Tabla 1 y en la Fig. 4 se muestra el transformador que fue modificado con diversas derivaciones para la emulación de

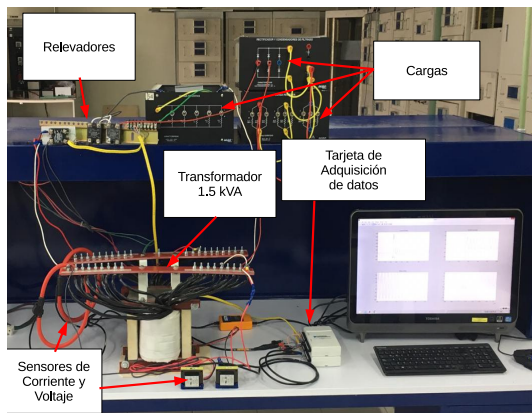


Figura 4. Banco de pruebas experimentales de emulación de fallas en transformador.

fallas de CC de 110V / 220V, 1.5kVA, se utilizaron dos sensores de corriente de tipo Rogowski i2000 flez marca Fluke, debido a que mantienen una alta linealidad y se evita la saturación en comparación con otros sensores con núcleo de hierro, como sensor de voltaje se utilizaron transformadores de potencial VPP24-1250, marca Triad Magnetics, conectados en paralelo a los devanados primario y secundario del transformador, estos transformadores permiten tener un aislamiento galvánico entre el sistema de adquisición de datos y el transformador, la adquisición de datos se realizó mediante una tarjeta de marca National Instruments modelo NI USB 6211, además se utilizó un analizador de energía Fluke 435 como referencia para la calibración de los sensores.

Tabla 1. Equipo utilizado

Transformador monofásico	1.5KVA - 120/220V
Relevadores de estado sólido	GOLD- SAP4050d
Sensor de Voltaje	VPP24-1250
Sensores de corriente	Rogowski- i2000s
Tarjeta de adquisición de datos	NI USB6211
Analizador de energía	Fluke 435
Resistencia	100 Ω
Capacitor	14 μ - 400v
Puente Rectificador de diodos	MB3505-1000v-35A

4.2 Pruebas experimentales.

En la Fig. 5 se muestra el diagrama de eléctrico del experimento. Las pruebas experimentales considerando cargas lineales (**R**) y no lineales (**R-NL**, **RD**, **C**) activadas mediante relevadores de estado sólido (**Rv-L**, **Rv-NL**) fueron obtenidas en el laboratorio de calidad de la energía del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato.

La relación de fallas y cargas seleccionadas que fueron emuladas en el experimento se muestran en la Tabla 2, se adquirieron señales de corriente y voltaje en devanados primario y secundario considerando las combinaciones de carga mostrado en la tabla en el devanado secundario. En la Fig. 6 se muestra la medición de corriente en el devanado primario sin inducir el CC.

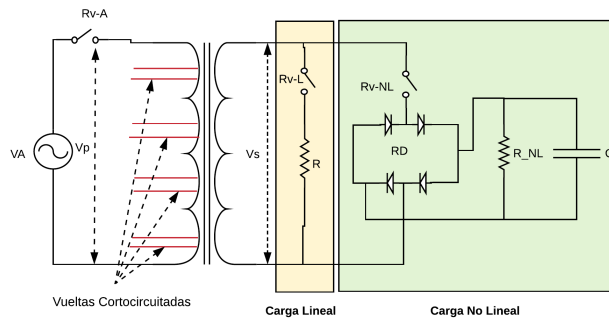


Figura 5. Diagrama eléctrico de emulación de fallas.

Tabla 2. Accionamiento de cargas

Accionamiento	Carga	Vueltas en CC
0.8 - 2.8 seg	En Vacío	0/5/10/15/20/25
2.8 - 4.8 seg	Carga lineal	0/5/10/15/20/25
4.8 - 6.8 seg	Carga no lineal	0/5/10/15/20/25
6.8 - 8.8 seg	Carga combinada	0/5/10/15/20/25

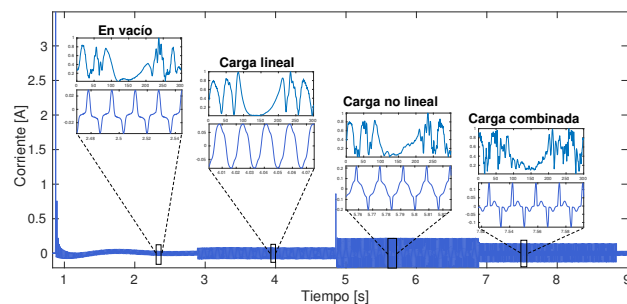


Figura 6. Medición de corriente en el devanado primario.

4.3 Resultados

Se utilizaron señales de corriente en el devanado primario tal como se muestra en la Fig. 6. La señal de corriente fue seccionada en ventanas de información con duración de 50 ms equivalente a 300 muestras; el inicio de la ventana es definido de manera aleatoria con el fin de considerar la mayor cantidad de características. Cabe destacar que se podría seccionar toda la señal en ventanas de información, pero con el fin de no sobre-entrenar a la RNA se optó por generar un total de 24000 ventanas (1000 ventanas por cada clase de falla) para todas las clases de fallas; las ventanas fueron divididas en dos partes con un 70 % para realizar el entrenamiento y validación del entrenamiento; 30 % para pruebas de validación. Se aplicó la transformada de Fourier fraccionaria a las ventanas creadas, considerando que el orden varía entre 0.01 y 1 con incrementos de 0.01 con el fin de encontrar el orden óptimo de tal manera que el desempeño de la RNA fuera provechoso. El orden $\alpha = 0.4$ es el que mejor desempeño mostro. En la Fig. 7 se muestran los desempeños obtenidos mediante la evaluación del 30 % del total de las ventanas en cada clase de falla, las cuales se enlistan en la Tabla 3. Cabe destacar que la clasificación fue realizada en el dominio

temporal obteniendo un promedio de **90.1 %** mientras que, utilizando la transformada de Fourier fraccionaria, se obtuvo una media del **92.9 %**.

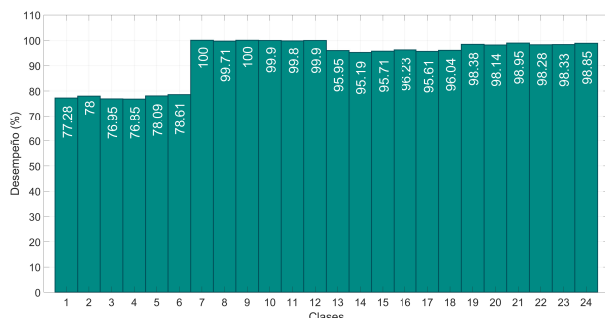


Figura 7. Desempeños del clasificador.

Tabla 3. Clases de falla

Clase	Vuelta	Carga.
1	0 Vueltas	Vació
2	0 Vueltas	Lineal
3	0 Vueltas	No lineal
4	0 Vueltas	Combinada
5	5 Vueltas	Vació
6	5 Vueltas	Lineal
7	5 Vueltas	No lineal
8	5 Vueltas	Combinada
9	10 Vueltas	Vació
10	10 Vueltas	Lineal
11	10 Vueltas	No lineal
12	10 Vueltas	Combinada
13	15 Vueltas	Vació
14	15 Vueltas	Lineal
15	15 Vueltas	No lineal
16	15 Vueltas	Combinada
17	20 Vueltas	Vació
18	20 Vueltas	Lineal
19	20 Vueltas	No lineal
20	20 Vueltas	Combinada
21	25 Vueltas	Vació
22	25 Vueltas	Lineal
23	25 Vueltas	No lineal
24	25 Vueltas	Combinada

5. CONCLUSIÓN

De acuerdo al estado del arte existen diversos métodos para diagnóstico de fallas en transformadores, sin embargo la detección y diagnóstico de fallas en transformadores utilizando la transformada de Fourier fraccionaria con redes neuronales no ha sido reportada en la literatura, por lo tanto en este trabajo se desarrolla la propuesta de una metodología utilizando la transformada de Fourier fraccionaria para la extracción de características, la cual fue aplicada satisfactoriamente en datos de mediciones experimentales obtenidos de un transformador monofásico de 1.5 kVA con emulación de fallas de CC en las vueltas 5, 10, 15, 20 y 25 del devanado primario y bajo condiciones de carga en vacío, con cargas lineales, no lineales y combinadas. Se probaron distintos órdenes de transformación

con la finalidad de seleccionar el que presenta un mejor desempeño, siendo 0.4 el orden con el cual se obtuvieron los mejores resultados mejorando un 2 % comparado con el análisis de características en el dominio de tiempo, lo cual se traduce en una mejor detección de falla por parte de la red neuronal.

AGRADECIMIENTOS

Héctor Martín Cortés Campos y Carlos Jesús Zúñiga Aguilar agradecen el apoyo por CONACyT a través de la asignación de la beca de maestría y doctorado, respectivamente. José Francisco Gómez Aguilar y Víctor Manuel Alvarado Martínez agradecen el apoyo brindado por CONACyT: Cátedras CONACyT para jóvenes investigadores 2014 y SNI-CONACyT.

REFERENCIAS

- Candan, C., Kutay, M.A., and Ozaktas, H.M. (2000). The discrete fractional fourier transform. *IEEE Transactions on signal processing*, 48(5), 1329–1337.
- Isermann, R. (2006). *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer Science & Business Media.
- Kulkarni, Satish V, K.S. (2017). *Transformer engineering: design, technology, and diagnostics*. CRC press.
- McBride, A. and Kerr, F. (1987). On namias's fractional fourier transforms. *IMA Journal of applied mathematics*, 39(2), 159–175.
- Mejia-Barron, A., Valtierra-Rodriguez, M., Granados-Lieberman, D., Olivares-Galvan, J.C., and Escarela-Perez, R. (2017). Experimental data-based transient-stationary current model for inter-turn fault diagnostics in a transformer. *Electric Power Systems Research*, 152, 306–315.
- Mostafaei, M., Faiz, J., Venikar, P.A., and Ballal, M.S. (2018). Turn-to-turn fault monitoring methods in electrical power transformers state of the art. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 28(12), e2644.
- Namias, V. (1980). The fractional order fourier transform and its application to quantum mechanics. *IMA Journal of Applied Mathematics*, 25(3), 241–265.
- Pham, D.A.K. and Gockenbach, E. (2016). Analysis of physical transformer circuits for frequency response interpretation and mechanical failure diagnosis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(3), 1491–1499.
- Su, X., Tao, R., and Kang, X. (2019). Analysis and comparison of discrete fractional fourier transforms. *Signal Processing*.
- Verde, C., Gentil, S., and Morales-Menéndez, R. (2013). *Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos*. Editorial Trillas.
- Yu, S., Zhao, D., Chen, W., and Hou, H. (2016). Oil-immersed power transformer internal fault diagnosis research based on probabilistic neural network. *Procedia Computer Science*, 83, 1327–1331.

Convertidores de potencia bidireccionales para aplicaciones de tracción

Jhair Barreto Popoca*, Gabriel Calzada Lara*, Mario Ponce Silva*

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México.

(e-mail: [jhair.barreto18ee, gabriel.calzada, ponce]@cenidet.edu.mx).

Resumen: En este trabajo se presenta el análisis, diseño y pruebas de convertidores de potencia diseñados para accionar y controlar un motor de inducción trifásico a partir de una fuente de CD (baterías). Debido a que la máquina eléctrica mencionada tiene la capacidad de ser bidireccional en potencia, se contemplan convertidores bidireccionales, de modo que se requiere un convertidor CD-CD que eleve o reduzca el voltaje según sea la dirección de potencia y un convertidor CD-CA que funcione como inversor o rectificador según sea la dirección de potencia, para el funcionamiento como rectificador activo se utiliza un sensor de voltaje como detector de cruce por cero en la fase A, esto para la correcta sincronización de la secuencia de pulsos. Las pruebas incluyen la operación de ambos convertidores trabajando en conjunto como motor; se hacen pruebas con una carga mecánica impuesta en el eje por una segunda máquina eléctrica idéntica, acoplada y que funciona como generador, para esta última prueba se utiliza una modulación SPWM y una técnica de control voltaje/frecuencia constante para controlar la velocidad de giro.

Palabras clave: Vehículo eléctrico de movilidad personal, máquina de inducción trifásica, convertidor bidireccional CD-CD, convertidor bidireccional CD-CA, frenado regenerativo.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento en la contaminación del aire es uno de los problemas más graves que enfrenta la humanidad, éste se ha agudizado con el aumento de la población y su creciente necesidad de movilidad, es de hecho este uno de los sectores que más ha cobrado importancia, pues contribuye a generar casi una cuarta parte (23%) de las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la energía (Barbero, 2014). En este contexto en los últimos años surgieron nuevos conceptos de transporte; los vehículos eléctricos de movilidad personal (VEMP) (Mitchell, 2007), estos son una variante del vehículo eléctrico que permiten atender dos problemas crecientes: la movilidad personal deficiente, y la gran deficiencia energética en el transporte.

1.1 Vehículos eléctricos de movilidad personal.

Los VEMP son ideales para su uso en ciudades aglomeradas, donde el espacio es reducido y las velocidades son bajas. Ejemplos de estos son: Segways, bicicletas eléctricas, patinetes eléctricos, hoverboards, scooters, entre otros.

Actualmente los VEMP son propulsados por motores de corriente continua. Debido a la facilidad de su control se emplean en donde se requieren aplicaciones de velocidad variable aunque no sean muy eficientes. En contraparte los motores de corriente alterna CA (motores asíncronos) son más robustos, tienen menor costo y tamaño, tienen una fiabilidad y rendimiento más altos, y requieren un menor mantenimiento. Estas características los hacen ideales para aplicaciones de tracción. Sin embargo, las complicaciones de su control han

retrasado su empleo como sistema de propulsión en VEMP, aspectos que con el avance de la electrónica de potencia pueden ser resueltos de una manera eficiente haciendo posible el uso de este tipo de motores en sistemas de tracción.

Este trabajo se centrará en el diseño, construcción y pruebas de una fuente bidireccional para poder manejar el flujo de energía en una máquina de inducción trifásica empleada como sistema de propulsión para un VEMP. Se toma como referencia que es necesario un motor de 200 W para mover una bicicleta con capacidad de carga de 50 kg (Larminie, j., Lowry, j., 2003). Sin embargo, debido a que se tendrá un motor asíncrono como carga se dimensiona una potencia de 500 W en los convertidores para poder soportar la potencia de arranque que demanda el motor, además, los convertidores deben tener la capacidad de aprovechar la propiedad regenerativa de la máquina eléctrica. El esquema general que muestra las etapas de conversión de energía se presenta en la Fig. 1.

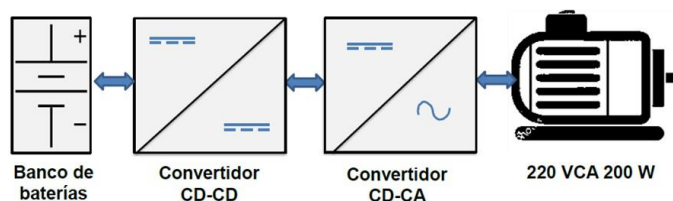


Fig. 1. Esquema general de convertidores.

2. DESAROLLO

2.1 Diseño y construcción de convertidor CD-CD bidireccional

El convertidor utilizado se muestra en la Fig. 2, este convertidor tiene la capacidad de elevar voltaje hacia un sentido de potencia y reducirlo en sentido opuesto, se trata de dos convertidores unidos (elevador y reductor), su principal ventaja es que se reduce el número de componentes, ya que se comparte el inductor y con un MOSFET de buenas prestaciones se puede evitar el uso de diodos externos como es el caso; los diodos D1 y D2 son representativos, puesto que se utilizaron los diodos parásitos de los MOSFETs y no se necesitaron de manera externa, los capacitores C1 y C2 corresponden a la salida de cada convertidor y son utilizados para filtrar el voltaje de salida.

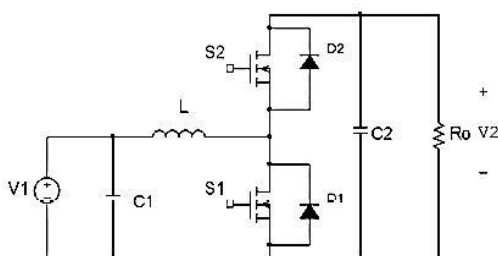


Fig. 2. Convertidor elevador-reductor bidireccional.

2.1.1 Ecuaciones de diseño en modo reductor.

A continuación se presentan las ecuaciones necesarias para el cálculo de los componentes en un convertidor reductor (Kazimierczuk, 2008). Cabe destacar que para este modo de operación la ganancia (M) es igual al ciclo de trabajo (D).

$$M = V_o / V_i \quad (1)$$

$$L = [(V_{in} - V_o) * D * T_s] / \Delta i_L \quad (2)$$

$$I_L = (D * V_{in}) / R \quad (3)$$

$$C = \Delta i_L / (8 * \Delta V_C * f_s) \quad (4)$$

$$I_Q = (V_o / R) D \quad (5)$$

$$I_D = (V_o / R)(1 - D) \quad (6)$$

Donde:

I = Corriente promedio de transistor.

I = Corriente promedio en diodo.

D = Ciclo de trabajo.

L = Inductancia.

I = Corriente de inductor.

C = Capacitancia.

R = Resistencia de carga.

f = Frecuencia de conmutación.

V_i = Voltaje de entrada.

V_o = Voltaje de salida.

= Porcentaje de rizo de corriente en inductor.

v = Porcentaje de rizo de voltaje en capacitor.

M = Ganancia de convertidor.

Po = Potencia de salida.

2.1.2 Ecuaciones de diseño en modo elevador.

Para el cálculo de componentes del convertidor elevador se utilizan las siguientes ecuaciones (Kazimierczuk, 2008):

$$M = 1 / (1 - D) = V_o / V_i \quad (7)$$

$$L = (V_{in} * D * T_s) / \Delta i_L \quad (8)$$

$$I_L = V_{in} / [R(1 - D)^2] \quad (9)$$

$$C = (V_o * D * T_s) / (R * \Delta V_C) \quad (10)$$

$$I_Q = (P_o * D) / (V_o[1 - D]) \quad (11)$$

$$I_D = P_o / V_o \quad (12)$$

2.1.3 Diseño del convertidor y componentes utilizados.

El diseño de la topología inicia con el cálculo del capacitor de salida e inductor en modo elevador con las ecuaciones 7, 8, 9 y 10. Como parámetros de diseño se toman las especificaciones de la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones de diseño modo elevador

Parámetro	Valores
Voltaje de entrada (V_i)	96 V
Voltaje de salida (V_o)	310 V
Potencia de salida (P_o)	500 W
Porcentaje de rizo de corriente en el inductor ()	15 %
Porcentaje de rizo de voltaje de salida ()	5 %
Frecuencia de conmutación ()	100 kHz

Se calcula el ciclo de trabajo correspondiente con la ecuación de ganancia (7); $D = 0.69$, seguido con (9), se calcula la corriente promedio del inductor; $I_L = 5.208$ A, se calcula en Amperes de acuerdo al porcentaje de diseño; $I_L = 0.78$ A, se calcula después en Volts de acuerdo al porcentaje de diseño; $V_r = 15.55$ V, por ley de Ohm se calcula $R = 193 \Omega$, con (8) se calcula la inductancia:

$$L = \frac{310V * 0.69 * 10\mu S}{0.78A} = 849\mu H \quad (13)$$

Posteriormente se calcula la capacitancia de salida con (10):

$$C = \frac{310V * 0.69 * 10\mu S}{193 \Omega * 15.55 V} = 712nF \quad (14)$$

Para el modo reductor como parámetros de diseño se toman;

Tabla 2. Especificaciones de diseño modo reductor

Parámetro	Valores
Voltaje de entrada (V_i)	310 V
Voltaje de salida (V_o)	96 V
Potencia de salida (P_o)	500 W
Porcentaje de rizo de corriente en el inductor ()	15 %
Porcentaje de rizo de voltaje de salida ()	5 %
Frecuencia de conmutación ()	100 kHz

Por ley de Ohm se calcula; $R = 18.43 \Omega$, el ciclo de trabajo se calcula mediante (1); $D = 0.309$, se comprueba con (2) que el valor del inductor coincide con el modo elevador; $L = 849 \mu H$, se calcula con (3) la corriente promedio en el inductor; $I = 5.19 A$, de acuerdo al porcentaje de diseño se calcula en Amperes; $I = 0.77 A$, de igual manera se calcula Δv_c en Volts; $\Delta v = 4.8 V$, por último se calcula con (4) el valor del capacitor de salida para este modo de funcionamiento:

$$C = \frac{0.77 A}{8 * 4.8 V * 100 kHz} = 200 nF \quad (15)$$

Para saber a qué intensidad de corriente estará sometido el diodo y transistor, en modo elevador; mediante (11) se calcula; $I_{\text{elevador}} = 3.6 A$, con (12) se calcula; $I_D \text{ elevador} = 1.61 A$. En modo reductor el esfuerzo de corriente en el transistor de acuerdo a (5) es; $I_Q \text{ reductor} = 1.6 A$, el esfuerzo de corriente en el diodo de acuerdo a (6) es; $I_D \text{ reductor} = 3.6 A$. Finalmente se eligieron los siguientes componentes que satisfacen los valores calculados:

Tabla 3. Componentes seleccionados.

Componente	Valor calculado	Valor comercial	Modelo
Inductor	849 μH	1000 μH	1140-104K-RC
Capacitor c1	200 nF	200 nF	N13 u2
Capacitor c2	714 nF	940 nF	N114819173 u47
Transistor	Idiodo = 3.6 A Itransistor = 3.6 A Vds = 400V	Idiodo = 36 A Itransistor = 24 A Vds = 1200 V	C2M0080120D

El convertidor CD-CD construido con los componentes seleccionados se muestra en la Fig. 3.



Fig. 3. Convertidor CD-CD construido.

2.1.4 Resultados experimentales modo elevador.

Se somete a prueba el modo elevador, se toman como parámetros de prueba: $V_{in} = 96 V$, $V_o = 310 V$, $P_o = 500 W$, se hacen pruebas a distintos voltajes de entrada hasta llegar a 96V. La Tabla 4 muestra la eficiencia del convertidor en cada uno de los puntos de voltaje mencionados:

Tabla 4. Eficiencia de convertidor elevador.

Voltaje de entrada (V)	Potencia de entrada (W)	Potencia de salida (W)	η (%)
10	6.2628	5.6932	90.90
30	58.20	53.89	92.59
60	228.158	214.095	93.83
96	583.327	551.278	94.5

2.1.5 Resultados experimentales modo reductor.

Se somete a prueba el modo reductor, se toman como parámetros de prueba: $V_{in} = 300 V$, $V_o = 96 V$, $P_o = 200 W$ (puesto que la máquina eléctrica como generador no podrá generar más potencia que la nominal), se hacen pruebas a distintos voltajes de entrada hasta llegar a 300V, el resultado se muestra resumido en la Tabla 5.

Tabla 5. Eficiencia de convertidor reductor.

Voltaje de entrada (V)	Potencia de entrada (W)	Potencia de salida (W)	η (%)
10	0.204	0.1127	55.24
40	3.64	2.9759	81.75
60	7.98	6.602	82.73
90	19.08	16.146	84.62
120	33.96	28.969	85.3
150	51.75	45.114	87.17
200	92.2	80.556	87.37
250	142.5	125.398	87.99
300	204	180.873	88.66

2.2 Convertidor CD-CA bidireccional.

El convertidor utilizado es un módulo STK554U3 de On semiconductor mostrado en la Fig.4, es un inversor trifásico con capacidad en corriente de hasta 10 A,

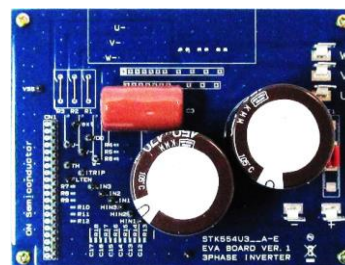


Fig. 4. Convertidor CD-CA utilizado.

El fabricante garantiza su correcto funcionamiento como inversor con eficiencia de 98%, sin embargo en modo rectificador no especifica información, por lo que se realizó la prueba como rectificador activo; se utiliza un sensor aislado de voltaje (véase Fig. 5) y un comparador analógico como detector de cruce por cero en la fase A, para la secuencia de disparo de los IGBTs se utilizó un FPGA modelo *icestick*, el cual se encarga de contar el tiempo después del flanco de subida en el detector de cruce por cero. Los resultados se presentan en la Tabla siguiente:

Tabla 6. Eficiencia del convertidor CD-CA como rectificador.

Voltaje de entrada (Vrms fase-neutro)	Potencia trifásica de entrada (W)	Potencia de salida bus de CD (W)	η (%)
30	10.2	9.797	96.04
60	41	39.49	96.31
90	92.4	91.64	99.17
127	184.6	193.6	99.45

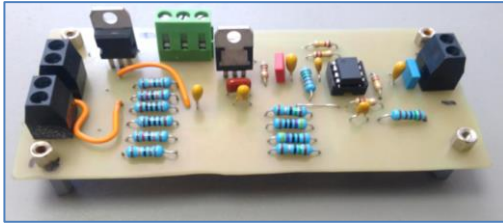


Fig. 5. Sensor de voltaje aislado.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES COMO MOTOR.

Para esta prueba se requiere imponer una carga mecánica al motor de manera que los convertidores se esfuercen a la potencia nominal del mismo, para ello se acopla mecánicamente una segunda máquina eléctrica idéntica (véase Fig. 6), la cual funcionara como generador y se le agregara una carga eléctrica trifásica de tal manera que sea vista como una carga mecánica en el eje del motor. En la misma figura la máquina izquierda actúa como motor, la máquina derecha actúa como generador; con conexión de capacitores y carga variable mediante relevadores. El motor es modelo BHI62S-A de Oriental Motors y se trata de un motor de inducción trifásico de 200W.

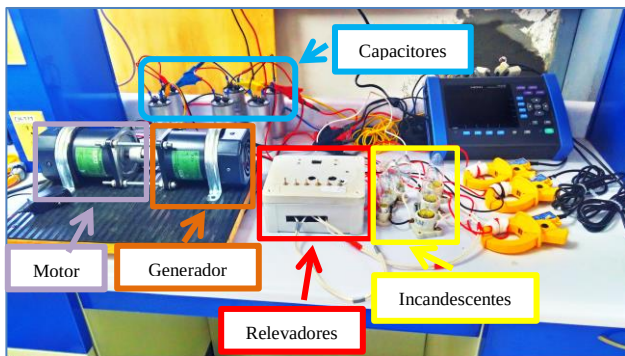


Fig.6. Acoplamiento mecánico de máquinas eléctricas.

De la teoría del generador de inducción trifásico autoexcitado descrita en (Barrado, 2013), se calculan los capacitores necesarios conectados en estrella para lograr la autoexcitación del generador mediante la siguiente ecuación:

$$C = I_L \sin \delta / V_L 2\pi f \quad (16)$$

Donde:

- C : Capacitancia necesaria para la autoexcitación.
- : Corriente de línea
- : Voltaje de línea
- f : Frecuencia de red.
- ξ : Ángulo de desfase de la máquina

$$C = \frac{0.95A(\sin[53.13^\circ])}{220V_{rms} * 2\pi * 60Hz} = 9\mu F \quad (17)$$

El cálculo en (17) muestra un capacitor por fase de 9 μ F, sin embargo este cálculo es válido solo cuando el generador trabaja

en vacío y el motor con una frecuencia de sincronismo de 60 Hz, al imponerle cualquier carga eléctrica el voltaje en el generador caerá de manera considerable. En la práctica se aumenta la capacitancia hasta 25 μ F, con este valor se logra un voltaje generado línea-neutro de 200 Vrms con frecuencia de sincronismo de 60 Hz en el motor, valor lejano al nominal (127 Vrms), no obstante, mediante la técnica de voltaje/frecuencia constante en el inversor, se reduce la velocidad del motor y por consiguiente el voltaje generado en las terminales del generador. En la Fig. 7 se observa la prueba realizada para el accionamiento del motor, los convertidores de potencia están conectados para trabajar en conjunto, se puede observar la plataforma *nucleo* en la cual se ejecuta la técnica voltaje/frecuencia constante aplicada al motor, la velocidad del motor se ajusta mediante el potenciómetro mostrado.

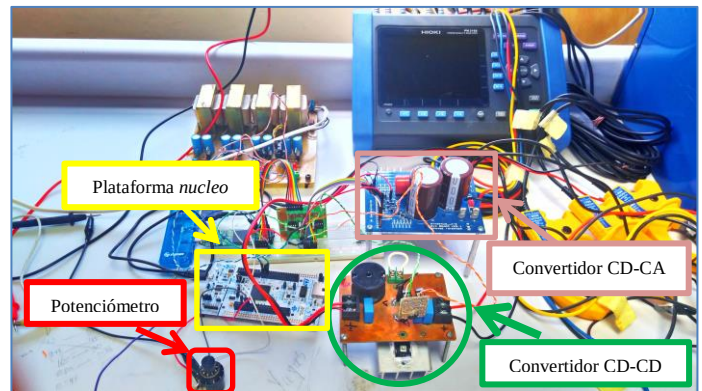


Fig. 7. Convertidores de potencia en conjunto para alimentar al motor.

Para la prueba se redujo el índice de modulación así como también la parte proporcional de frecuencia para poder compensar el sobrevoltaje en vacío del generador y reducirlo a 127 Vrms, esto se logró con frecuencia de sincronismo en el motor de 46 Hz y con un índice de modulación del 77.57%. Luego de este primer paso se conecta una carga con potencia trifásica de 75W (observar focos incandescentes en Fig.6 y Fig.8) mediante relevadores en las terminales del generador, se observa que el voltaje en el generador cae y se procede a compensarlo hasta encontrar una frecuencia de sincronismo en el motor de 52.36 Hz y con un índice de modulación del 87.27% para los cuales el generador entrega 75W.

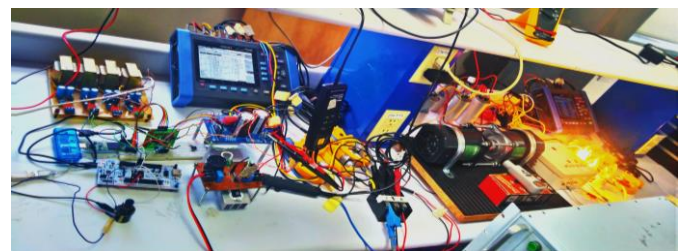


Fig. 8. Prueba de conjunto como motor.

En ese instante, la flecha del motor gira a 1423 rpm, el generador está entregando 75W en iluminación (véase Fig.9) y del otro lado de la flecha, el motor exige al inversor 204 W como se muestra en la Fig.10.



Fig. 9. Analizador de energía en generador. (Corriente y potencia escaladas 10 veces la medida real).

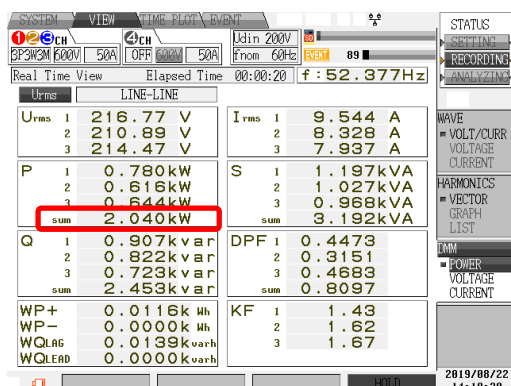


Fig. 10. Analizador de energía en motor. (Corriente y potencia escaladas 10 veces la medida real).

Los resultados en cada etapa de potencia se muestran en la Tabla siguiente:

Tabla 7. Potencias por etapa en prueba del conjunto como motor.

Potencia de fuente de CD (W)	Potencia de salida de convertidor CD-CD (W)	Potencia de salida de inversor (W)	Potencia a la salida del generador (W)
221.76	214.2	204	75

Se puede observar que se pierde gran porcentaje de energía en la conversión de energías eléctrica y mecánica, sin embargo analizando solo la eficiencia de los dos convertidores en conjunto, se obtiene una eficiencia de 91.99%, lo cual muestra un buen manejo de transferencia de potencia.

4. CONCLUSIONES

Los convertidores construidos y probados en este trabajo resultaron ser adecuados desde el punto de vista de electrónica de potencia, la prueba del conjunto en modo motor muestra un buen desempeño (91.99% de eficiencia), las pruebas del conjunto para el modo generador se pueden prever exitosas

con la evaluación que se realizó de los convertidores por separado (88.8 % de eficiencia en el convertidor reductor y 99.45 % en el rectificador). El convertidor CD-CD resulta ser económico, tiene un menor tamaño, y menor número de componentes respecto a otras topologías más complejas y de mayor costo. El convertidor CD-CA demuestra tener una buena eficiencia en ambos sentidos de potencia, tiene la capacidad de ser bidireccional a pesar de no estar especificado por el fabricante y su tamaño es razonable para ser capaz de realizar ambas funciones. Los resultados preliminares de este trabajo demuestran que en su conjunto los convertidores propuestos y el motor de inducción son una alternativa a los sistemas de tracción actuales en VEMP, no obstante, para su aplicación real hace falta más desarrollo e investigación que permita resolver problemas que con el presente trabajo se encontraron, por ejemplo; hacen falta lazos de control que puedan operar de manera automática y segura el motor de inducción trifásico, sin lazos de control, la operación del motor podría ser complicada e incluso insegura, dando lugar a accidentes. El presente trabajo abre las puertas a más investigaciones para eventualmente llegar a la aplicación segura, práctica, económica y confiable de motores de inducción trifásicos aplicados como sistemas de tracción en VEMP.

REFERENCIAS

- Barbero, J. A. (2014), "Transporte y energía: Los desafíos del desarrollo sostenible" conferencia dictada durante el ciclo *El poder de la energía en el siglo XXI*. Universidad Nacional de Cuyo, 11 de abril de 2014.
- Barrado, J., (2013). *El generador de inducción autoexcitado*. Alfaomega Grupo Editor, pp.17
- González, M., (2010) "Diseño estático de un convertidor DC/DC reductor-elevador bidireccional" en *Revista Tecnum*. Volumen 14, revista número 26, junio de 2010, páginas 7-17 pp.
- Kazimierzczuk, M., (2008). *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*. Book of John Wiley & Sons, pp.23
- Larminie, J., Lowry, J., (2003). *Electric Vehicle technology explained*. Book of John Wiley & Sons, pp.263.
- Mitchell W. J., (2007) "Ciudades inteligentes" en *UOC Papers: revista sobre la sociedad del conocimiento*, no. 5, pp. 12.
- Morichetti G., Oggier G., Bossio G., De Angelo C., and García G., (2014) "Implementación de un convertidor reductor-elevador bidireccional para vehículos eléctricos" conferencia dictada durante el *congreso Argentino de Control Automático*. Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Tytelmaier, K., (2016) "A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems" conferencia dictada durante el ciclo *II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering*. Chernihiv National University of Technology (CNUT).

Análisis y Diseño Optimizado de un Convertidor Resonante CD-CD de Alta Eficiencia en Lazo Abierto

Alan R. García-García*, Mario Ponce-Silva**, Josué Lara-Reyes***, Jaime E. Arau-Roffiel****, Alfredo González-Ortega*****.

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, CP 62490, México.

(e-mail: alan.garcia18ee@cenidet.edu.mx)

** e-mail: ponce@cenidet.edu.mx

*** e-mail: josue.lara18ea@cenidet.edu.mx

**** e-mail: jarau@cenidet.edu.mx

***** e-mail: fredy@cenidet.edu.mx

Resumen: El análisis y diseño de un convertidor resonante CD-CD en lazo abierto se presenta en este documento. El circuito es un convertidor CD-CD reductor, utilizando una red resonante LLC con un acoplamiento inductivo. Se desarrolla el análisis matemático del circuito y se presenta una metodología de diseño muy simple para la condición de resonancia. Se realizó la simulación de un diseño de ejemplo con las siguientes especificaciones: potencia de salida 100 W, voltaje de salida 60 V, frecuencia de conmutación 480 kHz, voltaje de alimentación 180 V. Los resultados validan la metodología de diseño, logrando una eficiencia total del 92.73%.

Palabras clave: Convertidor resonante CD-CD, Resonancia eléctrica, Red resonante LLC, Resonancia en lazo abierto, Máxima transferencia de energía.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los temas de mayor importancia dentro de la electrónica de potencia es la conversión de la energía eléctrica de CD-CD. Los convertidores CD-CD son esenciales en la actualidad ya que son utilizados como fuentes de alimentación en la mayoría de los dispositivos electrónicos.

Un tipo de convertidor CD-CD son los convertidores resonantes, estos son circuitos compuestos por inductores y capacitores, los cuales son diseñados para operar a la frecuencia de resonancia, ya que en ese estado de operación las reactancias capacitivas como las inductivas se anulan y el circuito se comporta completamente resistivo, llevando así la máxima transferencia de energía desde una fuente de alimentación hasta la carga resistiva.

Los convertidores resonantes para mantener un funcionamiento eficiente, es indispensable que se mantengan en resonancia, ya que, si algún valor de inductancia, capacitancia o de frecuencia varía, el tanque resonante se saldrá de resonancia, la reactancia del circuito será diferente a cero y comenzará a limitarse la corriente y el voltaje del circuito, además, el ángulo de desfase de la corriente con respecto al voltaje de entrada será diferente de cero y comenzarán a presentarse pérdidas por conmutación en los interruptores del inversor. Un convertidor resonante fuera de resonancia tendrá una baja eficiencia.

En este trabajo se presenta un convertidor resonante compuesto por las siguientes etapas: fuente de voltaje de CD, inversor Clase D, una red resonante LLC, acoplamiento inductivo

(transformador), un rectificador puente completo y una carga resistiva. Los convertidores resonantes LLC cuentan con un transformador, por lo cual, estarán presentes las inductancias de dispersión y las inductancias magnetizantes en cada devanado. Es importante considerar las inductancias del transformador en la condición de resonancia, para evitar la presencia de reactancias en el circuito cuando esté en operación.

Los componentes en un convertidor resonante al comenzar a operar pueden presentar un aumento en su temperatura. Este aumento en la temperatura genera cambios en las inductancias y capacitancias del circuito, lo que ocasiona que el convertidor no se mantenga en resonancia. Este es un problema muy frecuente en los convertidores que manejan altas potencias, por ejemplo los convertidores en los hornos de inducción electromagnética (Durna, Yilmaz, & Ermiş, 2016; Lucía, Maussion, Dede, & Burdío, 2013; Yilmaz, Durna, & Ermiş, 2016; Yilmaz, Ermis, & Cadirci, 2012).

La literatura da solución a este problema utilizando un lazo de seguimiento de fase (*Phase Locked Loop*, PLL), en el cual se utilizan distintas técnicas de control análogas como digitales, con el objetivo de mantener al circuito siempre en resonancia (Chen, Chen, Murata, Nakahara, & Harada, 2001; Ebrahimi, Atighechi, Amiri, Jatskevich, & Cano, 2015; Kranprakon, Sangswang, & Naetiladdanon, 2016, 2017; Li, Lin, Tang, & Wang, 2018; Nguyen et al., 2015).

El objetivo de este trabajo es proponer un circuito en lazo abierto que sea capaz de mantener al convertidor resonante LLC lo más próximo a la resonancia y alcance un porcentaje

alto de eficiencia. En este documento se presenta el análisis, diseño y simulación del convertidor resonante propuesto.

2. ANÁLISIS DEL CIRCUITO

En este apartado se desarrolla el análisis del convertidor resonante LLC en lazo abierto. El circuito analizado se presenta en la Fig. 1. El análisis consiste en simplificar el circuito presentado en la Fig. 1 hasta obtener un circuito equivalente en serie, en el cual se establecerá la condición de resonancia.

En el circuito de la Fig. 1 se presenta al inductor de compensación L_a , este inductor es importante debido a que mantendrá al convertidor en resonancia aunque existan cambios pequeños en el valor de las reactancias de los componentes pasivos. El inductor L_a aporta el 90% de la reactancia inductiva que estará en resonancia con el capacitor C_p . El 10% restante de la reactancia inductiva se encuentra en: la inductancia de dispersión primaria L_{dp} y la inductancia equivalente L_{eq1} (inductancia equivalente obtenida del acoplamiento inductivo, ver Fig. 2c).

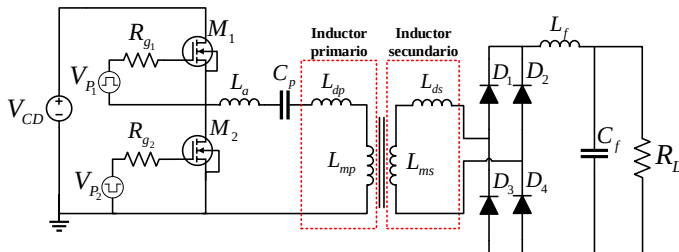


Fig. 1. Convertidor resonante LLC analizado.

1.1 Análisis del rectificador puente completo

El análisis del convertidor comenzará obteniendo la resistencia equivalente del rectificador puente completo. La ecuación para obtener la resistencia equivalente se presenta en (1).

$$R_{eq1} = \frac{8R_L \eta_{Rect}}{\pi^2} \quad (1)$$

Donde: R_{eq1} es la resistencia equivalente del rectificador puente completo; R_L es la resistencia de carga; η_{Rect} es la eficiencia del rectificador.

Para calcular la eficiencia del rectificador se utiliza la ecuación presentada en (2).

$$\eta_{Rect} = \frac{1}{1 + \frac{2V_f}{V_o}} \quad (2)$$

Donde: V_o es el voltaje de salida del rectificador; V_f es el voltaje de conducción directa del diodo.

Una vez conociendo el valor de la resistencia equivalente del rectificador, el circuito mostrado en la Fig. 1 pasará a tener la forma mostrada en la Fig. 2a.

1.2 Análisis de la red resonante

El análisis consistirá en simplificar el circuito presentado en la Fig. 2a hasta obtener un circuito serie equivalente, con el objetivo de establecer la condición de resonancia.

Se comenzará reflejando el circuito secundario de la Fig. 2a al circuito primario de la misma figura, obteniendo por resultado el circuito de la Fig. 2b.

El siguiente paso será obtener la impedancia Z_{eq} , esta impedancia es el valor equivalente del paralelo mostrado en (3). Esta impedancia al ser simplificada, el circuito de la Fig. 2b tomará la forma mostrada en el circuito de la Fig. 2c.

$$Z_{eq} = \frac{jX_{Lmp} \left(\frac{R_{eq1} + jX_{Lds}}{n^2} \right)}{jX_{Lmp} + \left(\frac{R_{eq1} + jX_{Lds}}{n^2} \right)} \quad (3)$$

Simplificando la ecuación (3), se obtiene la ecuación (4).

$$Z_{eq} = \frac{\frac{R_{eq1} X_{Lmp}^2}{n^2} + jX_{Lmp} \left[\frac{X_{Lds}}{n^2} \left(X_{Lmp} + \frac{X_{Lds}}{n^2} \right) + \left(\frac{R_{eq1}}{n^2} \right)^2 \right]}{\left(\frac{R_{eq1}}{n^2} \right)^2 + \left(X_{Lmp} + \frac{X_{Lds}}{n^2} \right)^2} \quad (4)$$

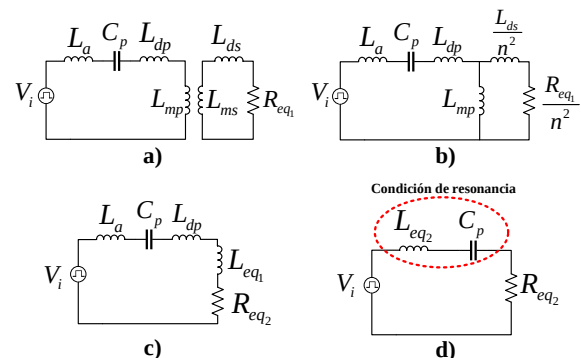


Fig. 2. Análisis para obtener la condición de resonancia del convertidor.

En (4) se observa que la ecuación se compone de dos expresiones: una expresión real que representa la resistencia equivalente real de la impedancia (R_{eq2}) mostrada en (5) y una expresión imaginaria que es positiva y representa una reactancia inductiva (X_{Leq1}) mostrada en (6).

$$R_{eq2} = \frac{\frac{R_{eq1} X_{Lmp}^2}{n^2}}{\left(\frac{R_{eq1}}{n^2} \right)^2 + \left(X_{Lmp} + \frac{X_{Lds}}{n^2} \right)^2} \quad (5)$$

$$X_{Leq1} = \frac{X_{Lmp} \left[\frac{X_{Lds}}{n^2} \left(X_{Lmp} + \frac{X_{Lds}}{n^2} \right) + \left(\frac{R_{eq1}}{n^2} \right)^2 \right]}{\left(\frac{R_{eq1}}{n^2} \right)^2 + \left(X_{Lmp} + \frac{X_{Lds}}{n^2} \right)^2} \quad (6)$$

El circuito equivalente obtenido será el mostrado en la Fig. 2c. Por último, se sumarán las tres inductancias mostradas en el circuito de la Fig. 2c, obteniendo como resultado final el circuito equivalente de la Fig. 2d, en este último circuito se establece como condición de resonancia la expresión (7).

$$X_{C_p} = X_{Leq2} \quad (7)$$

La condición de resonancia permite obtener el valor necesario de capacitancia C_p para que esté en resonancia con la inductancia equivalente L_{eq2} , anulando de esta forma las reactancias presentes en el circuito y se llevará a cabo la máxima transferencia de energía desde V_i hasta R_{eq2} . La ecuación para obtener el valor de C_p se presenta en (8).

$$C_p = \frac{1}{(2\pi f_{sw})^2 L_{eq2}} \quad (8)$$

Donde: C_p es el capacitor primario, f_{sw} es la frecuencia de conmutación, L_{eq2} es la inductancia equivalente total del circuito.

En cuanto al inductor L_a este se calcula con la ecuación mostrada en (9).

$$L_a = 10(L_{dp} + L_{eq1}) \quad (9)$$

Donde: L_a es el inductor A, L_{dp} es la inductancia de dispersión primaria, L_{eq1} es la inductancia equivalente del acoplamiento inductivo.

El inductor L_a mantendrá al circuito operando muy próximo a la resonancia a pesar de las variaciones de inductancia en el acoplamiento inductivo, estas últimas sólo aportan el 10% de la reactancia inductiva, por tanto, el margen de error que se presentará en el ángulo de desfase de la corriente será aproximadamente del 10%.

3. DISEÑO DEL CIRCUITO

Para validar las ecuaciones previamente obtenidas en este trabajo, se propone una metodología de diseño para la condición de resonancia. La Tabla 1 muestra las especificaciones de diseño del ejemplo. En la Tabla 2 se presentan las especificaciones propuestas para el transformador.

Tabla 1. Especificaciones de diseño

Parámetro	Descripción	Valor
P_o	Potencia de salida	100 W
V_o	Voltaje de salida	60 V
f_{sw}	Frecuencia de conmutación	480 kHz
f_{res}	Frecuencia de resonancia	480 kHz
V_{CD}	Voltaje de alimentación	180 V
Δ_{vo}	Rizo de voltaje de salida	1% de V_o
Δ_{io}	Rizo de corriente de salida	1% de I_o
V_f	Voltaje de conducción de diodo	1.5 V

Tabla 2. Especificaciones propuestas para el transformador

Parámetro	Descripción	Valor
n_p	Número de vueltas del devanado primario	30
L_p	Inductancia del devanado primario	80 μ H
k	Coefficiente de acoplamiento	0.99

Con la información de las Tablas 1 y 2, se procede a desarrollar la metodología de diseño, presentada en la Tabla 3.

Tabla 3. Metodología de diseño

Símbolo	Descripción	Ecuación	Valor
R_L	Resistencia de carga	$= \frac{V_o^2}{P_o}$	36 Ω
I_o	Corriente de salida	$= \frac{P_o}{V_o}$	1.666 A
C_f	Capacitor de filtrado de salida	$= \frac{1}{8f_{res}R_L}$	7.23 nF
α	Ángulo Alpha	$= \arcsen\left(\frac{V_o}{V_o + 0.5\Delta_{V_o}}\right)$	84.282°
θ	Ángulo Theta	$= (90^\circ - \alpha)\left(\frac{\pi}{180^\circ}\right)$	0.099 rad
L_f	Inductor de filtrado de salida	$= \frac{\theta R_L}{2\pi f_{sw}}$	1.191 μ H
η_{Rect}	Eficiencia del rectificador	$= \frac{1}{1 + \frac{2V_f}{V_o}}$	0.952
R_{eq1}	Resistencia equivalente del rectificador	$= \frac{8\eta_{Rect}R_L}{\pi^2}$	27.791 Ω
V_p	Voltaje del devanado primario	$= \frac{V_{CD}}{2}$	90 V
V_s	Voltaje del devanado secundario	$= V_o + 0.5\Delta_{V_o}$	60.3 V
n	Relación de número de vueltas	$= \frac{V_s}{V_p}$	0.674
n_s	Número de vueltas del devanado secundario	$= (n)(n_p)$	20
L_s	Inductancia del devanado secundario	$= (L_p)(n^2)$	36.31 μ H

L_M	Inductancia mutua	$= k\sqrt{L_p L_s}$	53.36 μH
L_{mp}	Inductancia magnetizante primaria	$= \frac{L_M n_p}{n_s}$	79.2 μH
L_{ms}	Inductancia magnetizante secundaria	$= \frac{L_M n_s}{n_p}$	35.95 μH
L_{dp}	Inductancia de dispersión primaria	$= L_p - L_{mp}$	800 nH
L_{ds}	Inductancia de dispersión secundaria	$= L_s - L_{ms}$	363.1 nH
L_a	Inductor de compensación	$= 10(L_{dp} + L_{eqi})$	63.35 μH
C_p	Capacitor primario	$= \frac{1}{(2\pi f_{res})^2 (1.1L_a)}$	1.578 nF

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Se realizó la simulación del circuito de la Fig. 1 para probar su correcto funcionamiento y para validar la metodología de diseño. Se utilizó la información obtenida en la Tabla 3 para la simulación del circuito en el programa Orcad Pspice. El diagrama del circuito simulado se presenta en la Fig. 3.

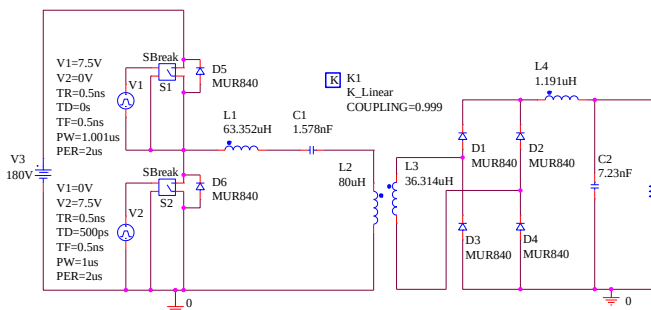


Fig. 3. Diagrama del circuito simulado en Orcad Pspice

En la Fig. 4 se presenta la gráfica del voltaje de salida del convertidor. En la Fig. 5 se presenta la gráfica de la potencia de salida del convertidor. En la Fig. 6 se presenta la gráfica de la eficiencia total del convertidor. En la gráfica de la Fig. 7 se presenta la verificación de la resonancia, donde se compara el voltaje de salida del inversor con la corriente de la red resonante.

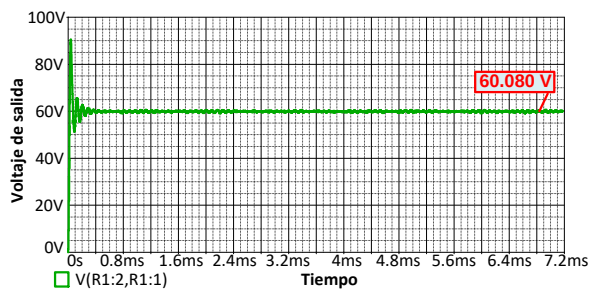


Fig. 4. Gráfica de voltaje de salida del convertidor, simulado en Orcad Pspice

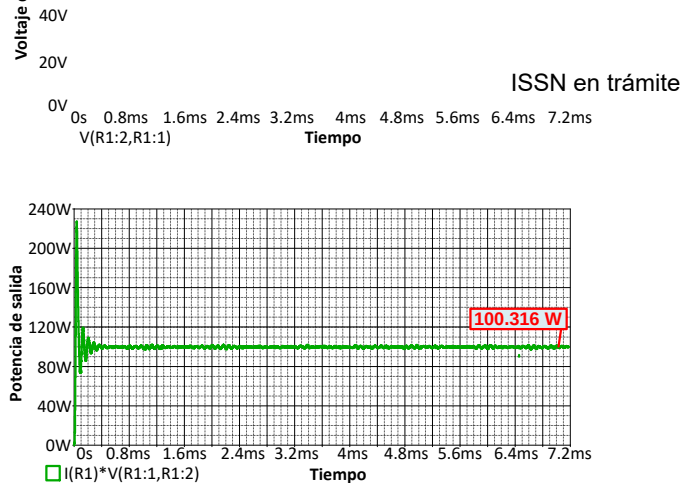


Fig. 5. Gráfica de potencia de salida del convertidor, simulado en Orcad Pspice

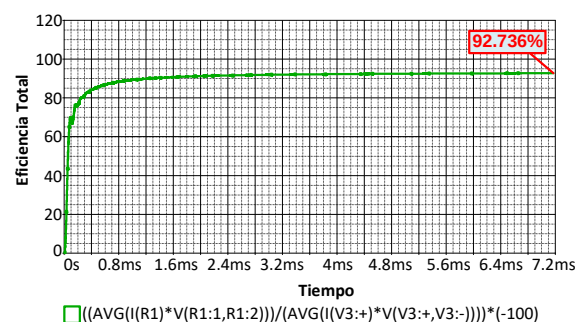


Fig. 6. Gráfica de eficiencia total del convertidor, simulado en Orcad Pspice

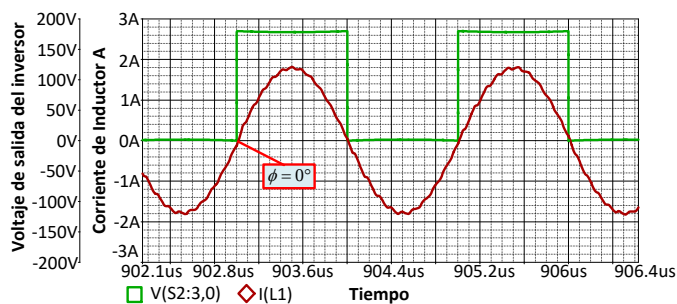


Fig. 7. Señal de corriente del inductor "A" comparada con la señal de voltaje de salida del inversor, para verificar la resonancia, simulado en Orcad Pspice

Para verificar que el inductor L_a mantiene la resonancia del circuito, se realizaron variaciones en la inductancia de los devanados del transformador, para emular las variaciones ocasionadas por la temperatura. Para ello, se utilizó el circuito realizado en Pspice mostrado en la Fig. 3, modificando los valores de los inductores L2 y L3. Los valores originales de diseño de L2 y L3 son los mostrados en la Fig. 3.

Las primeras pruebas consistieron en aumentar la inductancia de un 10% hasta un 50% del valor original de cada devanado. De la simulación se obtuvo los valores del voltaje de salida (V_o), potencia de salida (P_o), eficiencia total del convertidor (η_T) y el ángulo de desfase de la corriente (ϕ) para verificar la resonancia. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos obtenidos en las simulaciones

%	V_o	P_o	η_T	ϕ
+10%	60.125 V	100.415 W	92.734%	0.3°
+20%	60.087 V	100.407 W	92.722%	0.8°
+30%	60.182 V	100.539 W	92.745%	1.4°
+40%	60.212 V	100.707 W	92.734%	2.1°
+50%	60.142 V	100.363 W	92.762%	3.2°

Las siguientes pruebas realizadas consistieron en reducir la inductancia de un 10% hasta un 50% del valor original de cada devanado. En las simulaciones se midieron los mismos parámetros que en las pruebas anteriores. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos obtenidos en las simulaciones

%	V_o	P_o	η_T	ϕ
-10%	60.028 V	100.093 W	92.712%	-2.4°
-20%	60.016 V	100.046 W	92.680%	-4.1°
-30%	60.135 V	100.117 W	92.579%	-8.7°
-40%	60.279 V	100.248 W	92.338%	-12.6°
-50%	60.327 V	100.439 W	92.129%	-18°

Con esto se concluyen los resultados obtenidos en la simulación.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un convertidor resonante CD-CD en lazo abierto. Las conclusiones obtenidas con este análisis son las siguientes:

-La red resonante es capaz de operar muy próxima a la resonancia, debido a que el inductor L_a aporta el 90% de la reactancia inductiva. Cuando los valores de inductancia del transformador aumentan, la corriente se adelanta hasta un 2%, manteniendo la resonancia del convertidor. Cuando los valores de inductancia del transformador disminuyen, la corriente se atrasa hasta un 10%, operando dentro del margen de error esperado para la resonancia.

-Los resultados obtenidos en las simulaciones validan la metodología de diseño del convertidor resonante CD-CD, demostrando que opera de acuerdo con las especificaciones de diseño deseadas, entregando valores deseados de voltaje de salida, potencia de salida y eficiencia total, a pesar de las variaciones en la inductancia del transformador.

- La eficiencia total del convertidor se mantuvo con valores próximos al 92%, a pesar de las variaciones en la inductancia del transformador. Se comprobó que el inductor L_a es un componente clave para mantener la resonancia y la eficiencia total del convertidor CD-CD diseñado en este trabajo.

REFERENCIAS

- Chen, M.-P., Chen, J.-K., Murata, K., Nakahara, M., & Harada, K. (2001). On the switching surge in the current resonant inverter for the induction furnace application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 121(6), 658-668.
- Durna, E., Yılmaz, İ., & Ermiş, M. (2016). Suppression of time-varying interharmonics produced by medium-frequency induction melting furnaces by a HAPF system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(2), 1030-1043.
- Ebrahimi, S., Atighechi, H., Amiri, N., Jatskevich, J., & Cano, J. M. (2015). *Multi-resolution modeling of induction furnace systems with line-commutated rectifier and resonant converter*. Paper presented at the 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting.
- Kranprakon, P., Sangswang, A., & Naetiladdanon, S. (2016). *Asymmetrical duty cycle control with phase limit of LLC resonant inverter for an induction furnace*. Paper presented at the 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON).
- Kranprakon, P., Sangswang, A., & Naetiladdanon, S. (2017). *Model predictive control of LLC resonant inverter for induction furnace*. Paper presented at the 2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON).
- Li, X., Lin, P., Tang, Y., & Wang, K. (2018). *Design and performance improvement for single-voltage-loop controlled voltage-source-converters with a low ZC-resonant-frequency*. Paper presented at the 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC).
- Lucía, O., Maussion, P., Dede, E. J., & Burdío, J. M. (2013). Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 61(5), 2509-2520.
- Nguyen, B. A., Phan, Q. D., Nguyen, D. M., Nguyen, K. L., Durrieu, O., & Maussion, P. (2015). Parameter Identification Method for a Three-Phase Induction Heating System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6), 4853-4860.
- Yılmaz, İ., Durna, E., & Ermiş, M. (2016). Design and implementation of a hybrid system for the mitigation of PQ problems of medium-frequency induction steel-melting furnaces. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(3), 2700-2713.
- Yilmaz, I., Ermis, M., & Cadirci, I. (2012). Medium-frequency induction melting furnace as a load on the power system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(4), 1203-1214.

Observador adaptable para la estimación simultánea de parámetros en cultivos de microalgas

L. Velez Landa * H. R. Hernández de León *
C. M. Astorga Zaragoza ** J. R. Bermúdez Hernández *
F. R. López Estrada * M. Adam Medina **

* Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carr. Panamericana 1080, Boulevares, C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Tel: 961-615-0380; e-mail: laura.lv19@outlook.com).

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Int. Internado Palmira S/N, C.P. 62490, Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos, México.

Resumen: En este trabajo se propone el diseño de un observador adaptable no lineal para estimar la tasa de crecimiento máxima y la tasa de absorción máxima de nitrógeno, las cuales son parámetros importantes en el modelo dinámico que representa el crecimiento de microalgas cultivadas en un fotobiorreactor a temperatura e iluminación constantes y que en muchas ocasiones suelen ser desconocidas. Los resultados se validaron con datos simulados utilizando el modelo de Droop que describe la capacidad de las microalgas para almacenar nutrientes, además, del desacoplamiento entre la absorción del sustrato y el crecimiento de la biomasa. El observador propuesto resultó eficaz para estimar los dos parámetros de forma simultánea logrando la convergencia al valor verdadero en un tiempo relativamente corto.

Palabras clave: Estimación, microalgas, modelo dinámico, observador adaptable, parámetros desconocidos

1. INTRODUCCIÓN

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos que utilizan una fuente de luz, dióxido de carbono, agua y nutrientes para generar biomasa (Chen et al., 2011). En las últimas décadas, la conversión de biomasa microalgal se ha llevado a cabo para una extensa variedad de aplicaciones como la producción de pigmentos, vitaminas, cosméticos, fertilizantes, biocombustibles, alimento humano y animal, entre otras (Elrayies, 2018; Patel et al., 2017). Sin embargo, se le ha dado mayor importancia a la producción de biocombustibles como el biodiesel, bioetanol, biohidrógeno, entre otros, ya que potencialmente podrían resolver la crisis energética actual (Supramaniam et al., 2019).

Las microalgas se consideran técnicamente viables como materia prima principalmente para biodiesel puesto que, su contenido de aceite es alrededor de 20-50% en peso de masa seca (Spolaore et al., 2006), además tienen la cualidad para superar muchas limitaciones ya que, se cultivan en tierras infértiles, no causan problemas alimentarios, no necesariamente requieren el uso de agua dulce (Hanifzadeh et al., 2018) y podrían satisfacer la demanda mundial de combustibles para el transporte (Chisti, 2007;

Demirbas, 2010). A diferencia de los cultivos terrestres, las microalgas crecen de 10-50 veces más rápido (Chen et al., 2011) porque duplican su biomasa comúnmente dentro de las 24 horas, lo que conlleva a producir mayor volumen de biocombustible por hectárea (Chisti, 2007).

En este contexto, para lograr una producción continua de biomasa microalgal, prevenir interrupciones del proceso y paradas de la planta (Ali et al., 2015), el uso de técnicas de monitoreo y control es de suma importancia, pero desafortunadamente el monitoreo se ve obstaculizado por la falta de mediciones en línea (Benavides et al., 2015; Battista et al., 2011), a causa de la carencia de dispositivos apropiados, a los altos costos y la factibilidad de instalar sensores en el sistema (Ali et al., 2015). De modo que, para mitigar esta dificultad, es de gran interés el desarrollo de observadores o sensores de software robustos y confiables para estimar tanto variables de estado como parámetros que son una alternativa a las costosas sondas de hardware en línea (Benavides et al., 2015; Dochain, 2003).

En términos generales, un observador de estado asintótico, o simplemente un observador, es un sistema dinámico que proporciona una estimación asintótica del estado real o

verdadero de un sistema, a partir del conocimiento de sus entradas y salidas (Besançon, 2000). La estimación de estados y parámetros en bioprocesos es una tarea desafiante dado su comportamiento dinámico complejo y no lineal, la falta de sensores confiables, las incertidumbres del modelo, variaciones de parámetros impredecibles, entre otros factores (Battista et al., 2011; Dochain, 2003).

A menudo, los parámetros del modelo de los bioprocesos son inciertos, especialmente las tasas de crecimiento y captación específicas máximas, μ_m y ρ_m , respectivamente (Coutinho et al., 2019). Las velocidades de reacción específicas contienen información que está relacionada con la actividad metabólica. Son funciones no lineales de las concentraciones (estados) y condiciones de operación (temperatura, pH, presión, entre otras), en muchas ocasiones son inconmensurables e inciertas y, por lo tanto, de difícil acceso para controlar el proceso (Nuñez et al., 2013). El conocimiento de esta información tiene dos aplicaciones relevantes. En primer lugar, las velocidades de reacción se podrían emplear en el control de lazo cerrado para mejorar la productividad del proceso y en segundo lugar, la disponibilidad en línea de esta información durante la etapa de cultivo mejora el monitoreo del bioproceso, lo cual es primordial para mantener el control de calidad, la reproducibilidad del proceso y la detección temprana de problemas (Vojinović et al., 2006). Por otra parte, el uso de observadores para estimar en línea las tasas específicas evita el problema de la identificación del modelo al mismo tiempo que agrega información para esquemas de control en lazo cerrado y análisis del cultivo (Farza et al., 1998).

Es importante destacar, que la medición en línea de parámetros del modelo de los bioprocesos podría dar un indicio de problemas durante la etapa de cultivo y con ello, la posibilidad de realizar acciones correctivas antes de que exista una interrupción definitiva en la producción de biomasa. Por lo tanto, la contribución de este trabajo es el diseño de un observador adaptable no lineal para estimar simultáneamente la tasa de crecimiento máxima y la tasa de absorción máxima de nitrógeno, los cuales son parámetros importantes en el modelo dinámico que describe el crecimiento de microalgas cultivadas en un fotobiorreactor.

2. MODELO DINÁMICO

El modelo Droop (Droop, 1983) (1) expresa el balance de masa en un biorreactor continuo. Este conjunto de ecuaciones diferenciales se conforma de tres variables concentración de biomasa X , concentración sustrato S y cuota intracelular Q , en este caso se considera al nitrógeno como sustrato limitante, debido a que, es de particular interés cuando la biomasa microalgal se requiere para la producción de biodiésel, dado que la acumulación de lípidos dentro de las microalgas puede desencadenarse al

someterlas a estrés por el agotamiento de nitrógeno en el cultivo (Benavides et al., 2015).

$$\begin{aligned}\dot{X} &= \mu_m(1 - \frac{Q_0}{Q})X - DX \\ \dot{S} &= -\rho_m(\frac{S}{S + k_s})X - DS + DS_{in} \\ \dot{Q} &= \rho_m(\frac{S}{S + k_s}) - \mu_m(1 - \frac{Q_0}{Q})Q\end{aligned}\quad (1)$$

La tasa de dilución, D (entrada de control), es el cociente entre el flujo de entrada y el volumen del cultivo. k_s es la constante de saturación media del sustrato, ρ_m es la tasa máxima de absorción de nitrógeno, Q_0 es la cuota celular mínima identificada empíricamente por Droop, bajo la cual las microalgas ya no crecen y μ_m es la tasa de crecimiento máxima. Las suposiciones de modelado son: volumen e iluminación constantes, la temperatura se distribuye uniformemente dentro del fotobiorreactor, el pH se mantiene en 7.3, el medio de cultivo se encuentra perfectamente mezclado y limitado de nitrógeno.

El sistema (1) se reescribe de la siguiente manera (2) considerando las definiciones en variables de estado: $x_1 = X$, $x_2 = S$ y $x_3 = Q$.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \theta_1(1 - \frac{Q_0}{x_3})x_1 - ux_1 \\ \dot{x}_2 &= -\theta_2(\frac{x_2}{x_2 + k_s})x_1 - ux_2 + uS_{in} \\ \dot{x}_3 &= \theta_2(\frac{x_2}{x_2 + k_s}) - \theta_1(1 - \frac{Q_0}{x_3})x_3\end{aligned}\quad (2)$$

Donde $x \in \mathbb{R}^n$ es el estado del sistema y $u \in \mathbb{R}$ es la entrada de control del sistema. θ_1 y θ_2 son los parámetros desconocidos, la tasa de crecimiento máxima y la tasa máxima de absorción de nitrógeno, respectivamente.

En la Tabla 1 se muestran las condiciones iniciales y los parámetros utilizados en las simulaciones numéricas obtenidos del trabajo de investigación de (Benavides et al., 2015).

Tabla 1. Datos utilizados en simulación

Condiciones iniciales	
$x_1(0)$	140 mgD.W. L ⁻¹
$x_2(0)$	16.5 mgN L ⁻¹
$x_3(0)$	0.045 gN gD.W. ⁻¹
Parámetros	
θ_1	1.8102 d ⁻¹
k_s	1.7499 mgN L ⁻¹
θ_2	0.0916 gN gD.W. ⁻¹ d ⁻¹
Q_0	0.0369 mgN mgD.W. ⁻¹
S_{in}	0 L ⁻¹
u	0 L ⁻¹

3. OBSERVADOR ADAPTABLE

Un observador adaptable es un algoritmo recursivo para estimar el estado de un sistema que contiene parámetros desconocidos o para estimar conjuntamente tanto su estado como sus parámetros desconocidos, el cual se ha utilizado en diferentes aplicaciones (Astorga-Zaragoza et al., 2008). La mayoría de los diseños de observadores adaptables se basan en formas específicas de los sistemas considerados, los cuales tienen la forma (3) (Besançon, 2000):

$$\begin{aligned}\dot{y} &= \alpha(y, \zeta, u, t) + \beta(y, \zeta, u, t)\theta \\ \dot{\zeta} &= Z(y, \zeta, u, t)\end{aligned}\quad (3)$$

Donde $y \in \mathbb{R}^p$ es el vector de salida del sistema (las variables medidas), $\zeta \in \mathbb{R}^r$ es el vector de las variables no medidas, $u \in \mathbb{R}^m$ es el vector de las entradas limitadas medibles y $\theta \in \mathbb{R}^q$ es el vector de parámetros desconocidos.

Un observador adaptable para un sistema que tiene la forma (3) es dado por:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{y}} &= \alpha(y, \hat{\zeta}, u, t) + \beta(y, \hat{\zeta}, u, t)\hat{\theta} - k_y(\hat{y} - y) \\ \dot{\hat{\zeta}} &= Z(y, \hat{\zeta}, u, t) \\ \dot{\hat{\theta}} &= -k_\theta \beta^T(y, \hat{\zeta}, u, t)(\hat{y} - y)\end{aligned}\quad (4)$$

tal que para las condiciones iniciales $y(0), \zeta(0), \hat{y}(0), \hat{\zeta}(0)$ (el símbolo $\hat{\cdot}$ representa los valores estimados y el superíndice "T" denota la transpuesta de una matriz). El error de estimación $\|\hat{y}(t) - y(t)\|$ y $\|\hat{\zeta}(t) - \zeta(t)\|$ tienden asintóticamente a cero cuando t tiende al infinito, mientras que $\|\hat{\theta}(t) - \theta\|$ permanece acotado. k_y y k_θ son los parámetros de sintonización del observador. La dinámica del error de estimación está dado por $\dot{e}_y := \dot{\hat{y}} - \dot{y}$, $\dot{e}_\zeta := \dot{\hat{\zeta}} - \dot{\zeta}$; $\dot{e}_\theta := \dot{\hat{\theta}} - \dot{\theta}$ y tomando a $V_e(t, e_y, e_\zeta, e_\theta) := (\varepsilon/2)e_y^T e_y + V(t, e_\zeta) + (\varepsilon/2k_\theta)e_\theta^T e_\theta$ como una función candidata de Lyapunov para el error del sistema, entonces es fácilmente demostrable que $\dot{V}_e \leq -\varepsilon k_y \|e_y\|^2 + \varepsilon(\gamma_\alpha + \gamma_\beta)\|e_y\|\sqrt{\kappa(e_\zeta)} - \kappa(e_\zeta)$. Por lo tanto, $k_y > 0$ y $k_\theta > 0$ para garantizar que $\dot{V}_e$ sea definida negativa y con ello la convergencia del observador (Besançon, 2000).

4. PROPUESTA DEL OBSERVADOR

Para diseñar el observador adaptable no lineal, el sistema (2) debe estar en la forma (3) como se muestra en (5).

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -uy_1 \\ uy_2 + uS_{in} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_1 a \\ 0 \\ -y_3 a \end{bmatrix} \theta_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ -y_1 b \\ b \end{bmatrix} \theta_2 \quad (5)$$

$$a = (1 - \frac{Q_0}{y_3}) \quad (6)$$

$$b = (\frac{y_2}{y_2 + k_s}) \quad (7)$$

Con base en (4) se propuso el diseño del observador adaptable (8) para la estimación simultánea de la tasa de crecimiento máxima (θ_1) y la tasa de absorción máxima (θ_2). En este caso se consideró que todos los estados son medibles, por lo tanto, $\zeta = 0$. Esta consideración es porque los valores en línea que se desean obtener son de los parámetros.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{y}} &= \alpha(y, u, t) + \beta_1(y, t)\hat{\theta}_1 + \beta_2(y, t)\hat{\theta}_2 + k_y(y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{\theta}}_1 &= k_{\theta_1} \beta_1^T(y, t)(y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{\theta}}_2 &= k_{\theta_2} \beta_2^T(y, t)(y - \hat{y})\end{aligned}\quad (8)$$

5. RESULTADOS

Las simulaciones se realizaron en Matlab R2018a utilizando el método de Euler para resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales con un tiempo de muestreo de 0.001 s, para el observador adaptable se utilizaron las mismas condiciones iniciales que en el sistema, debido a que en el observador propuesto se supone que las mediciones están disponibles. La condición inicial de los parámetros a estimar fue cero. Los parámetros de sintonización del observador se eligieron de forma heurística hasta que el error de estimación se aproximó a cero, tomando los valores para $k_y = 100$, $k_{\theta_1} = 1$ y $k_{\theta_2} = 3.25 \times 10^{-4}$.

La Fig. 1 muestra la estimación de la tasa de crecimiento máxima a partir de las mediciones de las entradas y salidas del sistema utilizando un observador adaptable. Como se observa el valor estimado (línea punteada) converge al valor verdadero (línea sólida) relativamente rápido en un tiempo < 0.3 s, incluso a pesar de que la condición inicial del observador fue cero. El promedio del valor estimado de la tasa de crecimiento máxima en estado estacionario fue de 1.8102 d^{-1} , que coincide con el valor verdadero (Tabla 1).

En la Fig. 2 se muestran los valores estimados de la tasa de absorción de nitrógeno representados con línea punteada y con línea sólida el valor verdadero. Se observa que la convergencia del valor estimado de la tasa de absorción máxima al valor verdadero requiere un tiempo mayor (alrededor de 1.3 s) en comparación con la estimación de la tasa de crecimiento máxima. Este resultado podría deberse a que la reconstrucción del estado dos (la concentración de nitrógeno) no logra la convergencia al valor verdadero como en el caso de los otros dos estados, cuyos errores cuadráticos medios se presentan en la Tabla 2. El promedio del valor estimado de la tasa de absorción máxima en el estado estacionario fue de $0.0913 \text{ gN gD.W.}^{-1} \text{ d}^{-1}$ y el valor verdadero de $0.0916 \text{ gN gD.W.}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

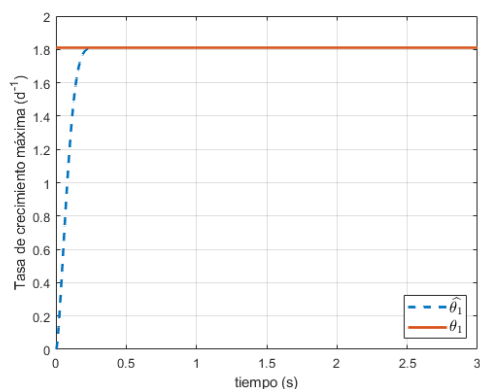


Fig. 1. Estimación de la tasa de crecimiento máxima

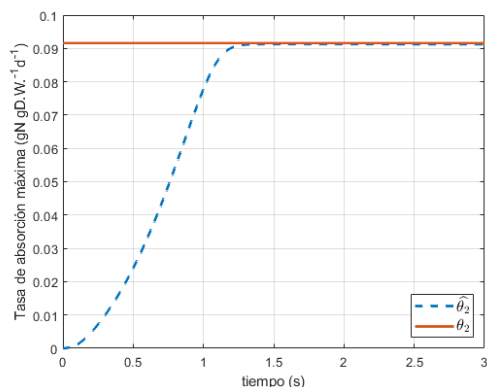


Fig. 2. Estimación de la tasa de absorción máxima

En la Fig. 3 se muestra la dinámica de la salida uno (y_1) (línea sólida) del modelo dinámico, comparada con su estimación ($\hat{y}_1$) (línea punteada). Se aprecia que el valor estimado converge rápidamente hacia el valor verdadero, a pesar de que no se conoce la tasa de crecimiento máxima.

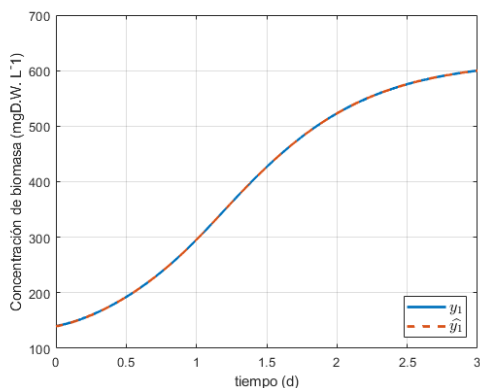


Fig. 3. Comparación entre los valores verdaderos y estimados de la concentración de biomasa

En la Fig. 4 se observa que hay una mayor repercusión en la estimación de la salida dos ($\hat{y}_2$) (línea punteada)

en comparación con la estimación de la salida tres ($\hat{y}_3$) (línea punteada) (Fig. 5), este comportamiento debido al desconocimiento de la tasa de absorción máxima. Se deduce que la estimación de la salida tres ($\hat{y}_3$) es menos afectada por la falta de información de la tasa de absorción máxima, dado que, también depende del valor estimado de la tasa de crecimiento máxima, el cual converge asintóticamente al valor verdadero (Fig. 1).

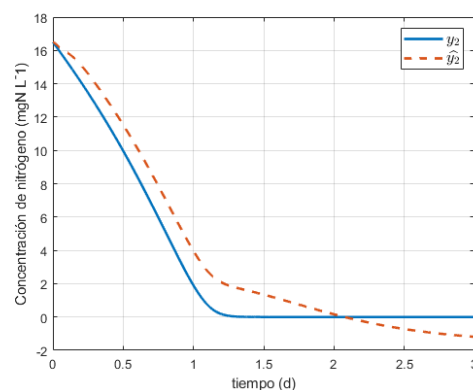


Fig. 4. Comparación entre los valores verdaderos y estimados de la concentración de nitrógeno

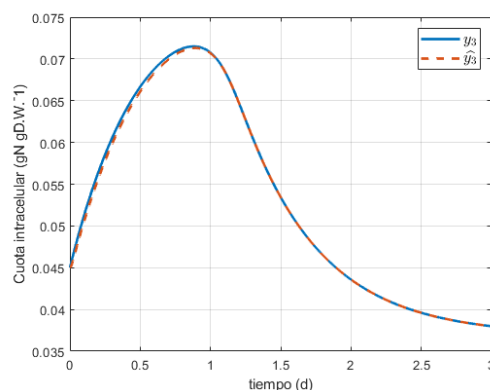


Fig. 5. Comparación entre los valores verdaderos y estimados de la cuota intracelular

Tabla 2. Error cuadrático medio de los valores estimados

Salidas del sistema	
$\hat{y}_1$	5.5×10^{-3}
$\hat{y}_2$	1.6367
$\hat{y}_3$	1.0291×10^{-7}
Parámetros	
$\hat{\theta}_1$	5.91×10^{-2}
$\hat{\theta}_2$	1.5×10^{-3}

6. CONCLUSIONES

Se presentaron los resultados del diseño de un observador adaptable no lineal para estimar de forma simultánea los

valores de la tasa de crecimiento máxima y la tasa de absorción máxima, demostrando su efectividad mediante la validación con datos simulados. El conocimiento de estos dos parámetros ofrecen la posibilidad de optimizar los cultivos de microalgas, sin embargo, éstos valores dependen de las diferentes condiciones operativas, por lo que, es necesario su actualización mediante un constante monitoreo no sólo de un parámetro, sino de varios al mismo tiempo, que a su vez, se logra con la implementación de este tipo de observadores no lineales.

REFERENCIAS

- Ali, J.M., Hoang, N.H., Hussain, M., and Dochain, D. (2015). Review and classification of recent observers applied in chemical process systems. *Computers Chemical Engineering*, 76, 27 – 41. doi:https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.01.019.
- Astorga-Zaragoza, C.M., Alvarado-Martínez, V.M., Zavala-Río, A., Méndez-Ocaña, R.M., and Guerrero-Ramírez, G.V. (2008). Observer-based monitoring of heat exchangers. *ISA Transactions*, 47(1), 15 – 24. doi:https://doi.org/10.1016/j.isatra.2007.05.003.
- Battista, H.D., Picó, J., Garelli, F., and Vignoni, A. (2011). Specific growth rate estimation in (fed-)batch bioreactors using second-order sliding observers. *Journal of Process Control*, 21(7), 1049 – 1055. doi:https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2011.05.008.
- Benavides, M., Coutinho, D., Hantson, A.L., Impe, J.V., and Wouwer, A.V. (2015). Robust luenberger observers for microalgal cultures. *Journal of Process Control*, 36, 55 – 63. doi:https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2015.09.005.
- Besançon, G. (2000). Remarks on nonlinear adaptive observer design. *Systems Control Letters*, 41(4), 271 – 280. doi:https://doi.org/10.1016/S0167-6911(00)00065-7.
- Chen, C.Y., Yeh, K.L., Aisyah, R., Lee, D.J., and Chang, J.S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*, 102(1), 71 – 81. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.159.
- Special Issue: Biofuels - II: Algal Biofuels and Microbial Fuel Cells.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294 – 306. doi:https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001.
- Coutinho, D., Vargas, A., Feudjio, C., Benavides, M., and Wouwer, A.V. (2019). A robust approach to the design of super-twisting observers – application to monitoring microalgae cultures in photo-bioreactors. *Computers Chemical Engineering*, 121, 46 – 56. doi:https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.07.006.
- Demirbas, A. (2010). Use of algae as biofuel sources. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2738 – 2749. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.010.
- Dochain, D. (2003). State and parameter estimation in chemical and biochemical processes: a tutorial. *Journal of Process Control*, 13(8), 801 – 818. doi:https://doi.org/10.1016/S0959-1524(03)00026-X.
- Droop, M. (1983). 25 years of algal growth kinetics a personal view. 26(3), 99–112. doi:10.1515/botm.1983.26.3.99.
- Elrayies, G.M. (2018). Microalgae: Prospects for greener future buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1175 – 1191. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.032.
- Farza, M., Busawon, K., and Hammouri, H. (1998). Simple nonlinear observers for on-line estimation of kinetic rates in bioreactors. *Automatica*, 34(3), 301 – 318. doi:https://doi.org/10.1016/S0005-1098(97)00166-0.
- Hanifzadeh, M., Sarrafzadeh, M.H., Nabati, Z., Tavakoli, O., and Feyzizarnagh, H. (2018). Technical, economic and energy assessment of an alternative strategy for mass production of biomass and lipid from microalgae. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 866 – 873. doi:https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.008.
- Núñez, S., Battista, H.D., Garelli, F., Vignoni, A., and Picó, J. (2013). Second-order sliding mode observer for multiple kinetic rates estimation in bioprocesses. *Control Engineering Practice*, 21(9), 1259 – 1265. doi:https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.03.003.
- Patel, A., Gami, B., Patel, P., and Patel, B. (2017). Microalgae: Antiquity to era of integrated technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 535 – 547. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.081.
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., and Isambert, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(2), 87 – 96. doi:https://doi.org/10.1263/jbb.101.87.
- Suparmaniam, U., Lam, M.K., Uemura, Y., Lim, J.W., Lee, K.T., and Shuit, S.H. (2019). Insights into the microalgae cultivation technology and harvesting process for biofuel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109361. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109361.
- Vojinović, V., Cabral, J., and Fonseca, L. (2006). Real-time bioprocess monitoring: Part i: In situ sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 114(2), 1083 – 1091. doi:https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.07.059.

Topología multipuerto basada en un convertidor Cúk bidireccional no aislado para un sistema de cosecha y almacenamiento de energía

Ing. Ivan A. Prado Jiménez* Dr. Jaime E. Arau Roffiel **
Dr. Carlos Aguilar Castillo***

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior internado Palmira S/N, Col. Palmira, CP 62490, Cuernavaca, Morelos, México

*(e-mail: ivan.prado18ee@cenidet.edu.mx)

** (e-mail: jarau@cenidet.edu.mx)

*** (e-mail: aguilar@cenidet.edu.mx)

Resumen: La tendencia hacia esquemas de generación distribuida con almacenamiento de energía como una solución a los esquemas centralizados en las redes de distribución de energía, ha introducido nuevos retos relacionados con la necesidad de optimizar la interfaz entre la fuente de energía renovable y el medio de almacenamiento de energía. En este artículo se presenta el desarrollo de una topología multipuerto basada en un convertidor Cúk bidireccional no aislado para la interconexión entre un panel o arreglo fotovoltaico, baterías y un bus de CD que forma parte de un sistema de cosecha y almacenamiento de energía. La solución propuesta permite ofrecer una novedosa topología modular que controla el flujo de energía entre los elementos de cosecha, almacenamiento de energía y el bus de CD del sistema. La topología propuesta está basada en el convertidor Cúk sin embargo dependiendo del modo de operación de la topología funciona como convertidor *Buck* o *Boost* evitando corriente pulsante en las condiciones de carga de batería y descarga del panel fotovoltaico, así como una elevada eficiencia y estructura simplificada que hace muy competitiva la topología propuesta para este tipo de aplicaciones.

Palabras clave: Convertidor multipuerto, convertidor Cúk bidireccional, PV-Batería-Bus de CD, convertidor no aislado

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, las redes de energía eléctrica alrededor del mundo están basadas en esquemas de distribución centralizados los cuales presentan retos en la búsqueda de regulación de voltaje, frecuencia, y calidad de la energía, además de mejorar la vulnerabilidad frente a fallas transitorias o totales debido a desastres naturales (Abbey et al., 2014). Por ello una de las soluciones que se plantean actualmente consiste en la transición hacia esquemas de generación distribuida con almacenamiento de energía, donde el usuario tendrá un papel más activo en la producción y gestión de la energía eléctrica por medio de la integración de fuentes renovables. El principal problema de estas fuentes de energía es la intermitencia en su generación, debido a su total dependencia a las condiciones ambientales. Un claro ejemplo de esto es la energía fotovoltaica la cual está sujeta a condiciones de sombreado parcial, ya sea por nubosidad, polvo o la sombra proyectada por otro objeto (Zhao et al., 2015). Es por ello que gran cantidad de sistemas fotovoltaicos integran dentro de su estructura baterías con el fin de mitigar los problemas de intermitencia y extender la

autonomía del usuario (Teja et al., 2016, Kishore and Bhimasingu, 2016). Otro tipo de soluciones consisten en la integración de diversas fuentes de energía que dependan de condiciones distintas, como pudiera ser la energía eólica (dependiente de la cantidad de viento) o la energía hidroeléctrica (dependiente de las corrientes de agua). Con esto se asegura una menor intermitencia ya que es difícil que se reúnan las condiciones adversas propias de cada fuente. Con base en lo anterior, la integración de distintas fuentes de energía y sistemas de almacenamiento se ha vuelto un punto focal para aumentar la resiliencia de la red eléctrica. Por ello se han propuesto diversas topologías de convertidores que permitan la integración de dichos elementos en una sola estructura. Esta clase de convertidores son conocidos como multipuerto.

1.1 Convertidores multipuerto

Los convertidores multipuerto son considerados como estructuras de potencia que permiten la integración de diversas fuentes y/o cargas permitiendo trabajar con ellas de forma simultánea o independiente. Este tipo de convertidores

usualmente poseen diversas características principales, sin embargo se clasifican principalmente por el número de entradas/salidas, el tipo de topología y conversión (ver Fig. 1). (Kishore and Bhimasingu, 2016)

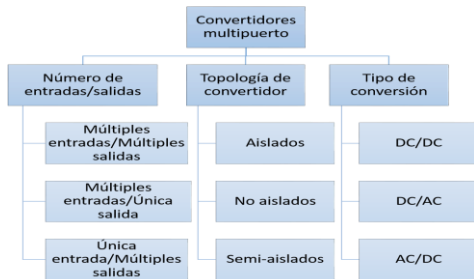


Fig. 1. Clasificación de convertidores multipuerto

2. TOPOLOGÍA PROPUESTA Y ANÁLISIS DE ESTADO ESTABLE

La topología propuesta está basada en un convertidor *Cúk* bidireccional no aislado, considerando un panel o sistema fotovoltaico (SFV) como fuente de entrada y a la salida una batería como carga. Integrando además un bus de CD por medio de un tercer puerto utilizando el capacitor de transferencia (ver Fig.2). Para su funcionamiento se consideran cuatro modos de operación, actuando como una topología diferente en cada uno. Para lograr la flexibilidad de los modos de funcionamiento se integran tres interruptores que conmutan solamente para reconfigurar la topología (ver Tabla 1).

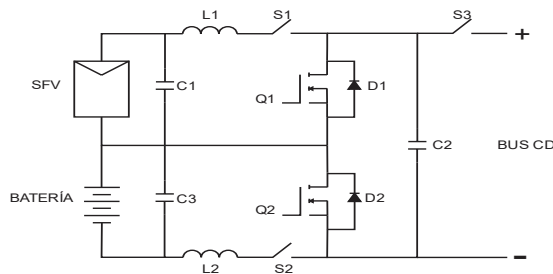


Fig. 2. Topología multipuerto propuesta

La principal ventaja de la topología es que presenta corriente no pulsante hacia o desde el panel como la batería en cualquiera de los modos de operación, lo que mejora la vida útil de dichos componentes (Serhan and Ahmed, 2018).

Tabla 1. Modos de operación

Modo de operación	Topología	Condición de potencia
Modo 1 (Panel-batería)	<i>Cúk</i>	$P_{panel} = P_{batería}$
Modo 2 (Panel-bus de CD)	<i>Boost</i>	$P_{panel} = P_{bus}$
Modo 3 (Batería-bus de CD)	<i>Boost</i>	$P_{batería} = P_{bus}$
Modo 4 (Bus de CD-batería)	<i>Buck</i>	

Para la validación de la topología se propone una potencia de 200 W, ya que el objetivo principal es verificar la viabilidad de la topología en sus diferentes modos de operación. Otros parámetros de diseño se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros generales de diseño

Parámetros generales	
Potencia	200 W
Frecuencia de conmutación	100 kHz
Voltaje en bus de CD	180 V
Voltaje en batería	48 V
Voltaje en panel (mpp)	38 V

2.1 Análisis del modo 1 (Panel-Batería)

En dicho modo se desactiva el interruptor S3, lo que desconecta el bus de CD, generando una topología *Cúk* entre panel y batería. Como dispositivos de conmutación se tiene el MOSFET Q1 y el diodo D2 (ver Fig. 3).

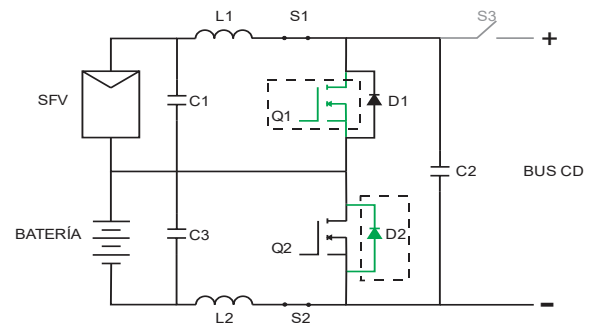


Fig. 3. Topología en modo 1 (Panel-batería)

Para este modo se calculan valores para los inductores L1 y L2 y los capacitores C2 y C3. Se considera un $\Delta i = 10\%$ y un $\Delta V = 1\%$ ya que al cargar batería el rizo de voltaje debe ser mínimo.

$$L_1 = \frac{V_t D}{\Delta i_L f_s} = \frac{(38)(0.5581)}{(0.5263)(100 \times 10^3)} = 402.96 \mu H \quad (1)$$

$$L_2 = \frac{V_o (1-D)}{\Delta i_L f_s} = \frac{(48)(1-0.5581)}{(0.4166)(100 \times 10^3)} = 509.15 \mu H \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{PD}{V_o \Delta V_c f_s} = \frac{(200)(0.5581)}{(48)(5.16)(100 \times 10^3)} = 4.50 \mu F \quad (3)$$

$$C_3 = \frac{\Delta i_{L2}}{8 \Delta V_c f_s} = \frac{0.4166}{8(0.48)(100 \times 10^3)} = 1.08 \mu F \quad (4)$$

2.2 Análisis del modo 2 (Panel-Bus de CD)

En este modo de operación el interruptor S2 se desactiva, lo que aísla la batería y genera una topología *Boost* entre panel y bus de CD. Los dispositivos que conmutan en este modo son el MOSFET Q1 y el diodo D2 (ver Fig. 4). Se considera un $\Delta i_L = 10\%$ y un $\Delta V_c = 2\%$.

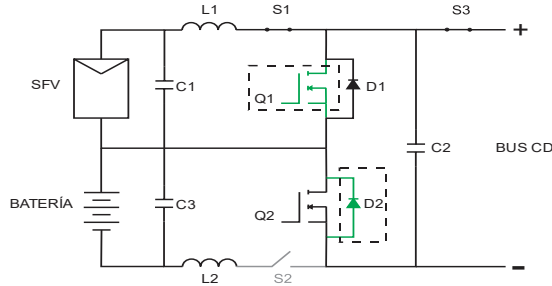


Fig. 4. Topología en modo 2 (Panel-bus de CD)

Para este modo de operación se calcula un valor de inductor para L1 y capacitor C2.

$$L_1 = \frac{V_i D}{\Delta i_L f_s} = \frac{(38)(0.7888)}{(0.5263)(100 \times 10^3)} = 569.53 \mu H \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{P D}{V_o \Delta V_c f_s} = \frac{(200)(0.7888)}{(180)(3.6)(100 \times 10^3)} = 2.43 \mu F \quad (6)$$

2.3 Análisis en modo 3 (Batería-Bus de CD)

Para este modo de funcionamiento se desactiva el interruptor S1, de tal forma que se forma una topología *Boost* en batería y bus de CD, conmutando el MOSFET Q2 y el diodo D1 (ver Fig. 5). El valor $\Delta i_L = 10\%$ y $\Delta V_c = 2\%$. En este caso se calcula un valor para el inductor L2 y capacitor C2.

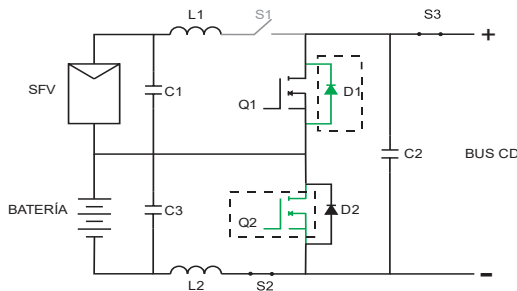


Fig. 5. Topología en modo 3 (Batería-bus de CD)

$$L_2 = \frac{V_i D}{\Delta i_L f_s} = \frac{(48)(0.7333)}{(0.416)(100 \times 10^3)} = 846.11 \mu H \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{P D}{V_o \Delta V_c f_s} = \frac{(200)(0.7333)}{(180)(3.6)(100 \times 10^3)} = 2.26 \mu F \quad (8)$$

2.4 Análisis en modo 4 (Bus de CD-Batería)

Para este modo se desactiva el interruptor S1, generando una topología *Buck* entre el bus de CD y la batería. En este modo conmutan el MOSFET Q1 y el diodo D2 (ver Fig. 6). El valor considerado para $\Delta i_L = 10\%$ y $\Delta V_c = 1\%$. En esta configuración se calculan los valores para el inductor L2 y el capacitor C3.

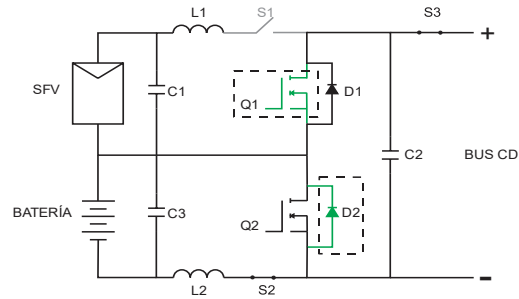


Fig. 6. Topología en modo 4 (Bus de CD-batería)

$$L_2 = \frac{V_o (1 - D)}{\Delta i_L f_s} = \frac{(48)(1 - 0.2666)}{(0.416)(100 \times 10^3)} = 846.23 \mu H \quad (9)$$

$$C_3 = \frac{\Delta i_L}{8 \Delta V_c f_s} = \frac{0.416}{8(0.48)(100 \times 10^3)} = 1.08 \mu F \quad (10)$$

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Para la selección de componentes se considera el valor crítico, ya que los componentes compartirán funciones en diferentes modos. Los componentes seleccionados para el prototipo son mostrados en la tabla 3 y el prototipo en la figura 7.

Tabla 3. Selección de componentes

Parte	Descripción	Valor/Modelo	Fabricante
L1	Inductor fijo	820 μH	Bourns
L2		1 mH	
C1	Capacitor de película de polipropileno metalizado	8.5 μF	EPCOS/TKD
C2		4.7 μF	KEMET
C3		1.8 μF	
Q1	MOSFET	C2M0080120	CREE
Q2			

D1	Diodo de conmutación	IDH16G120C5	Infineon
D2			

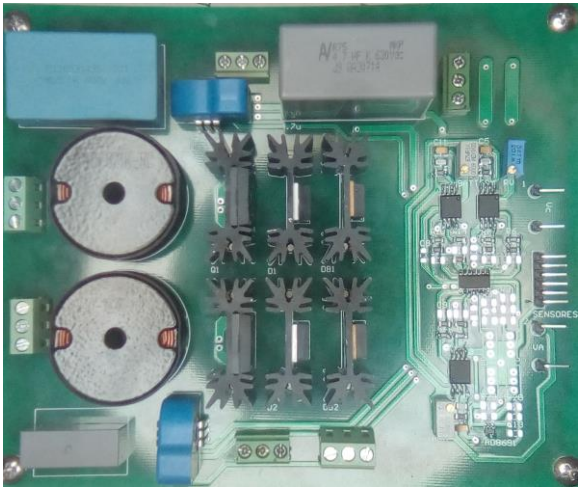


Fig. 7. Prototipo del convertidor multipuerto

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para verificar la efectividad de la topología propuesta, la simulación se realiza considerando las cuatro condiciones de funcionamiento. El objetivo principal es mostrar la corriente pulsante o no pulsante a la entrada y salida de cada modo de operación.

4.1 Modo 1 (Panel-Batería)

El primer modo opera como una topología *Cuk*. La principal ventaja de este modo es la corriente no pulsante tanto para panel como batería, lo cual es benéfico para ambos dispositivos, ya que corrientes pulsantes pueden dañar la estructura interna del panel y la química de la batería.

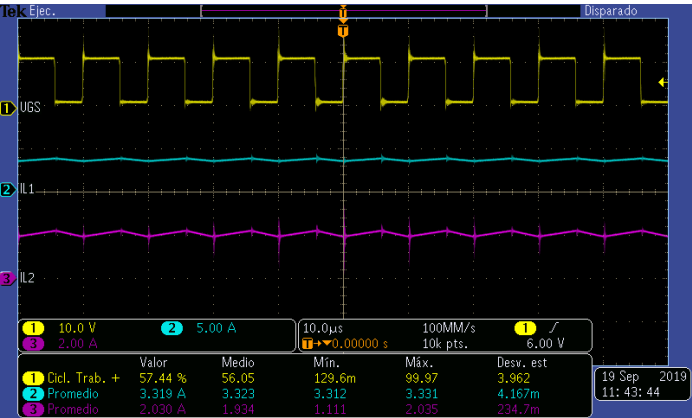


Fig. 8. Corriente de entrada (azul) y corriente de salida (morado) en el modo 1.

4.2 Modo 2 (Panel-Bus de CD)

El modo 2 opera como una topología *Boost*, por lo que la corriente de salida se comporta pulsante hacia el bus de CD. En cuanto a la corriente de entrada esta se mantiene no pulsante lo que sigue siendo benéfico para el panel.

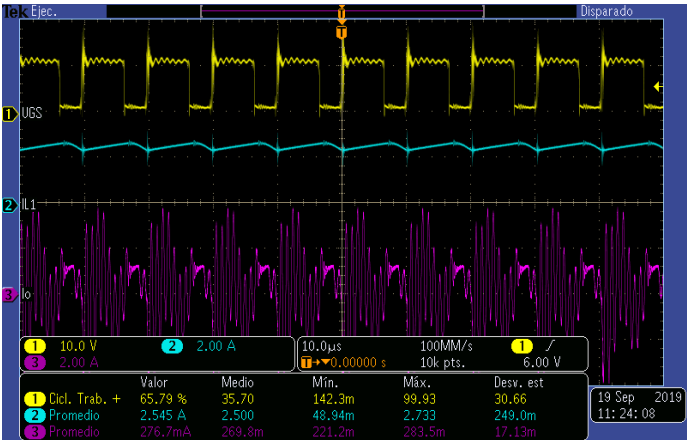


Fig. 9. Corriente de entrada (azul) y corriente de salida (morado) en el modo 2

4.3 Modo 3 (Batería-Bus de CD)

En el modo 3 se opera como una topología *Boost*. Se observa la corriente no pulsante en la batería, mientras que en la salida hacia el bus de CD se puede observar la corriente pulsante.

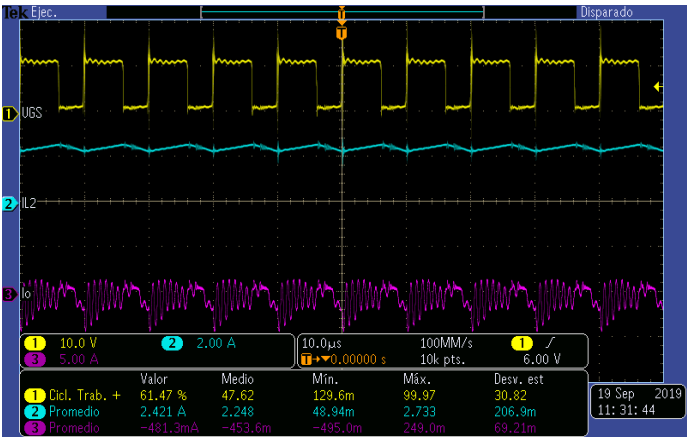


Fig. 10. Corriente de entrada (azul) y corriente de salida (morado) en el modo 3.

4.4 Modo 4 (Bus de CD-Batería)

En el modo 4 se opera como una topología *Buck* donde se muestra la corriente pulsante a la entrada para el bus de cd y no pulsante a la salida para batería, esto valida que se sigue cumpliendo con la condición que cuida la vida de la batería.

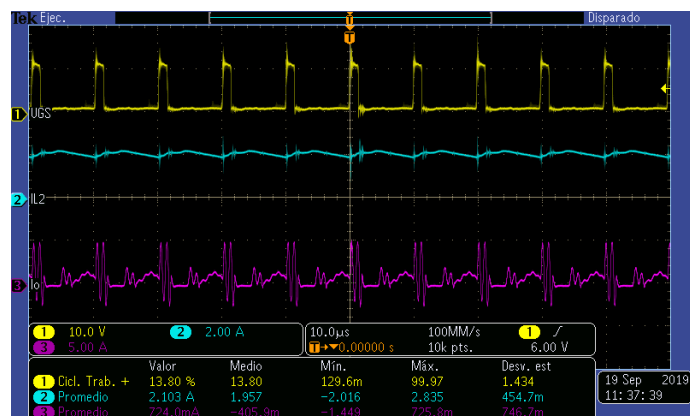


Fig. 11. Corriente de entrada (azul) y corriente de salida (morado) en el modo 4.

4.5 Comparación de eficiencia entre los diferentes modos de operación

Debido a la reconfiguración de la topología según los interruptores S1, S2 y S3, los modos de operación funcionan con diferentes componentes de la topología, lo que provoca que la eficiencia de dichos modos no sea la misma. El modo 1 (Panel-batería) presenta una eficiencia del 91.73%, muy similar a la eficiencia del modo 2 (Panel-bus de CD) que fue de 91.83%. Los modos 3 y 4 tuvieron una eficiencia del 85.96% y 87.77%. La comparación entre estas eficiencias se muestra en la figura 12.

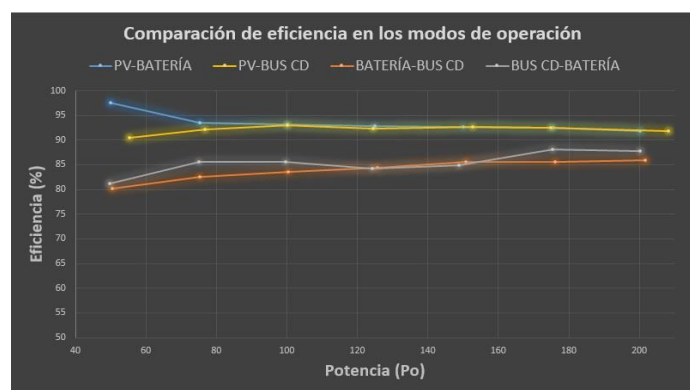


Fig. 12. Comparación de eficiencia en los diferentes modos de operación.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este artículo se logró la validación de la topología multipuerto basada en un convertidor *Cúk* bidireccional no aislado como medio de integración entre fuentes de energía y sistemas de almacenamiento, logrando así un aporte al tema de esquemas de generación distribuida. La novedosa topología modular permite ofrecer un circuito simplificado que permite el flujo de energía entre los diferentes puertos, evitando corriente pulsante en las condiciones de carga y descarga de la batería y panel fotovoltaico (en este caso, solo descarga). Se muestra también que el uso de interruptores para la reconfiguración de un circuito de potencia es una opción para lograr una mayor flexibilidad en el funcionamiento y capacidades del circuito.

Se muestra además que al implementar topologías bien conocidas (*Cúk*, *Buck* y *Boost*) se facilita la tarea de diseño para cada uno de los modos de operación y con base en los resultados experimentales y estructura simplificada se muestra como una solución competitiva. Como posible mejora podrían integrarse relevadores de estado sólido para la reconfiguración de los modos de operación, lo que permitiría una mayor velocidad de cambio entre topologías. Como trabajo futuro sería interesante la implementación a una potencia más cercana a la encontrada en esquemas de generación fotovoltaica, además de la implementación con componentes reales como arreglos fotovoltaicos y bancos de baterías.

6. REFERENCIAS

- Abbey, C., Cornforth, D., Hatziaargyriou, N., Hirose, K., Kwasinski, A., Kyriakides, E., Platt, G., Reyes, L. & Suryanarayanan, S. 2014. Powering through the storm: Microgrids operation for more efficient disaster recovery. *IEEE Power and Energy Magazine*, 12, 67-76.
- Kishore, P. M. & Bhimasingu, R. A non-isolated single stage three-port converter for hybrid microgrid applications. *Sustainable Green Buildings and Communities (SGBC)*, International Conference on, 2016. IEEE, 1-6.
- Serhan, H. A. & Ahmed, E. M. Effect of the different charging techniques on battery life-time. *Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, 2018 International Conference on, 2018. IEEE, 421-426.
- Teja, V. R., Srinivas, S. & Mishra, M. K. A three port high gain non-isolated DC-DC converter for photovoltaic applications. *Industrial Technology (ICIT)*, 2016 IEEE International Conference on, 2016. IEEE, 251-256.
- Zhao, J., Iu, H. H., Fernando, T., An, L. & Lu, D. D.-C. Design of a non-isolated single-switch three-port DC-DC converter for standalone PV-battery power system. *Circuits and Systems (ISCAS)*, 2015 IEEE International Symposium on, 2015. IEEE, 2493-2496.

Diseño de un controlador Tipo III T-S para un convertidor bidireccional en un sistema de almacenamiento de energía

J. E. Giles Vieyra*, C. Aguilar Castillo*,
C. D. Garcia-Beltran*

**Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, 62490 Cuernavaca, Mor. México. (e-mail: joan.giles18ee@cenidet.edu.mx).*

Resumen: En este artículo se comparan dos técnicas de control en un convertidor bidireccional del tipo Buck+Boost, los controladores seleccionados son, el controlador lineal Tipo III el cual es muy utilizado en este tipo de convertidores, y el segundo controlador se trata de un controlador no lineal Tipo III para un sistema Takagi-Sugeno (Tipo III T-S) el cual se diseñó mediante un esquema de compensación paralela distribuida (PDC). Los dos controladores se comparan en el convertidor bidireccional tanto en el modo Buck y como en el modo Boost. Las pruebas consisten en realizar cambios de carga con diferentes valores en el voltaje de entrada y con diferentes valores en la corriente de referencia, asimismo, todas las pruebas se realizan de manera experimental.

Keywords: Controlador lineal y no lineal, Tipo III, Takagi-Sugeno, distribución paralela compensada

1. INTRODUCCIÓN

Los convertidores bidireccionales reciben mucha atención debido a la creciente necesidad de sistemas con la capacidad de transferencia de energía bidireccional entre dos buses de CD. En algunas aplicaciones, los convertidores bidireccionales incluyen elementos de almacenamiento de energía, como pueden ser baterías o supercapacitores. Ejemplos de aplicación de los convertidores bidireccionales son: en sistemas fotovoltaicos aislado, en vehículos eléctricos o híbridos y en sistemas de redes inteligentes, solo por mencionar algunos (Ya & Wang, 2014).

Sin embargo, las características no lineales del convertidor aunado a las variaciones de la carga, las variaciones de los componentes electrónicos y las variaciones en el voltaje de entrada complican los sistemas de control. Para hacer frente a lo anterior, existen diferentes tipos de controladores los cuales solucionan estos inconvenientes. Existen muchas técnicas de control aplicadas a convertidores las cuales han sido bien estudiadas durante los últimos años. En general, las técnicas se dividen en técnicas de control lineales y técnicas de control no lineales.

El controlador lineal Proporcional Integral (PI) es el controlador más utilizado en este tipo de convertidores, y funciona bien en el caso del convertidor Buck, sin embargo no así para el caso del convertidor Boost el cual es un sistema de fase no mínima (Verma & Singh, 2013). Por otro lado, el controlador Proporcional Integral Generalizado (GPI), proporciona una buena respuesta transitoria, sin sobretiros y con una buena recuperación ante variaciones en la carga

(Zurita, 2011), sin embargo el diseño del lazo de prealimentación complica el diseño del controlador. El controlador lineal retraso-adelanto de fase (Tipo III) es el controlador más utilizado en convertidores CD-CD debido a que tiene un buen desempeño para convertidores de fase no mínima (Ghosh, 2014). Sin embargo al tratarse de un controlador lineal es bueno solo en un punto de operación.

Por su parte, el controlador no lineal Modo Deslizante (MD) es el controlador no lineal más utilizado en convertidores CD-CD, en general tiene una buena respuesta dinámica y robustez ante perturbaciones (Das & Salim, 2017), sin embargo sufre de variaciones en la frecuencia de conmutación, además, el buen desempeño del controlador depende en gran medida del grado de experiencia del diseñador. En los últimos años se han implementado controladores basados en Redes Neuronales Artificiales (ANN) obteniendo buenos resultados (Dhivya & Krishnan, 2013), sin embargo dado su estructura exigen un alto gasto computacional a la hora de ser implementadas.

Además, como parte de los controladores no lineales se han desarrollado controladores por retroalimentación de estados basados en esquemas de compensación distribuida paralela (PDC) para sistemas Takagi-Sugeno (T-S) en convertidores Boost y Buck Boost obteniendo buenos resultados (Martínez, 2014).

Es este artículo se propone un controlador Tipo III no lineal basado en un esquema PDC para un sistema T-S y se compara con su versión lineal (Tipo III). Además, la comparación de los controladores se realiza de manera experimental en un convertidor bidireccional. Las pruebas realizadas son cambios en carga, a diferentes valores de voltaje de entrada y con diferentes valores de corriente de referencia.

2. MODELO DEL CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL

El convertidor bidireccional utilizado es el convertidor Buck+Boost (ver Fig. 1), el cual funciona como un convertidor Buck en un sentido y como un convertidor Boost en el otro sentido. El control realizado en ambos convertidores es un control modo corriente promedio con el cual se mantiene el valor de una corriente de referencia. En la Tabla 1 se observan los parámetros de diseño del convertidor bidireccional.

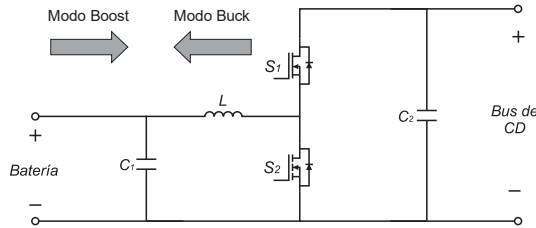


Fig. 1. Convertidor bidireccional Buck+Boost.

El modelo del convertidor bidireccional está dado por las siguientes ecuaciones; para el convertidor en modo Buck,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{R_{Buck}C_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{Bus\ de\ CD}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} d \quad (1)$$

$y = x_1$

y para el convertidor en modo Boost:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{R_{Boost}C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{x_2}{L} \\ -\frac{x_1}{C_2} \end{bmatrix} d + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{Bateria} \quad (2)$$

$y = x_1$

Tabla 1. Parámetros de diseño del convertidor bidireccional

Símbolo	Descripción	Valor
L	Inductor del convertidor bidireccional	1 mH
C_1	Capacitor en modo Buck	1 μ F
C_2	Capacitor en modo Boost	1 μ F
R_{Buck}	Carga en modo Buck	23 Ω
R_{Boost}	Carga en modo Boost	400 Ω
$V_{Bus\ de\ CD}$	Voltaje en el bus de cd	200 V
$V_{Bateria}$	Voltaje en la batería	48 V

3. CONTROLADOR TIPO III

El controlador Tipo III es un compensador retraso-adelanto de fase el cual proporciona hasta 180° de fase (Banerjee & Ghosh, 2016), la función de transferencia del controlador Tipo III es,

$$u(s) = \frac{\left(1 - \frac{s}{\omega_{z1}}\right)\left(1 - \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{\left(\frac{s}{\omega_{p1}}\right)\left(1 - \frac{s}{\omega_{p2}}\right)\left(1 - \frac{s}{\omega_{p3}}\right)} \quad (3)$$

la función cuenta con un polo en el origen, dos polos en alta frecuencia y dos ceros. El diseño de este controlador se realiza mediante diagramas de bode, y aunque en la literatura existen distintos métodos de sintonización se puede recurrir a una sintonización heurística.

3.1 Convertidor Buck

A partir de (1) se realiza la linealización mediante el método de pequeña señal obteniendo la función de transferencia que relaciona corriente en el inductor con respecto al ciclo de trabajo.

$$\frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{[C_1 R_{Buck} s + 1] V_{Bus\ de\ CD}}{L C_1 R_{Buck} s^2 + L s + R_{Buck}} \quad (4)$$

Después el controlador Tipo III se sintoniza mediante el diagrama de bode y se obtiene el siguiente controlador,

$$H(s) = \frac{94080(s + 31320)^2}{s(s + 42590)(s + 314200)} \quad (5)$$

el cual tiene un margen de ganancia infinito, un margen de fase de 66.5° y un ancho de banda de 11.1kHz en la ganancia de lazo.

3.2 Convertidor Boost

Asimismo, a partir de (2) se obtiene la función de transferencia que relaciona corriente en el inductor con respecto al ciclo de trabajo del convertidor Boost.

$$G(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{[C_2 R_{Boost} V_{Bus\ de\ CD}] s + [V_{Bus\ de\ CD} + R_{Boost} I_{Ref} (1 - D)]}{[L C_2 R_{Boost}] s^2 + [L] s + [(1 - D)^2 R_{Boost}]} \quad (6)$$

El controlador Tipo III se sintoniza mediante el diagrama de bode y se obtiene el siguiente controlador,

$$H(s) = \frac{136620(s + 7589)^2}{s(s + 5000)(s + 314200)} \quad (7)$$

el cual tiene un margen de ganancia infinito, un margen de fase de 66.3° y un ancho de banda de 13.6kHz en la ganancia de lazo.

4. CONTROLADOR TIPO III T-S

La compensación distribuida paralela (PDC) es un método atractivo debido a que tiene una estructura simple y el análisis de estabilidad se basa en los métodos de control lineal (Snejana, 2016). La estructura del PDC está determinada por el modelo

T-S de la planta y está diseñado para realizar una conmutación suave entre los controladores lineales locales.

4.1 Modelo Takagi-Sugeno (T-S)

El modelo difuso T-S se describe mediante reglas difusas del tipo SI-ENTONCES (IF-THEN), las cuales representan aproximaciones locales lineales de un sistema no lineal. La principal característica de un modelo difuso T-S consiste en expresar las dinámicas locales de cada regla a través de un subsistema lineal. La salida del modelo T-S para un sistema continuo es descrita de la siguiente forma (Martínez, 2014):

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \xi_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t))$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r \xi_i(z(t)) C_i x(t)$$

Donde r es el número de modelos locales o reglas del modelo, $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_i \in \mathbb{R}^{m \times n}$ y $C_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ son las matrices de los modelos lineales locales, $z(t)$ es la variable programable que determina que reglas están activas en cierto momento, $x(t)$ es el vector de estados, $u(t)$ es el vector de entrada, $y(t)$ es el vector de salida, y $\xi(z(t))$ las funciones de membresía normalizadas.

4.2 Modelo de compensación distribuida paralela (PDC)

Para realizar un controlador PDC, primero un sistema no lineal deberá representarse por un modelo difuso T-S. En el diseño PDC cada i -ésima regla de control se diseña a partir de la correspondiente i -ésima regla del modelo difuso T-S (De La Torre, 2013). El controlador difuso completo es dado por:

$$u(t) = - \sum_{i=1}^r \xi(z(t)) \mathcal{L}^{-1} \{ H_i(s) e(s) \}$$

donde $H_i(s)$ son los controladores lineales locales.

4.3 Convertidor Buck

A continuación se observa el procedimiento para obtener el modelo T-S por enfoque de sector no lineal para el convertidor Buck. A partir de (1) se obtiene la variable programada y el número de reglas (modelos locales).

$$z_1 = \frac{V_{Bus\ de\ CD}}{L}; \quad r = 2^1 = 2 \text{ reglas}$$

Donde los límites $\begin{bmatrix} \overline{z_1} & \underline{z_1} \end{bmatrix}$ son los siguientes:

$$z_1(t) \in [50000 \quad 250000]$$

Se obtienen las funciones de ponderación:

$$n_0^1 = \frac{\overline{z_1} - z_1(t)}{\overline{z_1} - \underline{z_1}}; \quad n_1^1 = 1 - n_0^1$$

El modelo T-S está descrito por la siguiente ecuación:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^2 \xi_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (8)$$

Donde:

$$A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_{Buck} C_1} \end{bmatrix}; \quad B_1 = \begin{bmatrix} z_1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad B_2 = \begin{bmatrix} \overline{z_1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

A partir de cada submodelo lineal se obtiene la función de transferencia que relaciona corriente en el inductor con respecto al ciclo de trabajo:

$$G_1(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{z_1 L}{R_{Buck}} \frac{C_1 R_{Buck} s + 1}{LC_1 s^2 + \frac{L}{R_{Buck}} s + 1}$$

$$G_2(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{\overline{z_1} L}{R_{Buck}} \frac{C_1 R_{Buck} s + 1}{LC_1 s^2 + \frac{L}{R_{Buck}} s + 1}$$

Después, los controladores Tipo III son sintonizados de tal forma que se obtengan márgenes de ganancia, márgenes de fase y anchos de banda similares a los del controlador Tipo III lineal para propósitos de comparación.

$$H_1(s) = \frac{209280(s+31320)^2}{s(s+40890)(s+314200)}; \quad H_2(s) = \frac{77828(s+31320)^2}{s(s+40890)(s+314200)}$$

En la Fig. 2 se observa el diagrama a bloques del controlador Tipo III T-S para el convertidor Buck

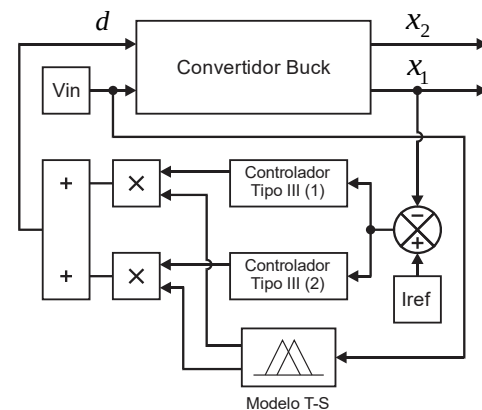


Fig. 2. Diagrama a bloques del controlador Tipo III T-S para el convertidor Buck

4.4 Convertidor Boost

A partir de (2) se obtienen las variables programadas y el número de reglas (modelos locales):

$$z_1 = \frac{x_2}{L}; \quad z_2 = -\frac{x_1}{C_2}; \quad r = 2^2 = 4 \text{ reglas}$$

Donde los límites $\begin{bmatrix} \bar{z}_1 & \underline{z}_1 \end{bmatrix}$ y $\begin{bmatrix} \bar{z}_2 & \underline{z}_2 \end{bmatrix}$ son los siguientes:

$$Z_1(t) \in [50000 \quad 250000]; \quad Z_2(t) \in [-500000 \quad -300000]$$

También se obtienen las funciones de ponderación:

$$n_0^1 = \frac{\bar{z}_1 - z_1(t)}{z_1 - \underline{z}_1}; \quad n_1^1 = 1 - n_0^1; \quad n_0^2 = \frac{\bar{z}_2 - z_2(t)}{z_2 - \underline{z}_2}; \quad n_1^2 = 1 - n_0^2$$

El modelo T-S está descrito por la siguiente ecuación:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^4 \xi_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (9)$$

Donde:

$$A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{R_{\text{Boost}} C_2} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{z_1}{z_2} \end{bmatrix}; \quad B_2 = \begin{bmatrix} \frac{z_1}{z_2} \end{bmatrix}; \quad B_3 = \begin{bmatrix} \frac{z_1}{z_2} \end{bmatrix}; \quad B_4 = \begin{bmatrix} \frac{z_1}{z_2} \end{bmatrix}$$

De igual forma, a partir de cada submodelo lineal se obtiene la función de transferencia:

$$G_1(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{L \bar{z}_1 - C_2 R_{\text{Boost}} \bar{z}_2}{R_{\text{Boost}}} \frac{\frac{C_2 R_{\text{Boost}} L \bar{z}_1}{L \bar{z}_1 + R_{\text{Boost}} C_2 \bar{z}_2} s + 1}{LC_2 s^2 + \frac{L}{R_{\text{Boost}}} s + 1}$$

$$G_2(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{L \bar{z}_1 - C_2 R_{\text{Boost}} \bar{z}_2}{R_{\text{Boost}}} \frac{\frac{C_2 R_{\text{Boost}} L \bar{z}_1}{L \bar{z}_1 + R_{\text{Boost}} C_2 \bar{z}_2} s + 1}{LC_2 s^2 + \frac{L}{R_{\text{Boost}}} s + 1}$$

$$G_3(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{L \bar{z}_1 - C_2 R_{\text{Boost}} \bar{z}_2}{R_{\text{Boost}}} \frac{\frac{C_2 R_{\text{Boost}} L \bar{z}_1}{L \bar{z}_1 + R_{\text{Boost}} C_2 \bar{z}_2} s + 1}{LC_2 s^2 + \frac{L}{R_{\text{Boost}}} s + 1}$$

$$G_4(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{L \bar{z}_1 - C_2 R_{\text{Boost}} \bar{z}_2}{R_{\text{Boost}}} \frac{\frac{C_2 R_{\text{Boost}} L \bar{z}_1}{L \bar{z}_1 + R_{\text{Boost}} C_2 \bar{z}_2} s + 1}{LC_2 s^2 + \frac{L}{R_{\text{Boost}}} s + 1}$$

Y los controladores Tipo III son sintonizados de tal forma que se obtengan márgenes de ganancia, márgenes de fase y anchos de banda similares a los del controlador Tipo III lineal para propósitos de comparación.

$$H_1(s) = \frac{133050(s+31620)^2}{s(s+65000)(s+314200)}; \quad H_2(s) = \frac{106340(s+31620)^2}{s(s+7500)(s+314200)}$$

$$H_3(s) = \frac{27614(s+31620)^2}{s(s+13860)(s+314200)}; \quad H_4(s) = \frac{29571(s+31620)^2}{s(s+3409)(s+314200)}$$

En la Fig. 3 se observa el diagrama a bloques del controlador Tipo III T-S para el convertidor Boost.

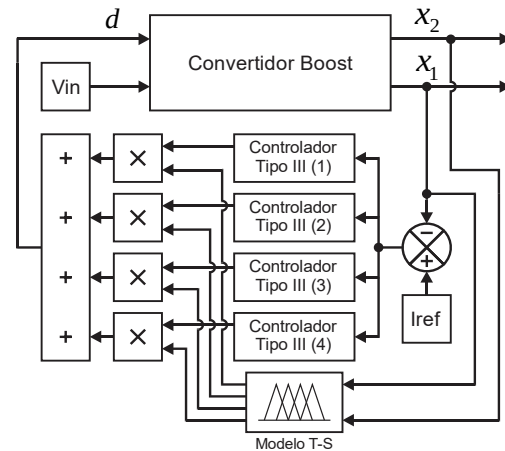


Fig. 3. Diagrama a bloques del controlador Tipo III T-S para el convertidor Boost.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las pruebas experimentales fueron realizadas con un microcontrolador *dsPIC33EP128GS808* el cual cuenta con una arquitectura de 16 bits, una velocidad de 70 MHz, siete módulos PWM a 1.04ns y cinco ADC de 12 bits a 3.5 MSPS. Además, el microcontrolador cuenta con soporte para Simulink® de MATLAB®.

Por otro lado, el ancho de banda de los convertidores en lazo abierto es de 32.6kHz en el caso del convertidor Buck y 31.9kHz en el convertidor Boost, por lo tanto se seleccionó una frecuencia de muestreo de 100kHz (frecuencia de conmutación) para la discretización de los controladores. Además, todas las operaciones matemáticas fueron realizadas en punto fijo a 16 bits para obtener el mejor desempeño de los controladores.

5.1 Pruebas en lazo cerrado en el convertidor Buck

En la Fig. 4 se observa la respuesta dinámica del convertidor Buck ante un cambio en la carga de 23Ω a 10.6Ω con un voltaje en el bus de CD de 200V y con una corriente de referencia de 2.083A, asimismo, en la figura se observa que el

controlador Tipo III tiene una sobreelongación máxima de 22.3% y un tiempo de recuperación de 115 μ s, por su parte el controlador Tipo III T-S tiene una sobreelongación máxima de 23.3% y un tiempo de recuperación de 82.5 μ s. Cabe señalar que este es el punto de operación para el controlador Tipo III.

En la Fig. 5 se observa el mismo cambio de carga pero con un voltaje de 50V y con una corriente de referencia de 1A. En la figura se observa que el controlador Tipo III tiene una sobreelongación máxima de 39.5% y un tiempo de recuperación de 236 μ s, por su parte el controlador Tipo III T-S tiene una sobreelongación máxima de 25.7% y un tiempo de recuperación de 157 μ s. En la Tabla 2 se observan los valores de sobreelongación y tiempo de recuperación de las pruebas realizadas.

5.2 Pruebas en lazo cerrado en el convertidor Boost

En la Fig. 6 se observa la respuesta dinámica del convertidor Boost ante un cambio en la carga de 400 Ω a 110 Ω con un voltaje en la batería de 48V y con una corriente de referencia de 2.083A, asimismo, en la figura se observa que el controlador Tipo III tiene una sobreelongación máxima de 16.8% y un tiempo de recuperación de 553 μ s, por su parte el controlador Tipo III T-S tiene una sobreelongación máxima de 18.7% y un tiempo de recuperación de 236 μ s. Esta condición es el punto de operación para el controlador Tipo III.

En la Fig. 7 se observa un cambio de carga de 400 Ω a 40 Ω pero con un voltaje en la batería de 20V y con una corriente de referencia de 0.5A. En la figura se observa que el controlador Tipo III tiene una sobreelongación máxima de 133% y un tiempo de recuperación de 786 μ s, por su parte el controlador Tipo III T-S tiene una sobreelongación máxima de 89.2% y un tiempo de recuperación de 435 μ s. De igual forma, en la Tabla 3 se observan los valores de sobre elongación y tiempo de recuperación de las pruebas realizadas.

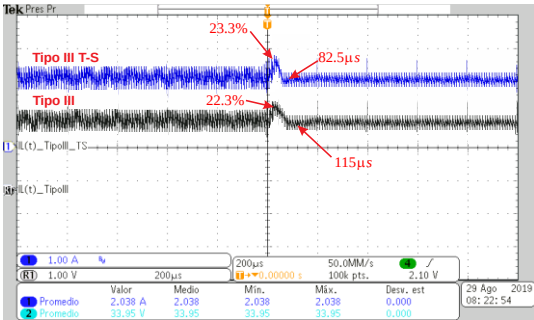


Fig. 4. Respuesta dinámica del convertidor Buck ante un cambio en la carga de 23 Ω a 10.6 Ω con 200V a 2.083A

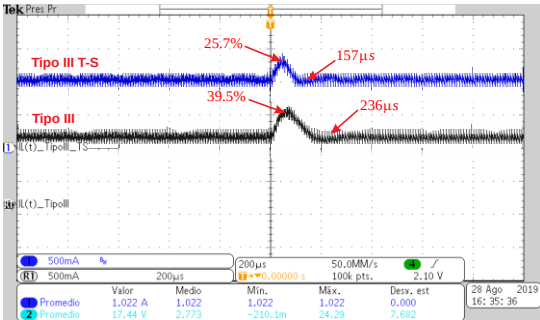


Fig. 5. Respuesta dinámica del convertidor Buck ante un cambio en la carga de 23 Ω a 10.6 Ω con 50V a 1A.

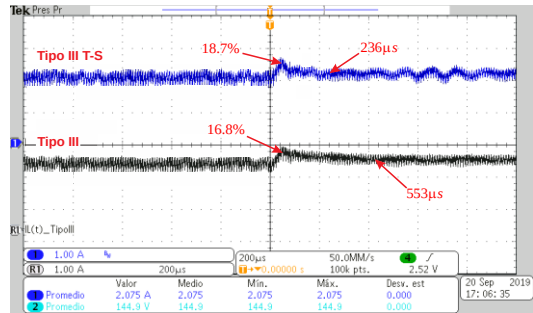


Fig. 6. Respuesta dinámica del convertidor Boost ante un cambio en la carga de 400 Ω a 110 Ω con 48V a 2.083A.

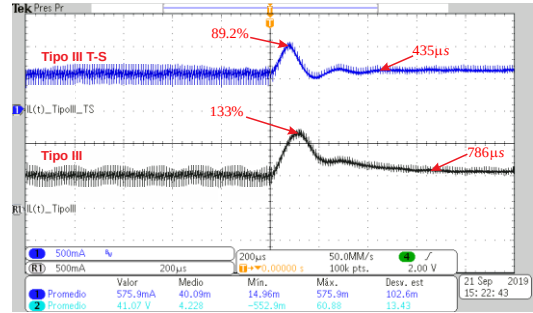


Fig. 7. Respuesta dinámica del convertidor Boost ante un cambio en la carga de 400 Ω a 40 Ω con 20V a 0.5A.

Tabla 2. Comparación de los controladores Tipo III y Tipo III T-S en el convertidor Buck.

Cambio de carga de 24 Ω a 10.9 Ω a 200V y 2.083A		
	Tipo III	Tipo III T-S
Sobreelongación máxima	22.3%	23.3%
Tiempo de recuperación	115 μ s	82.5 μ s
Cambio de carga de 24 Ω a 10.9 Ω a 50V y 1A		
Sobreelongación máxima	39.5%	25.7%
Tiempo de recuperación	236 μ s	157 μ s

Tabla 3. Comparación de los controladores Tipo III y Tipo III T-S en el convertidor Boost.

Cambio de carga de 400Ω a 110Ω a 48V y 2.083A		
	Tipo III	Tipo III T-S
Sobreelongación máxima	16.8%	18.7%
Tiempo de recuperación	553μs	236μs
Cambio de carga de 400Ω a 40Ω a 20V y 0.5A		
Sobreelongación máxima	133%	89.2%
Tiempo de recuperación	786μs	435μs

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñó un controlador Tipo III no lineal mediante la técnica de modelado T-S y se realizó la comparación con un controlador Tipo III lineal.

En el caso del convertidor Buck, los resultados muestran respuestas dinámicas parecidas entre el controlador Tipo III T-S y el controlador Tipo III en el punto de operación. Sin embargo, al modificar el punto de operación o al añadir perturbaciones en el voltaje de entrada o cambios en la carga, el controlador Tipo III T-S tiene un mejor desempeño que el controlador Tipo III. Asimismo, el controlador Tipo III T-S obtiene, con respecto al controlador Tipo III, 13.8% menos en el sobretiro y 66.5% menos en el tiempo de recuperación, en la prueba de cambio de carga de 23Ω a 10.6Ω con un voltaje en el bus de CD de 50V y con una corriente de referencia de 1A (fuera del punto de diseño del controlador Tipo III).

En el caso del convertidor Boost, el controlador Tipo III T-S muestra un mejor desempeño que el del controlador Tipo III, aún en el punto de operación del controlador Tipo III. Y al modificar el punto de operación o al añadir perturbaciones en el voltaje de entrada o cambios en la carga el controlador Tipo III T-S sigue teniendo un mejor desempeño que el controlador Tipo III. Asimismo, el controlador Tipo III T-S obtiene, con respecto al controlador Tipo III, 43.8% menos en el sobretiro y 55.34% menos en el tiempo de recuperación, en la prueba de cambio de carga de 400Ω a 40Ω con un voltaje en la batería de 20V con una corriente de referencia de 0.5A (fuera del punto de diseño del controlador Tipo III).

En cuanto a la implementación el controlador Tipo III T-S necesita de un sensor de corriente y uno de voltaje (en el bus de CD) para implementarlo, y no así el controlador Tipo III que solo necesita del sensor de corriente. Esto se ve reflejado en los costos de implementación.

Por otro lado, al implementarse de manera digital el controlador Tipo III T-S exige un mayor gasto computacional que el que exige el controlador Tipo III lineal. Para el caso del microcontrolador dsPIC33EP128GS808 el controlador Tipo III T-S utiliza 1752 bytes de memoria de programa y el controlador Tipo III 1182 bytes.

En cuanto al diseño de los controladores, ambos diseños parten de las ecuaciones promediadas no lineales del convertidor, sin embargo el diseño para el controlador Tipo III implica un proceso de linealización mediante la técnica de pequeña señal, lo cual puede resultar complicado al momento de obtener la función de transferencia. Por su parte en el controlador Tipo III T-S solo se establecen los límites de operación y mediante el número de no linealidades se establecen los submodelos lineales lo que facilita obtener las funciones de transferencia. Además, se debe tener en cuenta que en el controlador Tipo III solo se realiza una sintonización, sin embargo, en el controlador Tipo III T-S el número de sintonizaciones es igual al número de submodelos lineales (dos en el convertidor Buck y cuatro en el convertidor Boost).

REFERENCIAS

- Banerjee, S. Ghosh, A. (2016). Design and fabrication of closed loop Two-Phase Interleaved Boost Converter with Type-III controller. *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*.
- Das, S. Salim, M. (2017). Design of integral sliding mode control for DC-DC converters. *International Conference of Materials Processing and Characterization*. Vol 5.
- De La Torre, W. Llama, M. (2013). Control Difuso Takagi-Sugeno Robusto Aplicado a un Sistema Carro-Péndulo. *Congreso Nacional de Control Automático*.
- Dhivya, H. Krishnan, V. (2013). Neural network controller for boost converter. *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies*.
- Ghosh, A. Benerjee, M. K. (2014). Design of Type-III controller for dc-dc switch-mode boost converter. *Power India International Conference (PIICON)*.
- Martínez-García, C. (2014). Diseño y control de sistemas LPV tipo Takagi-Sugeno: Aplicado a un convertidor Boost. Maestría. Tesis.
- Snejana, Yordanova. (2016). A Frequency Domain Approach for Design of Stable Fuzzy Logic Systems with Parallel Distributed Compensation. *WSEAS TRANSACTIONS*. Vol 15.
- Verma, S. Singh, S. Rao, A. (2013). Overview of control Techniques for DC-DC converters. *Research Journal of Engineering Sciences ISSN*. Vol. 2278.
- Ya-Xiong, Wang. Fei-Fei, Qin. (2014). Bidirectional DC-DC Converter Design and Implementation for Lithium-ion Battery Application. *IEEE PES Asia-Pacific*.
- Zurita-Bustamante, J. Linares-Flores, E. Guzmán-Ramírez, and H. Sira-Ramírez, (2011). "A comparison between the GPI and PID controllers for the stabilization of a DC-DC "buck" converter: A field programmable gate array implementation," *IEEE Transactions on industrial electronics*. Vol. 58.

Estimación de posición ante la pérdida de señal de GPS

I. Campos-Juárez * C. D. García-Beltrán **
G. Delgado-Reyes ***

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Morelos,
C.P. 62490, México (e-mail: isael.campos18ea@cenidet.edu.mx)

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Morelos,
C.P. 62490, México (e-mail: cgarcia@cenidet.edu.mx)

*** (e-mail: gdelgador@outlook.com)

Resumen: Este trabajo propone la estimación de posición de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) ante errores de posicionamiento *jumping* y pérdida de señal en el receptor GPS, considerando el efecto del viento. La aportación de este trabajo es la incorporación de un sensor de flujo óptico en el sistema de navegación IMU/GPS usando filtros de Kalman para la estimación de posición del UAV en caso de los errores de posicionamiento mencionados en el receptor GPS. Los resultados en simulación muestran que la estrategia propuesta permite que el sistema de navegación IMU/GPS/FO sea robusto ante condiciones de viento.

Keywords: UAV, filtros de Kalman, GPS, flujo óptico, estimación de posición.

1. INTRODUCCIÓN

En la navegación aérea, terrestre y marítima es importante conocer la posición de un vehículo durante todo su recorrido. Este trabajo se enfoca en los vehículos aéreos no tripulados (UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*) los cuales se usan en la agricultura, seguridad, educación, entretenimiento e investigación Kharchenko et al. (2013).

Los UAVs cuentan con sensores para determinar su posición, siendo los más comunes el IMU (*Inertial Measurement Unit*) y el GPS (*Global Positioning System*). El sensor IMU tiene una velocidad de muestreo mayor a 100 Hz, pero presenta un error en la posición al cuadrado del tiempo. En cambio, el receptor GPS (de aquí en adelante GPS) presenta una mejor precisión comparándolo con el IMU, pero la velocidad de muestreo es lenta entre 1-10 Hz. Estos dos sensores se combinan para aprovechar las ventajas de cada uno de ellos, formándose así un sistema IMU/GPS Damerius y Jeinsch (2019). La combinación de este sistema principalmente se realiza con filtros de Kalman Kim et al. (2018).

Por otra parte, la señal de GPS está sujeta a errores de posicionamiento dependiendo del entorno en que se use. Un caso particular es el uso del GPS en lugares con demasiados edificios o árboles, lo que ocasiona su pérdida de señal. El no tener el GPS funcionando en el sistema de navegación provoca una estimación no deseada. Para mitigar este problema se proponen sistemas de visión

con cámaras Huang et al. (2018). En la mayoría de las soluciones omiten los errores de posicionamiento del GPS en exteriores, trabajando sólo en interiores o lugares cerrados, por lo que se realiza la estimación de la posición en áreas negadas de señales GPS. Otros sistemas consideran el uso de sensores LIDAR (*Light Detection and Ranging*), ultrasonidos, receptores WIFI, sistemas celestiales Gao et al. (2018).

Este trabajo propone la estimación de posición de un UAV con un sistema de visión, específicamente un sensor de flujo óptico usando filtros de Kalman lineal y extendido, considerando errores de posición en el GPS de tipo *jumping*, es decir, mediciones con errores aleatorios, y errores de tipo pérdida de señal GPS. Además, se considera el efecto de viento de tipo laminar el UAV.

2. FILTROS DE KALMAN

Los filtros de Kalman son algoritmos matemáticos recursivos que permiten atenuar ruido blanco gaussiano Kalman (1960) y, al mismo tiempo, reconstruir estados.

En los sistemas dinámicos lineales invariantes en el tiempo se usan filtros de Kalman lineales (KF, *Kalman Filter*) mientras que en sistemas dinámicos no lineales invariantes en el tiempo se utilizan filtros de Kalman extendidos (EKF, *Extended Kalman Filter*). Estos dos filtros de Kalman se explican a continuación.

2.1 Filtro de Kalman lineal

Considere el sistema dinámico lineal invariante en el tiempo referido en (1) y (2).

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k, \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k. \quad (2)$$

Donde, $k \in \mathbb{R}$ es el tiempo discreto, $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $\mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entrada, $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^p$ es el vector de observaciones o mediciones del sistema; $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de parámetros, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ es la matriz de control, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{p \times n}$ es la matriz de observaciones o mediciones. Además, $\mathbf{w}_k \in \mathbb{R}^n$ es el un vector de ruido en el sistema y $\mathbf{v}_k \in \mathbb{R}^p$ es un vector de ruido en las mediciones del sistema. Estos vectores de ruido son de media cero y covarianza $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > 0$, es decir, una matriz simétrica definida positiva que es asociada con el ruido en el sistema, por lo tanto, $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{n \times n}$; y $\mathbf{R} = \mathbf{R}^T > 0$ asociada con el ruido en la medición, por lo tanto, $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{p \times p}$.

Las ecuaciones del filtro de Kalman lineal que permiten disminuir el ruido y reconstruir estados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones del filtro de Kalman lineal.

Condiciones iniciales	
$\hat{\mathbf{x}}_0 = \mathbb{E}[\mathbf{x}_0],$	(3)
$\mathbf{P}_0 = \mathbb{E}[(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)^T].$	(4)
Predicción	
$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k,$	(5)
$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}.$	(6)
Corrección	
$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{C}^T (\mathbf{C}\mathbf{P}_k^- \mathbf{C}^T + \mathbf{R})^{-1},$	(7)
$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_k^-),$	(8)
$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C}) \mathbf{P}_k^-.$	(9)

Donde, $\hat{\mathbf{x}}_k^- \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados estimado *a priori*, $\mathbf{P}_k^- \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de covarianza del error de los estados *a priori*, $\mathbf{K}_k \in \mathbb{R}^{n \times p}$ es la matriz de la ganancia del filtro de Kalman, $\hat{\mathbf{x}}_k \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados estimado *a posteriori*, $\mathbf{P}_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de covarianza del error de los estados *a posteriori*. Además, $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz identidad.

2.2 Filtro de Kalman Extendido

Considere el sistema dinámico no lineal invariante en el tiempo referido en (10) y (11).

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k, \quad (10)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{v}_k. \quad (11)$$

Donde, $\mathbf{f}(\cdot)$ y $\mathbf{h}(\cdot)$ son funciones no lineales del sistema dinámico.

Las ecuaciones del filtro de Kalman extendido se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Ecuaciones del filtro de Kalman extendido.

Fuera de línea	
$\mathbf{A}_k = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)}{\partial \mathbf{x}} \right _{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k-1}},$	(12)
$\mathbf{H}_k = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)}{\partial \mathbf{x}} \right _{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_k^-}.$	(13)
Condiciones iniciales	
$\hat{\mathbf{x}}_0 = \mathbb{E}[\mathbf{x}_0],$	(14)
$\mathbf{P}_0 = \mathbb{E}[(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)^T].$	(15)
Predicción	
$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{u}_k),$	(16)
$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}.$	(17)
Corrección	
$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R})^{-1},$	(18)
$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^-, \mathbf{u}_k)),$	(19)
$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^-.$	(20)

Donde, las matrices jacobianas $\mathbf{A}_k$ y $\mathbf{H}_k$ son del sistema dinámico y de las mediciones que se obtienen analíticamente fuera de línea y, posteriormente, evaluadas en cada iteración del algoritmo.

3. SISTEMA DINÁMICO

El sistema dinámico empleado son las ecuaciones de navegación Outamazirt et al. (2015) que determinan la posición de un UAV. Se considera que el UAV cuenta con un controlador para seguir una referencia deseada $\mathbf{y}_d$, y, además, está sujeto a perturbaciones causados por el viendo $\mathbf{W}_v$ en las coordenadas x y y (este y norte), siendo coordenadas UTM (*Universal Transversal Mercator*). Lo anterior se representa en la Fig. 1, específicamente en el área interno. Se considera que el sistema IMU/GPS es un sistema independiente y externo del lazo de control interno, por lo tanto, la estimación $\hat{\mathbf{y}}$ no se retroalimenta.

Las ecuaciones de navegación (21) son continuas y se discretizan mediante Euler para usarse en los filtros de Kalman, además estos filtros requieren de datos provenientes de los sensores instalados en el UAV los cuales son el IMU (*Inertial Measurement Unit*), el GPS (*Global Positioning System*) y sensor de flujo óptico (FO). La integración de los sensores del UAV en el sistema de navegación se describe a continuación.

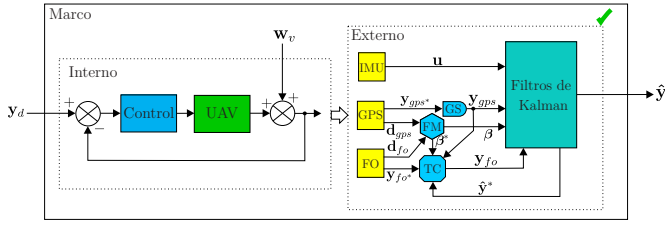


Fig. 1. Sistema propuesto para la estimación de posición.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ a_x \\ a_y \\ a_z \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi & s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi \\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi & -s\phi c\psi + c\phi s\theta s\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\psi \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi s\theta & c\phi s\theta \end{bmatrix}, \mathbf{I}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{0}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Donde, $\mathbf{x} = [x \ y \ z \ u \ v \ w \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ es el vector de estados¹; x, y y z son coordenadas en UTM, es decir, este, norte y altitud; u, v, w son velocidades traslacionales referidas al marco fijo del UAV; ϕ, θ y ψ son los ángulos de Euler, *roll*, *pitch* y *yaw*; Además, se usa la notación $c\phi = \cos \phi$, $c\psi = \sin \psi$ y así sucesivamente con las representaciones restantes.

$\mathbf{u} = [a_x \ a_y \ a_z \ p \ q \ r]^T$ es el vector de entradas en el sistema; a_x, a_y y a_z son aceleraciones lineales; p, q y r son velocidades angulares del giroscopio. Ambas obtenidas del IMU.

$\mathbf{y}_d = [x \ y \ z]^T$ o $[\lambda \ \varphi \ h]^T$ es el vector de referencia deseada; en coordenadas UTM o en coordenadas geodésicas longitud λ , latitud φ y altitud h .

$\mathbf{y}_{gps*} = [\lambda \ \varphi \ h]^T$ es el vector de mediciones del GPS en coordenadas geodésicas.

$\mathbf{y}_{gps} = [x \ y \ z]^T$ es el vector de mediciones del GPS, convertido a coordenadas UTM, la conversión se realiza en el bloque GS con las ecuaciones de Cotichia y Surace (1978).

$\mathbf{y}_{of*} = [v_x \ v_y \ h^*]^T$ es el vector de mediciones del sensor de flujo óptico FO; velocidades traslacionales en $x - y$, y una altura respecto al suelo h^* .

$\mathbf{y}_{of} = [x \ y \ h]^T$ es el vector de mediciones del sensor de flujo óptico, convertido a coordenadas UTM. En el bloque TC se realiza la conversión con la matriz $\mathbf{C}_1$, posteriormente, estas velocidades se integran y corrigen con un filtro de Kalman lineal para obtener posiciones x, y y z en UTM.

$\mathbf{d}_{gps} = [EST \ NSAT \ PDOP \ HDOP \ VDOP \ SNR]^T$, es el vector de datos del GPS; estado EST, número de satélites NSAT, PDOP (*position dilution of precision*), HDOP (*horizontal dilution of precision*), VDOP (*vertical dilution of precision*) y SNR (*signal to noise ratio*) <https://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm>.

$\mathbf{d}_{of} = [CIMG]^T$, es el vector de datos del sensor de flujo óptico; calidad de la imagen $CIMG = f(luminosidad)$, el cual presenta valores 0 – 255, un valor alto significa una calidad de imagen confiable para la estimación de posición.

$\hat{\mathbf{y}} = [\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{z}]^T$ es el vector de salidas de las posiciones estimadas con los filtros de Kalman en coordenadas UTM.

$\hat{\mathbf{y}}^* = [\hat{\phi} \ \hat{\theta} \ \hat{\psi}]^T$ es el vector de estados de los ángulos de Euler estimados.

$\boldsymbol{\beta} = [\beta_{imu} \ \beta_{gps} \ \beta_{of} \ \beta_{gpsof}]^T$ es el vector de ponderaciones que actúa en función de los datos del GPS y sensor de flujo óptico para conmutar a diferentes estimaciones en caso de presentarse falla en el sistema Korayem et al. (2018); β_{imu} es la ponderación sólo en la parte de predicción del filtro de Kalman, es decir, usando sólo la IMU; β_{gps} es la ponderación de la estimación con el GPS; β_{of} es la ponderación de la estimación con el sensor de flujo óptico; β_{gpsof} realiza la ponderación de la estimación con los sensores GPS y flujo óptico. Lo anterior se realiza en el bloque FM con (26)-(29).

Considerando el vector $\boldsymbol{\beta}$ en la parte de corrección tanto para el filtro de Kalman lineal como el filtro de Kalman extendido, resulta la siguiente variante en (24) y (25) Korayem et al. (2018).

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \beta_{imu} \hat{\mathbf{x}}_k^- + \beta_{gps} \hat{\mathbf{x}}_{k,gps} + \beta_{fo} \hat{\mathbf{x}}_{k,fo} + \beta_{gpsfo} \hat{\mathbf{x}}_{k,gpsfo}, \quad (24)$$

$$\mathbf{P}_k = \beta_{imu} \mathbf{P}_k^- + \beta_{gps} [\mathbf{P}_{k,gps} + (\hat{\mathbf{x}}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k,gps})(\hat{\mathbf{x}}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k,gps})^T] + \beta_{fo} [\mathbf{P}_{k,fo} + (\hat{\mathbf{x}}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k,fo})(\hat{\mathbf{x}}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k,fo})^T] + \beta_{gpsfo} [\mathbf{P}_{k,gpsfo} + (\hat{\mathbf{x}}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k,gpsfo})(\hat{\mathbf{x}}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k,gpsfo})^T] \quad (25)$$

Donde, $\hat{\mathbf{x}}_{k,gps}$, $\hat{\mathbf{x}}_{fo}$ y $\mathbf{P}_{k,gps}$, $\mathbf{P}_{k,fo}$ se obtienen en la parte de corrección de los filtros de Kalman. Mientras que $\hat{\mathbf{x}}_{k,gpsfo}$, $\mathbf{P}_{k,gpsfo}$ es la fusión de datos usando vectores de estados y matrices de covarianza de los dos sensores.

El vector de ponderaciones $\boldsymbol{\beta}$ se obtiene a partir de funciones de membresía considerando la información de los vectores $\mathbf{d}_{gps}$ y $\mathbf{d}_{of}$ como se muestra en (26)-(29).

¹ Simbología *cursiva* y **negrita**, ejemplo: u es estado, $\mathbf{u}$ es vector.

$$\beta_{gps} = \mu_{gps} - \mu_{gps}\mu_{fo}, \quad (26)$$

$$\beta_{fo} = \mu_{fo} - \mu_{gps}\mu_{fo}, \quad (27)$$

$$\beta_{gpsfo} = \mu_{gps}\mu_{fo}, \quad (28)$$

$$\beta_{imu} = 1 - \beta_{gps} - \beta_{fo} - \beta_{gpsfo}. \quad (29)$$

Donde, μ_{gps} es la función de membresía del GPS y μ_{fo} es la función de membresía del sensor de flujo óptico. La Fig. (2) muestra algunos casos de ponderación para la estimación dependiendo de la confiabilidad de los sensores, por ejemplo, de 0 a k la estimación sólo se realiza con la IMU, de k a $k+1$ la estimación se calcula sólo con el GPS, de $k+1$ a $k+2$ la estimación sólo se obtiene con FO, y de $k+2$ a $k+3$ la estimación se obtiene con la combinación del GPS y el FO.

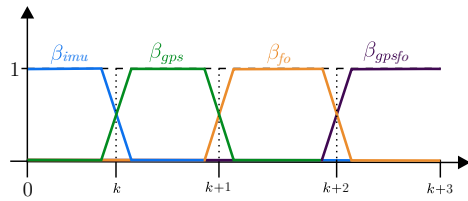


Fig. 2. Elementos del vector β .

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

4.1 Condiciones de simulación

El filtro de Kalman lineal y extendido utilizan el sistema dinámico descrito en (21) el cual se linealiza en el punto de equilibrio *hover* del UAV, es decir, $(x, y, z, \phi, \theta, \psi) = 0$ y $(a_x, a_y, a_z, p, q, r) = 0$, además se considera la medición $\mathbf{y} = [x \ y \ z]^T$ ya sea del GPS o FO. El sistema dinámico linealizado en (1) y (2) se usa en el KF mientras que las matrices jacobianas obtenidas de la linealización se utilizan en el EKF. Lo anterior, las pruebas de observabilidad realizadas tanto en el sistema lineal como en el sistema no lineal considerando las tres mediciones del vector $\mathbf{y}$, resulta un *rango* = 6, es decir, es posible estimar seis estados en el sistema dinámico.

Estableciendo propiedades estocásticas, en el sistema dinámico se presenta ruido blanco gaussiano aditivo en el vector de entradas $\mathbf{u}$, lo cual se obtiene al calcular estadísticamente las varianzas de un sensor IMU de frecuencia 100 Hz. Por lo tanto, las propiedades de ruido en el sistema se representa en (30).

$$\mathbf{Q} = \text{diag}([0 \ 0 \ 0 \ 5e^{-5} \ 4.5e^{-5} \ 8e^{-5} \ 5e^{-7} \ 4.5e^{-7} \ 4e^{-7}]). \quad (30)$$

Las mediciones del GPS son a 1 Hz y están sujetas a ruido blanco gaussiano con características que dependen del producto de UERE (*User-Equivalent Range Error*) Shuai et al. (2019) y el máximo permisible por el DOP, esto se representa en (31).

$$\mathbf{R}_{gps} = \begin{bmatrix} 36 & 0 & 0 \\ 0 & 36 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Mientras que las mediciones realizadas con el sensor de flujo óptico son a 100 Hz y presentan ruido blanco gaussiano con las siguientes características en (32).

$$\mathbf{R}_{fo} = \begin{bmatrix} 3e^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 3e^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 1e^{-1} \end{bmatrix}. \quad (32)$$

La trayectoria deseada $\mathbf{y}_d$ por el UAV está establecida por puntos específicos $P_0 - P_5$ en coordenadas geodésicas que posteriormente son convertidas a coordenadas UTM para su procesamiento, este recorrido se realiza en un tiempo $t = 340s$. Además, la altitud se considera constante $h = 4$, siendo la referencia el suelo, con esta consideración el sensor de flujo óptico está disponible en todo el recorrido.

Por otra parte, el GPS se simula considerando cuatro errores de posicionamiento. El primer error representa *jumping* en la coordenada y en el intervalo $80 \leq t < 90$, resultando $NSAT = 5$ y $HDOP = 15$. El segundo Error es otro *jumping* afectando la misma coordenada y en $110 \leq t < 120$, resultando $NSAT = 3$ y $HDOP = 15$. El tercer error *jumping* en las coordenadas $x - y$ en $150 \leq t < 170$, siendo $NSAT = 3$ y $HDOP = 15$. El última error es la pérdida de señal GPS en el tiempo $190 \leq t < 210$ con $EST = 0$, es decir, un valor inactivo. Caso contrario significa que el GPS funciona adecuadamente con $EST = 1$, $NSAT = 8$, $PDOP = 1$, $HDOP = 0.9$, $VDOP = 1.44$, $SNR = 30$.

Para la toma de decisiones en caso de errores de posicionamiento en los sensores se consideran las siguientes funciones de membresía. En el GPS se realiza $\mu_{gps} = \mu_{gps1}\mu_{gps2}\mu_{gps3}\mu_{gps4}\mu_{gps5}\mu_{gps6}$.

Donde,

$$\mu_{gps1} = \text{escalón}(EST, [0 \ 1]), \quad (33)$$

$$\mu_{gps2} = \text{trapezoidal}(NSAT, [0 \ 4 \ 30 \ 30]), \quad (34)$$

$$\mu_{gps3} = \text{trapezoidal}(PDOP, [0 \ 0 \ 5 \ 10]), \quad (35)$$

$$\mu_{gps4} = \text{trapezoidal}(HDOP, [0 \ 0 \ 5 \ 10]), \quad (36)$$

$$\mu_{gps5} = \text{trapezoidal}(VDOP, [0 \ 0 \ 5 \ 10]), \quad (37)$$

$$\mu_{gps6} = \text{trapezoidal}(SNR, [0 \ 25 \ 99 \ 99]). \quad (38)$$

Suponiendo que $\mu_{of} = 1$, es decir, $\mu_{of} = f(CIMG) = f(255)$ las mediciones del sensor de flujo óptico son confiables en toda la trayectoria.

Por último, el sistema dinámico presenta dos perturbaciones generadas por viento Langelaan et al. (2011). El primero en la coordenada x en $120 \leq t < 150$ y el segundo en la coordenada y en $220 \leq t < 250$, con una amplitud máxima de 1 m/s en ambos casos.

4.2 Resultados

La Tabla 3 muestra resultados de cuatro escenarios de estimación de posición en simulación. En el primer escenario se hace la consideración que el GPS trabaja de forma adecuada sin tener presente la existencia de viento. El segundo escenario considera errores de posicionamiento en el GPS, y sin tener presente el viento. En tercer escenario se realiza la consideración de errores de posicionamiento en el GPS y el efecto del viento. Los resultados muestran que la implementación del sensor de flujo óptico permite la estimación de la posición ante condiciones de viento laminar, siendo una característica de robustez.

Tabla 3. Errores cuadráticos medios (ECM)

		KF		EKF	
		sin FO	con FO	sin FO	con FO
GPS	este	0.09	0.09	0.09	0.09
	norte	0.27	0.30	0.32	0.40
	altitud	$2.1838e^{-4}$	$2.2867e^{-4}$	$3.8248e^{-4}$	$2.5199e^{-4}$
error de posición GPS	este	0.09	0.09	0.09	0.09
	norte	2.27	0.30	0.32	0.40
	altitud	$2.4029e^{-4}$	$2.2957e^{-4}$	$5.4979e^{-4}$	$2.5305e^{-4}$
error de posición GPS y viento	este	50.99	0.10	50.09	0.09
	norte	39.09	0.32	119.05	3.28
	altitud	$2.3910e^{-4}$	$0.2975e^{-4}$	$4.8851e^{-4}$	$3.2740e^{-4}$

Nota. FO - Flujo Óptico

La Fig. (3) muestra el recorrido que realiza el UAV sin el sensor de flujo óptico por los puntos $P_0 - P_4$. Mientras que la Fig. (4) muestra el mismo recorrido considerando el sensor de flujo óptico. Ambas gráficas muestran fallas en el GPS y consideran el efecto del viento V_1 y V_2 . Los dos primeros errores de posicionamiento se aprecian en J_1 y J_2 , el tercer error en J_3 , y la pérdida de señal de GPS en P_4 . En la Fig. (4) se observa la mejora en el sistema de navegación IMU/GPS usando el sensor de flujo óptico en los dos filtros de Kalman.

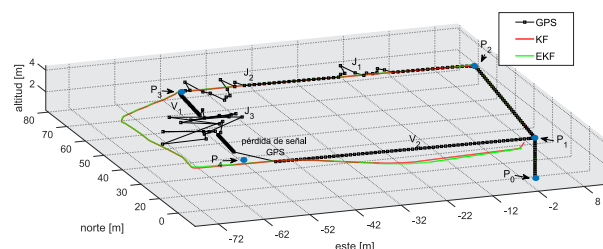


Fig. 3. Navegación IMU/GPS con efecto del viento.

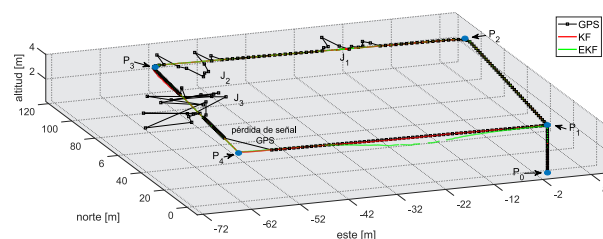


Fig. 4. Navegación IMU/GPS/FO ante viento.

5. CONCLUSIONES

La propuesta de implementación del sensor de flujo óptico en el sistema IMU/GPS con filtros de Kalman lineal y extendido permite ser robusto ante condiciones de viento, mientras que en condiciones normales ambos filtros presentan resultados similares al usar o no el sensor de flujo óptico. En trabajos futuros esta propuesta se busca llevar a la implementación en un prototipo de un UAV para obtener una estimación confiable ante errores de posicionamiento presentes en el GPS.

REFERENCIAS

- Coticchia y Surace (1978). Risoluzione di problemi geodetici con le minicalcolatrici elettroiche programmabili. *Bolletino di geodesia e scienze affini; Istituto Geografico Militare, Firenze Italia*, 37(1), 108–136.
- Damerius y Jeinsch (2019). A generic inertial navigation system. In *International Interdisciplinary PhD Workshop*, 1 – 6.
- Gao, B., Gao, S., Hu, G., Zhong, Y., and Gu, C. (2018). Maximum likelihood principle and moving horizon estimation based adaptive unscented kalman filter. *Aerospace Science and Technology*, 73, 184 – 196.
- Huang, L., Song, J., Zhang, C., and Cai, G. (2018). Design and performance analysis of landmark-based ins/vision navigation system for uav. *Optik*, 172, 484 – 493.
- Kalman, R.E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 82, 35–45.
- Kharchenko, V., Kondratyuk, V., Ilnytska, S., Kutsenko, O., and Larin, V. (2013). Urgent problems of uav navigation system development and practical implementation. In *2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)*, 157–160.
- Kim, Y., An, J., and Lee, J. (2018). Robust navigational system for a transporter using gps/ins fusion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(4), 3346–3354.
- Korayem, M., Yousefzadeh, M., and Kian, S. (2018). Precise end-effector pose estimation in spatial cable-driven parallel robots with elastic cables using a data fusion method. *Measurement*, 130, 177 – 190.
- Langelaan, J., Alley, N., and Neidhoefer, J. (2011). Wind field estimation for small unmanned aerial vehicles. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 34, 1016–1030. doi:10.2514/1.52532.
- Outamazirt, F., Yan, L., Li, F., and Nemra, A. (2015). Solving the uav localization problem using a smooth variable structure filtering. In *2015 IEEE Aerospace Conference*, 1–12.
- Shuai, W., Xing, Q., Li, X., Xing, Y., and Cai, X. (2019). An improved marine multi-constellation pseudorange single-point positioning algorithm. In *2019 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Paris)*, 1–6.

Diseño Óptimo de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos Considerando el Perfil de Misión

P. Quijano Hau *, J. H. Calleja Hjumlich*, J. Aguayo Alquicira*

**Centro Nacional de Investigación y desarrollo Tecnológico, Cuernavaca Morelos, México.
(e-mail: patricia. quijano18ee@ cenidet.edu.mx, hcalleja@cenidet.edu.mx, jaguayo@cenidet.edu.mx).*

Resumen: En este trabajo se presenta un método para diseñar de forma óptima un sistema fotovoltaico autónomo (SFVA), que se usará para iluminar un paradero de autobuses en las horas de oscuridad, tomando energía únicamente de módulos fotovoltaicos durante las horas de luz y considerando el perfil de misión del sitio de instalación. El diseño óptimo involucra todos los componentes del sistema: módulo FV, convertidor de potencia, batería y régimen de carga. La obtención del perfil de misión es de gran importancia, ya que de él se obtiene información relevante para dimensionar el diseño del convertidor de potencia. Se presenta la obtención del perfil de misión de campo real correspondiente a Guadalajara, Jal. Para el dimensionamiento de la carga (lámparas de tecnología LED) se tomaron en cuenta las normas oficiales de iluminación.

Palabras clave: Diseño óptimo, Perfil de misión, Sistema fotovoltaico autónomo, Seguimiento del punto de máxima potencia (SPMP), Convertidor de potencia.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de la energía eléctrica es un factor importante para el desarrollo de las poblaciones, pues les permite acceder a los servicios esenciales que mejoran el bienestar. Conforme las poblaciones incrementan su nivel de desarrollo, aumenta también la demanda de energía eléctrica, la que es difícil de satisfacer solo con fuentes de energía convencionales; además, éstas fuentes dependen en gran medida de combustibles fósiles, los cuales provocan un impacto negativo en la atmósfera (Mehdi and Slim, 2017), causando ruptura en el equilibrio ambiental. Debido a estos factores surge la necesidad de fomentar el uso y desarrollo de energías alternativas, conocidas como energías renovables. Una de estas fuentes de energía renovable es la solar.

El sol emite cerca de 3.8×10^{23} kW, de los cuales aproximadamente 1.8×10^{14} kW son interceptados por nuestro planeta; esto se debe a que la radiación solar se pierde debido a la dispersión, la reflexión y la absorción por las nubes (Kannan and Vakeesan, 2016). La demanda global de energía puede ser satisfecha por el sol; además, su utilización no tiene algún impacto perjudicial para el medio ambiente. La energía solar aprovecha el poder del sol para generar electricidad, directamente a través de células fotovoltaicas. El avance tecnológico en el desarrollo de celdas solares cada vez más eficientes ha contribuido a que se promueva su uso, haciéndolos atractivos para aplicaciones autónomas o para electrificar zonas aisladas de la red de distribución.

En la actualidad, uno de los grandes retos de la energía solar fotovoltaica es lograr que los sistemas sean efectivos y

confiables a largo plazo, lo cual se puede lograr mediante un diseño óptimo del sistema fotovoltaico (SFV). Entre los parámetros que en la actualidad se toman en cuenta para el diseño de los SFV se incluyen la eficiencia energética, la confiabilidad, el costo, el volumen, la eficiencia ponderada y el costo normalizado de la energía (LCOE)(Lizárraga Lizarraga, 2018).

El costo normalizado de la energía (LCOE) de los SFV depende en gran medida del convertidor de potencia, no solo por los costos de instalación, sino también por el procesamiento de energía durante todo el año en diversas condiciones ambientales.

La eficiencia y la fiabilidad del convertidor de potencia son elementos clave para ampliar la capacidad instalada de energía fotovoltaica y deben tenerse en cuenta en la estimación de la energía solar disponible y en las fases de diseño. Por lo tanto, para maximizar el rendimiento energético, se debe diseñar y dimensionar un convertidor de potencia de acuerdo con las características del SFV y su perfil de misión. La potencia instantánea suministrada por las plantas de energía fotovoltaica depende de varios factores, como la irradiancia solar, la temperatura ambiente, etc. (Lenz, Sartori and Pinheiro, 2017)

2. SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO ORIENTADO A ILUMINACIÓN

La generación de energía eléctrica mediante SFVA no era muy atractiva hasta hace unas décadas, debido a los costos elevados; sin embargo, en la actualidad estos costos han disminuido y a los SFVA se les puede encontrar en diversas aplicaciones, una de ellas de gran relevancia es la iluminación.

En la Figura 1 se muestra el diagrama a bloques propuesto en este trabajo: consta de módulo FV, convertidor CD-CD, controlador de carga basado en SPMP, batería, convertidor CD-CD y lámpara LED.

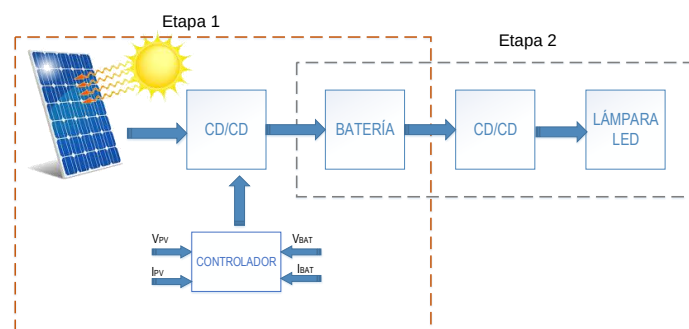


Figura 1. Diagrama a bloques del SFV

El SFV opera de la siguiente forma:

Durante las horas de sol, el convertidor de la etapa 1 se ocupará de cargar la batería con la energía disponible del módulo FV, el cual debe operar en el punto de máxima potencia (PMP), con el fin de extraer la máxima energía del módulo FV para cargar la batería. En esta primera etapa la carga (lámpara LED) estará apagada. Luego durante las horas de oscuridad, el convertidor de la etapa 2 se encargará de extraer la energía de la batería para alimentar a la lámpara.

2.1 Dimensionamiento de la carga (lámpara LED)

Las lámparas LED presentan grandes ventajas con respecto a otras tecnologías. Es por ello que en la actualidad se usan ampliamente en aplicaciones de iluminación (Mardikaningsih *et al.*, 2017).

A fin de determinar la iluminación correcta, se recurrió primero a las normas de mobiliario urbano de SEDESOL para dimensionar el tamaño del paradero, resultando éste con una superficie de 7.35 m². Seguidamente se aplicó el método del lumen para obtener la cantidad de flujo luminoso requerido, considerando un nivel de iluminación media de 25 lx según la Norma oficial Mexicana, NOM-013-ENER. En la Tabla 1 se muestran las especificaciones de la lámpara LED obtenidos con el método del lumen.

Tabla 1. Especificaciones de la lámpara LED

Alimentación:	23-42 VCD,300mA
Potencia	12W
Flujo Luminoso	525lm

2.2 Dimensionamiento de la batería

Para esta aplicación se emplea una batería tipo ciclo profundo, ya que estas son ideales para aplicaciones fotovoltaicas. Para determinar la capacidad de la batería se tomaron en cuenta las noches más largas del año (con una duración de hasta 14 horas). Para no deteriorar la batería, se consideró emplearla a un 95% y 5% en niveles de carga y descarga, dando así una autonomía útil del 90% (Mehdi *et al.*, 2017). En la Tabla 2 se muestra la capacidad máxima de la batería para la aplicación.

Tabla 2. Capacidad máxima de la batería

Potencia (W)	Autonomía útil (%)	Autonomía (h)	Capacidad máxima (Wh)
12	90	14	187

En la Tabla 3 se muestran las características de la batería utilizada para la aplicación.

Tabla 3. Batería modelo SBS30 powersafe

Voltaje nominal:	12 V
Capacidad nominal	26 Ah
Capacidad máxima	312 Wh
Corriente de corto circuito	1556 A
Resistencia interna	7.90 mΩ

2.3 Dimensionamiento del convertidor CD-CD de la etapa 2

Conociendo los valores de voltaje en la batería y en la carga, se seleccionó el convertidor CD-CD elevador de tensión tipo boost. En la Figura 2 y en la Tabla 4 se muestran el diagrama eléctrico del convertidor Boost y los valores propuestos para su diseño.

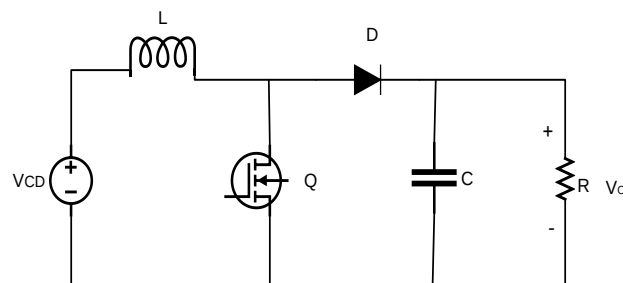


Figura 2. Diagrama eléctrico del convertidor Boost

Tabla 4. Parámetros de diseño del convertidor Boost

Parámetro	Valor
Voltaje de entrada V_i	12 V
Voltaje de salida V_o	42 V
Potencia de salida P	12 W
Frecuencia de operación f_{sw}	75 kHz
Rizo de Corriente Δi_L	4% (0.114 A)
Rizo de voltaje ΔV_c	2% (0.816 V)

Para obtener los valores de la ganancia, el ciclo de trabajo, la inductancia y la capacitancia, el convertidor se analiza en modo de conducción continua. En la Tabla 5 se muestran los valores calculados para los componentes del convertidor *boost*.

Tabla 5. Valores calculados para los componentes del convertidor Boost

Parámetro	Valor
Ganancia M	3.5
Ciclo de trabajo D	0.714
Inductor L	1 mH
Capacitor C	10 μ F
Resistencia de carga R	147 Ω

3. PERFIL DE MISION

El perfil de misión puede definirse como una representación simplificada de las condiciones a las cuales se expondrá un componente electrónico en todas sus aplicaciones previstas durante todo el ciclo de vida. Para determinar el perfil de misión de un lugar específico se requiere de la disponibilidad de al menos un año de mediciones continuas de irradiancia, temperatura, y humedad (De Leon-Aldaco, Calleja and Aguayo Alquicira, 2015).

Los datos para la generación del perfil de misión de Colomos Guadalajara se obtuvieron del Proyecto FORDECYT 190603. Los datos corresponden a un conjunto de muestras de dos variables: irradiancia y temperatura, las cuales se tomaron cada 10 minutos durante un año, haciendo un total de 52,560 muestras. Las muestras se utilizaron para estimar el comportamiento de la producción de energía del SFV durante el año. Se utilizó el método predictivo PVFORM para modelar la potencia máxima generada a partir de las características del módulo FV (Lizárraga Lizarraga, 2018). Según el modelo PVFORM, la potencia máxima se obtiene a partir de la ecuación (1).

$$P_m = \frac{E_e}{E_0} P_{m_0} [1 + \gamma(T - T_0)] \quad (1)$$

Donde P_{m_0} es la potencia nominal del módulo bajo las condiciones estándar de prueba E_0 y T_0 (1000 W/m² y 25°C,

respectivamente). E_e es la radiación medida en el sitio, γ es el factor de corrección de temperatura para la máxima potencia, T es la temperatura del módulo en el sitio de instalación. En las Figura 3 y Figura 4 se muestran el comportamiento de la irradiancia y la temperatura de un día.

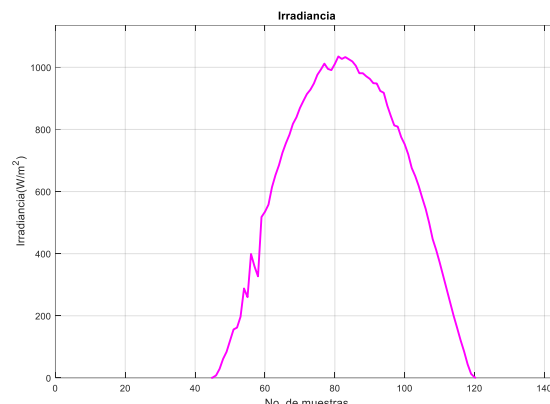


Figura 3. Irradiancia

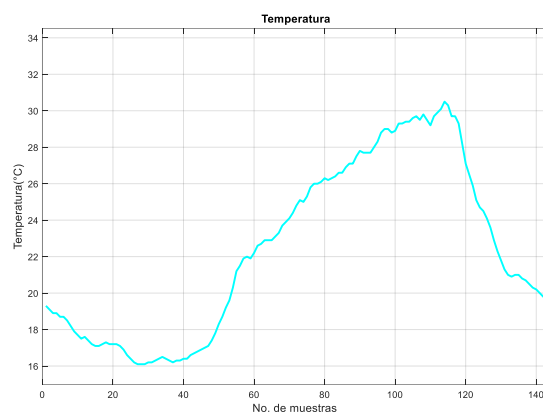


Figura 4. Temperatura

4. DIMENSIONAMIENTO DEL MÓDULO FV

Para el dimensionamiento del módulo FV se obtuvo primero el rendimiento de una celda de silicio policristalino instalada en Colomos Guadalajara, resultando ser de una potencia de 1.65W. Posteriormente se estableció una rutina en MATLAB, la cual calcula la diferencia entre el consumo para la lámpara de 12W y la producción de energía con un panel de n celdas; el número de celdas se incrementa secuencialmente, hasta obtener la cantidad crítica que asegura que el paradero se mantendrá siempre iluminado. El resultado es de 33 celdas, obteniéndose finalmente una potencia nominal de 55W para el módulo FV. En la Tabla 6 se muestran las características eléctricas del módulo FV.

Parámetro	Valor
Potencia máxima ($P_{\text{máx}}$)	55 W
Voltaje PMP (V_{pmp})	28V
Corriente PMP (I_{pmp})	1.97 A
Voltaje en circuito abierto (V_{oc})	32.5 V
Corriente de corto circuito (I_{sc})	2.07 A
Coeficiente de temperatura (P_{pmp})	-0.47
Coeficiente de temperatura (V_{oc})	-0.38
Coeficiente de temperatura (I_{sc})	0.4
Celdas	36

El convertidor CD-CD de la etapa 1 es el encargado de controlar la potencia de salida del módulo FV y controlar la carga de la batería. Se utilizó un convertidor CD-CD reductor de tensión tipo *Buck* ya que este reduce de un nivel de voltaje mayor (voltaje del módulo FV) a un nivel de voltaje menor (voltaje de la batería). Para el dimensionamiento de este convertidor se tomó en cuenta el máximo pico de potencia generado por el módulo FV y los datos del perfil de misión. Este pico de potencia máximo es de 67.74 W. En la Figura 5 se muestra el diagrama eléctrico del convertidor *Buck* y en la Tabla 7 los parámetros para su diseño.

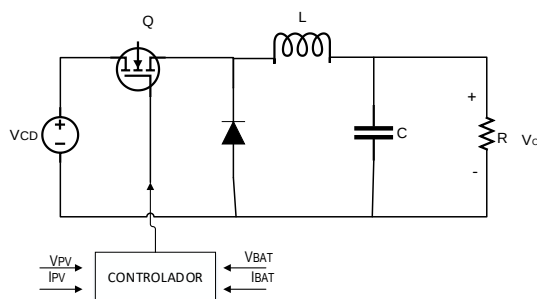


Figura 5. Diagrama eléctrico del convertidor *Buck*

Parámetro	Valor
Voltaje de entrada V_i	28V
Voltaje de salida V_o	14 V
Potencia de salida P	68 W
Frecuencia de operación fsw	75 kHz
Rizo de Corriente Δi_L	2% (0.09A)
Rizo de voltaje ΔV_c	1% (0.16 V)

Tabla 8. Parámetros calculados para el convertidor *Buck*

Parámetro	Valor
Ganancia M	0.50
Ciclo de trabajo D	0.50
Inductor L	1 mH
Capacitor C	1 μ F
Resistencia de carga R	2.88 Ω

Los niveles de voltaje y potencia a la salida del módulo FV dependen en gran medida de la irradiancia y la temperatura. El módulo FV debe operar en el PMP para poder entregar la máxima potencia de trabajo. Es por ello que es necesario un algoritmo de SPMP (Ayop and Tan, 2018). En este trabajo se implementa el algoritmo de SPMP perturbar y observar (*P&O*) el cual es muy utilizado debido a su simplicidad de funcionamiento. En la Figura 6 se muestra el algoritmo *P&O*.

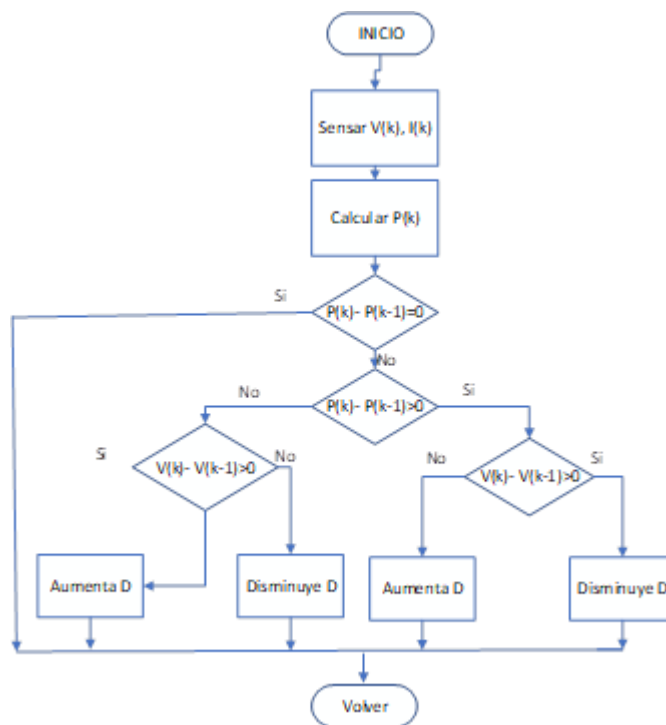


Figura 6. Algoritmo *P&O*

El algoritmo *P&O* consiste en modificar el ciclo de trabajo del convertidor de potencia conectado a la salida del módulo FV; al cambiar el ciclo de trabajo se modifica la corriente extraída del módulo FV, por lo consiguiente la potencia obtenida se modifica en relación a la modificación del ciclo de trabajo del convertidor de potencia.

5.2 Algoritmo de carga de batería basado en SPMP

La información de las curvas de corriente y tensión de carga de la batería es importante, y se observan en la Figura 7.

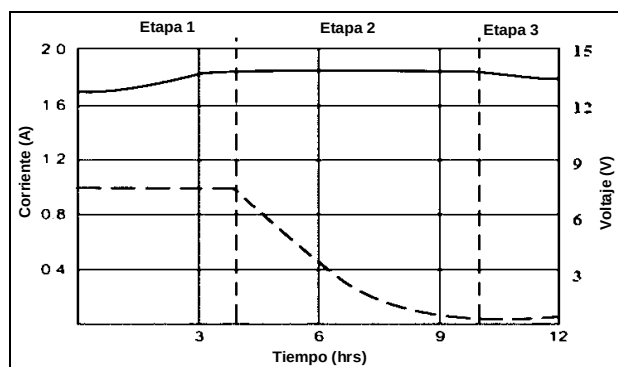


Figura 7. Curvas de corriente y tensión de carga de la batería

Durante la primera etapa la batería se carga con una corriente máxima igual al 20% de su capacidad nominal, hasta llegar al 80% de la carga total. En la segunda etapa, la corriente disminuye lentamente hasta que la batería alcanza el 100% de carga. La tercera etapa proporciona corriente para compensar la auto descarga y así mantener al 100% la carga final. El algoritmo encargado de controlar la carga de la batería se muestra en la Figura 8 (Jana, Das Bhattacharya and Saha, 2014).

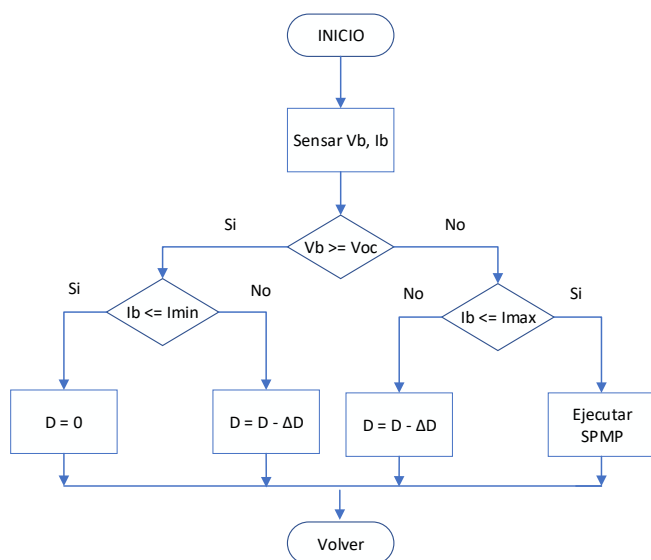


Figura 8. Algoritmo de carga de batería

6. SIMULACIONES

El diagrama eléctrico del módulo FV con SPMP y convertidor Buck, simulado en MATLAB Simulink, se observa en la Figura 9.

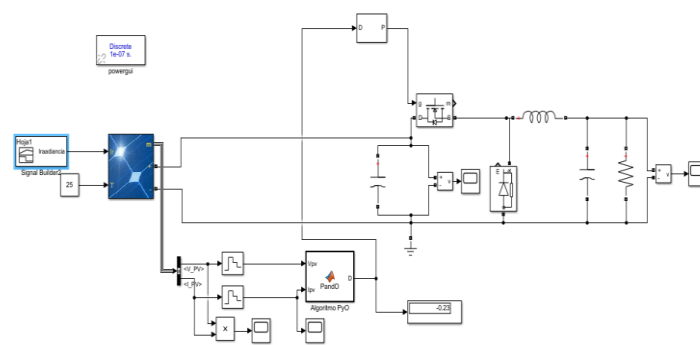


Figura 9. Diagrama eléctrico de módulo FV con SPMP y convertidor Buck

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la simulación, la potencia fotovoltaica se observa en la Figura 10, la intensidad de corriente se observa en la Figura 11, el voltaje a la salida de módulo FV se observa en la Figura 12 y finalmente el voltaje a la salida del convertidor Buck se observa en la Figura 13.

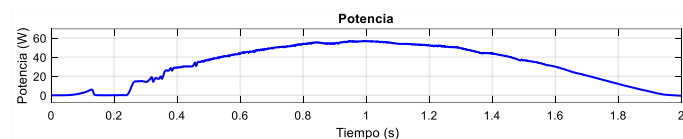


Figura 10. Grafica de la potencia fotovoltaica

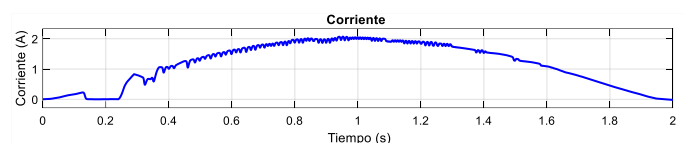


Figura 11. Grafica de la corriente

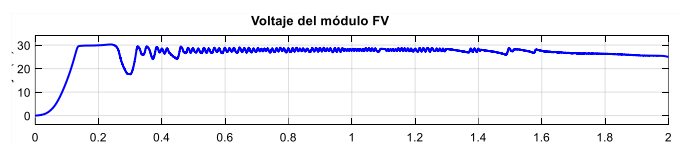


Figura 12. Grafica del voltaje del módulo FV



Figura 13. Grafica del Voltaje a la salida del convertidor Buck

7. CONCLUSIONES

La estimación del perfil de misión es un punto clave para el dimensionamiento del convertidor que se encarga de cosechar la energía generada por el módulo FV y cargar la batería, lo cual proporciona una optimización general al SFV.

El estudio propuesto en este artículo puede ser de mucha ayuda para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos autónomos no solo orientados a iluminación sino también a sistemas de bombeo para agricultura u otros usos.

REFERENCIAS

Ayop, R. and Tan, C. W. (2018) 'Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications', *Solar Energy*. Elsevier, 160(December 2017), pp. 322–335.

Jana, J., Das Bhattacharya, K. and Saha, H. (2014) 'Design and implementation of MPPT algorithm for battery charging with photovoltaic panel using FPGA', *Proceedings of 6th IEEE Power India International Conference, PIICON 2014*. IEEE, pp. 1–5.

Kannan, N. and Vakeesan, D. (2016) 'Solar energy for future world: - A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, pp. 1092–1105.

Lenz, J. M., Sartori, H. C. and Pinheiro, J. R. (2017) 'Mission profile characterization of PV systems for the specification of power converter design requirements', *Solar Energy*, 157, pp. 263–276.

De Leon-Aldaco, S. E., Calleja, H. and Aguayo Alquicira, J. (2015) 'Reliability and mission profiles of photovoltaic systems: A FIDES approach', *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(5), pp. 2578–2586.

Lizárraga Lizarraga, A. (2018) 'Aporte de Energía Fotovoltaica en Aparatos de Climatización', p. 194.

Mardikaningsih, I. S. *et al.* (2017) 'Evaluation and designing street lighting with solar cell: A case study', *2016 2nd International Conference of Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering, ICIMECE 2016*, pp. 186–191.

Mehdi, B. J. and Slim, B. Y. (2017) 'The role of renewable energy and agriculture in reducing CO₂ emissions: Evidence for North Africa countries', *Ecological Indicators*. Elsevier Ltd, 74, pp. 295–301.

Mehdi, L. *et al.* (2017) 'Public street-lamps autonomy increasing based on self-lighting concept', *Proceedings of 2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, CISTEM 2016*.

Diseño matemático e Implementación en Software de un Decodificador BCH (15,7,2) para Control de Errores

Luis Alonso Hernández Pérez*
Viviana Basurto Ríos**
Fernando Adan Serrano Orozco***
Xóchitl Cabrera Rivas****

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Culhuacan-IPN, Av. Santa Ana 1000,
San Francisco Culhuacan, 04260 Ciudad de México, CDMX.

*(e-mail: totosynina@gmail.com)

**(e-mail: vivibasurtor@gmail.com)

***(e-mail: univeresime@hotmail.com)

****(e-mail: xcabrerarivas@gmail.com)

Resumen: En éste artículo se presenta el diseño completo de un decodificador Bose–Chaudhuri–Hocquenghem (BCH) para el control de errores que puede ser aplicable a cualquier sistema de comunicación digital. El decodificador BCH (15,7,2) puede realizar la detección y corrección de hasta dos errores en cualquier posición de la palabra codificada. También se implementa en software de Matlab las instrucciones necesarias para poder realizar la decodificación y con ello obtener la información sin error.

Palabras Clave: Sistema de comunicación digital, codificador, decodificador, BCH, detección y corrección de errores.

1. INTRODUCCIÓN

Cualquier sistema de comunicación digital presenta problemas de transmisión debido al ruido que se genera en el canal, por tal motivo es de suma importancia desarrollar algún procedimiento o técnica para el control de errores.

Para asegurar comunicaciones confiables se han desarrollado esquemas para la detección y corrección de errores de bits. La codificación de canal tiene la finalidad de realizar el control de errores y su objetivo es reducir la probabilidad de error, es decir tener una relación señal a ruido que permita recuperar la información en el receptor. Con el propósito de tener las condiciones adecuadas para efectuar comunicaciones digitales eficientes es necesario realizar transformaciones de los datos de acuerdo a ciertas reglas establecidas, dicho propósito hace referencia al término de codificación (Sanchez López, R. 2009).

El objetivo principal en éste trabajo es realizar el diseño de un decodificador tipo BCH, el cual a pesar de que su inicio tiene más de medio siglo, aún se sigue realizando el estudio y desarrollo del mismo ya que son una poderosa herramienta para la corrección de errores, por nombrar algunos tenemos (Zhang, X., & O'Sullivan, M. 2018), (Park, J., & Kim, J. 2018), (Choi, S., Ahn, H. K., et al. 2018). Esto debido a que se trata con sistemas digitales, se pueden corregir eficientemente los errores que puedan ocurrir durante la transmisión. También se realiza

la implementación de un algoritmo en Matlab para la detección y corrección de dos errores en cualquier posición de la palabra codificada (Decodificador BCH). Las bases que se usan para el diseño se encuentran en la teoría de la codificación e información con fundamento en la teoría Galois o de grupos (López García, C. A., & Fernández Veiga, M. 2002).

2. CÓDIGOS BCH

Los códigos BCH fueron descubiertos por Bose y Ray-Chaudhuri (Bose, R. C., & Ray-Chaudhuri, D. K. 1960) e independientemente por Hocquenghem (Hocquenghem, A. 1959) y son uno de los principales códigos para la corrección de múltiples errores. La importancia de éstos códigos radica en que son capaces de corregir todos los patrones aleatorios de errores y pueden corregir errores de varios bits en función del número de bits de redundancia, además de que no requieren retransmisión ya que son capaces de corregir el error en el receptor. De ahí que sean clasificados como códigos FEC que por sus siglas en inglés son (Forward Error Correction) códigos de corrección hacia adelante y por lo tanto no requieren de una retransmisión para poder corregir los errores producidos en el canal. Siendo un código de bloque éste codifica k bits de datos en n bits de palabra código agregando bits de comprobación de paridad o redundancia $n-k$ con el fin de detectar y verificar los errores (Clark Jr, G. C., & Cain, J. B. 2013). Éstos códigos se basan en un polinomio primitivo $p(x)$ de orden m y entran

dentro de la clasificación de códigos cíclicos con elementos dentro del campo de Galois (Galois Field) $GF(2^m)$.

2.1 Campos de Galois (GF) y polinomio primitivo

El campo de Galois (GF) es un concepto importante dentro de los códigos BCH, este es un conjunto finito de elementos (2^m) que se construye a partir del polinomio primitivo, el cual es un polinomio en base 2 que permite crear un campo con elementos no repetidos y que se define a partir de operaciones básicas como la suma en modulo-2 (XOR) y la multiplicación (AND). El campo sirve para realizar simplificaciones en el cálculo de los síndromes y del polinomio localizador. Para construir el campo se selecciona un polinomio primitivo, en éste caso para $t=2$ será de cuarto orden $m=4$.

$$p(x) = x^4 + x + 1 \quad (1)$$

Construimos el campo de Galois $GF(2^m)$ a partir del polinomio primitivo con $2^4 = 16$ elementos (Tabla 1). Para ello consideraremos las raíces en términos de la variable " α " de polinomio $p(x)$.

$$p(\alpha) = \alpha^4 + \alpha + 1 = 0 \Rightarrow \alpha^4 = \alpha + 1 \quad (2)$$

Table 1. Campo $GF(2^4) = 16$

	α^0	α^1	α^2	α^3	$p(\alpha) = \alpha^4 + \alpha + 1 = 0$
α^0	1	0	0	0	-
α^1	0	1	0	0	-
α^2	0	0	1	0	-
α^3	0	0	0	1	-
α^4	1	1	0	0	$\alpha^4 = \alpha + 1$
α^5	0	1	1	0	$\alpha^5 = \alpha(\alpha + 1) = \alpha^2 + \alpha$
α^6	0	0	1	1	$\alpha^6 = \alpha(\alpha^2 + \alpha) = \alpha^3 + \alpha^2$
α^7	1	1	0	1	$\alpha^7 = \alpha(\alpha^3 + \alpha^2) = \alpha^4 + \alpha + 1$
α^8	1	0	1	0	$\alpha^8 = \alpha(\alpha^3 + \alpha + 1) = \alpha^2 + 1$
α^9	0	1	0	1	$\alpha^9 = \alpha(\alpha^2 + 1) = \alpha^3 + \alpha$
α^{10}	1	1	1	0	$\alpha^{10} = \alpha(\alpha^3 + \alpha) = \alpha^2 + \alpha + 1$
α^{11}	0	1	1	1	$\alpha^{11} = \alpha(\alpha^2 + \alpha + 1) = \alpha^3 + \alpha^2 + \alpha$
α^{12}	1	1	1	1	$\alpha^{12} = \alpha(\alpha^3 + \alpha^2 + \alpha) = \alpha^3 + \alpha^2 + \alpha + 1$
α^{13}	1	0	1	1	$\alpha^{13} = \alpha(\alpha^3 + \alpha^2 + \alpha + 1) = \alpha^3 + \alpha^2 + 1$
α^{14}	1	0	0	1	$\alpha^{14} = \alpha(\alpha^3 + \alpha^2 + 1) = \alpha^3 + 1$

3. METODOLOGÍA DE DISEÑO – DECODIFICADOR BCH

El método para localizar y efectuar la corrección de errores es un proceso complicado. Para realizar dicha tarea se presentará una secuencia de pasos que sirven como guía en el diseño del decodificador y con ello comprender la forma en que se hace todo el proceso y así poder implementarlo en un programa como Matlab. Primeramente, para saber si una palabra recibida $r(x)$ tiene errores se utilizar el valor del síndrome $S(x)$. El cual es un valor que se obtiene del residuo de la división de la palabra recibida entre el correspondiente polinomio generador o

mínimo, según sea el caso que será detallado más adelante. De manera general para detectar si existe error se debe verificar que el síndrome sea diferente de cero. Si es así, el sistema sabe que ocurrió error en la transmisión y si por el contrario el síndrome es cero, se sabe que no hay error en la palabra recibida. Éste procedimiento se efectúa solamente para la detección de errores, sin embargo, no realiza la corrección de los errores. Para poder realizar la corrección se emplean procesos más complicados y complejos (como el polinomio localizador de error y/o la trampa de error).

Para el diseño del decodificador BCH (15,7,2) los pasos que se van seguir de manera general son los siguientes (Rhee, M. Y. 1989):

1. Calcular los valores de los síndromes $S_i(x)$
2. Calcular las raíces del polinomio localizador de error $\gamma(x)$
3. Expresar el polinomio localizador de error en función del síndrome
4. Evaluar el polinomio localizador de error para cada posición
5. Realizar la implementación de los pasos anteriores en software

3.1 Cálculo de los síndromes

El sistema decodificador recibe la palabra codificada con el error $r(x)$ y primeramente se determina la cantidad de síndromes no repetidos de acuerdo al número de errores a corregir.

$$S(x) = \{S_1(x), S_2(x), \dots, S_{2t-1}(x)\} \quad (3)$$

De la ecuación (3) podemos ver que se tienen tres síndromes: $S_1(x)$, $S_2(x)$ y $S_3(x)$ los cuales se determinan de la división de la palabra recibida entre el polinomio mínimo correspondiente. Ya que deben ser no repetidos y se sabe que los polinomios mínimos $m_1(x)$ y $m_2(x)$ son iguales, entonces sólo se consideraran dos síndromes que son $S_1(x)$ y $S_3(x)$. Evaluando en términos de α , la operación correspondiente se indica en la ecuación (4).

$$S_i(\alpha^i) = \text{Residuo} \left[\frac{r(x)}{m_i(x)} \right], \quad i = 1, 2, 3, \dots, 2t-1 \quad (4)$$

3.2 Cálculo de las raíces del polinomio localizador de error

Se procede a determinar el polinomio localizador de error que se expresa como se indica en la ecuación (5).

$$\gamma(x) = \gamma_0 + \gamma_1 x + \gamma_2 x^2 + \dots + \gamma_t x^t \quad (5)$$

Para el caso particular $t=2$, el polinomio localizador queda como la ecuación (6) y sus raíces serán escritas en términos de beta.

$$\gamma(x) = \gamma_0 + \gamma_1 x + \gamma_2 x^2 = (1 + \beta_1)(1 + \beta_2) \quad (6)$$

Realizando la multiplicación de las raíces se tiene que el polinomio esta expresado de la siguiente forma:

$$\gamma(x) = \gamma_0 + \gamma_1 x + \gamma_2 x^2 = 1 + (\beta_1 + \beta_2)x + (\beta_1 \beta_2)x^2 \quad (7)$$

3.3 Polinomio localizador de error en términos del síndrome

La relación entre los síndromes y los valores de beta se muestran en la ecuación siguiente:

$$S_i = \sum_{j=1}^t \beta_j^i \quad (8)$$

Para el caso de $t=2$ y con la ecuación (8) podemos ver claramente que el síndrome $S_1 = \beta_1 + \beta_2$, el cual representa el primer término lineal de x del polinomio localizador. Para encontrar el segundo término o coeficiente de la variable x^2 se realiza la multiplicación $(\beta_1 + \beta_2)^3$ dando como resultado la ecuación siguiente:

$$(\beta_1 + \beta_2)^3 = (\beta_1^3 + \beta_2^3) + \beta_1 \beta_2 (\beta_1 + \beta_2) \quad (9)$$

Utilizando ecuación (8) para obtener S_1 y S_3 es sencillo expresar la ecuación (9) en términos de sus síndromes, ver ecuación (10).

$$(S_1)^3 = (S_3) + \beta_1 \beta_2 (S_1) \quad (10)$$

Despejando $\beta_1 \beta_2$ de ecuación (10) y sustituyéndolo en el polinomio localizador de error, ecuación (7), tenemos que $\gamma_0 = 1$, $\gamma_1 = S_1$ y $\gamma_2 = (S_1^3 + S_3)/S_1$, con lo que el polinomio a utilizar es:

$$\gamma(x) = 1 + S_1 x + \left(\frac{S_1^3 + S_3}{S_1} \right) x^2 \quad (11)$$

3.4 Evaluación del polinomio localizador de error

La evaluación con respecto a α^i del polinomio localizador de error nos permite encontrar el lugar en donde ocurrió el error (comenzando de derecha a izquierda), si en la evaluación el resultado es igual a cero esto nos indicará la posición del o los errores existentes. Para mayores detalles se revisará un ejemplo en las siguientes secciones.

4. IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB

Matlab es una herramienta de computación que sirve para resolver una gran cantidad de problemas, se le conoce como laboratorio de matrices ya que trabaja principalmente con éstas y de ahí su nombre (Matrix Laboratory). Es un software muy usado en ingeniería ya que cuenta con diferentes cajas de herramientas que permiten hacer diferentes acciones en diferentes áreas de la ingeniería (López, C. P. 2002), (Knight, A. 2019).

El lenguaje de programación que utiliza es propio y puede ejecutarse en un entorno interactivo o a través de un archivo de script. Su ventaja es que es sencillo de aprender si se tiene las nociones de programación, cuenta con funciones, se pueden realizar operaciones con vectores, matrices y muchas cosas más. Para la programación del decodificador BCH en Matlab se procedió a realizarlo por etapas mediante el uso de funciones. Por ejemplo, se programó la función que calcula los valores de los síndromes, la que genera el campo de Galois, la que obtiene los polinomios mínimos y la que convierte el valor del exponente en binario y viceversa.

Para comprender el funcionamiento del programa, se muestra en la figura 1 un diagrama a bloques que muestra secuencialmente las acciones que realiza el programa.

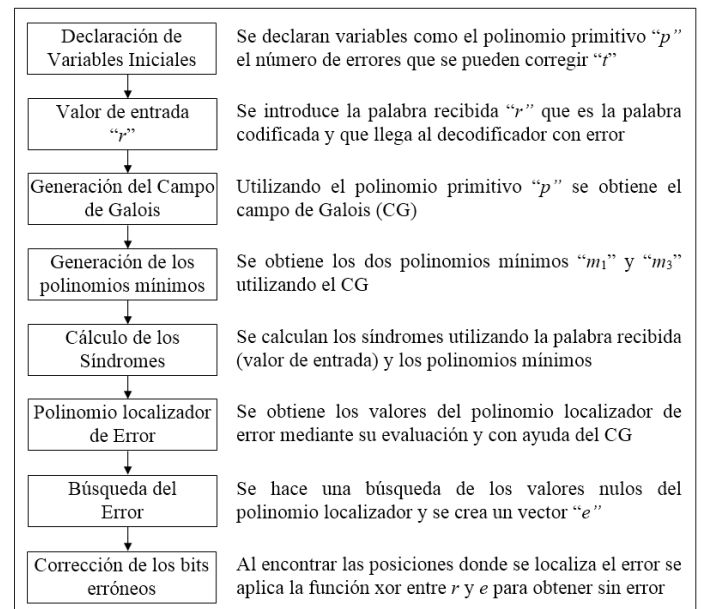


Fig. 1. Diagrama General a bloques del funcionamiento del programa

De manera general, sin mostrar la programación de cada una de las funciones utilizadas, el código del decodificador es el mostrado en la figura 2.


```
t=2;
Prim=[1 1 0 0 1];
m=length(Prim)-1;
desp=1;
global Campo;

r=[1 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0];

Campo=CG(Prim);

for z=1:2*t
    minimos(z,:)=polmin(z,Prim);
end

S1=Sindrome(r,m1);
S3=Sindromealfa(S3,3,Prim);

term1=S1;
term2=exp2bin(bin2exp(xor(exp2bin(bin2exp(S1)*3),S3))-abs(bin2exp(S1)));
for z=1:length(r)
    R1(z,:)=1-zeros(1,length(S1)-1);
    R2(z,:)=exp2bin(bin2exp(term1)+(1*z));
    R3(z,:)=exp2bin(bin2exp(term2)+(2*z));
end
Polinomio=xor(xor(R1,R2),R3)

for z=1:length(r)
    if Polinomio(z,:)==0
        Pos(desp)=z;
        desp=desp+1;
    else
        Pos(desp)=0;
    end
end
e=zeros(1,length(r));

for z=1:length(Pos)
    if Pos(z)==0
    else
        e(Pos(z))=1;
    end
end

r=xor(e,r)
```

Fig. 2. Código en Matlab del Decodificador BCH

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

En ésta sección se realizará la decodificación de una palabra recibida $r(x)$ que se le colocó intencionalmente dos errores en las posiciones 2 y 14 de derecha a izquierda, así la palabra recibida con error es $r = (101001000001110)_2$. Se realiza el cálculo de los síndromes y utilizando la tabla 1 se puede reducir los síndromes quedando lo siguiente:

$$\begin{aligned} S_1(\alpha^1) &= 1 + \alpha^1 + \alpha^2 + \alpha^3 = (1111)_2 \\ S_1(\alpha^1) &= (1111)_2 = \alpha^{12} \\ S_1 &= \alpha^{12} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} S_3(\alpha^3) &= \alpha^1 = (0100)_2 \\ S_3(\alpha^3) &= (0100)_2 = \alpha^1 \\ S_3 &= \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

Se simplifica el polinomio localizador de error utilizando las ecuaciones (12) y (13) y empleando la tabla 1. Al final se evalúa en cada valor de α^i (Ver tabla 2).

$$\gamma(x) = 1 + \alpha^{12}x + (\alpha^{14})x^2 \quad (14)$$

Table 2. Campo $GF(2^4) = 16$

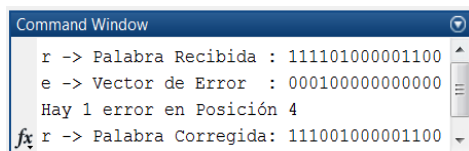
Posición	Evaluación	Polinomio Localizador	Resultado
1	α^1	$\gamma(\alpha^1) = 1 + \alpha^{12}\alpha^1 + (\alpha^{14})\alpha^2$	α^{11}
2	α^2	$\gamma(\alpha^2) = 1 + \alpha^{12}\alpha^2 + (\alpha^{14})\alpha^4$	0
3	α^3	$\gamma(\alpha^3) = 1 + \alpha^{12}\alpha^3 + (\alpha^{14})\alpha^6$	α^5
4	α^4	$\gamma(\alpha^4) = 1 + \alpha^{12}\alpha^4 + (\alpha^{14})\alpha^8$	α^3
5	α^5	$\gamma(\alpha^5) = 1 + \alpha^{12}\alpha^5 + (\alpha^{14})\alpha^{10}$	α^{12}
6	α^6	$\gamma(\alpha^6) = 1 + \alpha^{12}\alpha^6 + (\alpha^{14})\alpha^{12}$	α^{10}
7	α^7	$\gamma(\alpha^7) = 1 + \alpha^{12}\alpha^7 + (\alpha^{14})\alpha^{14}$	α^{12}
8	α^8	$\gamma(\alpha^8) = 1 + \alpha^{12}\alpha^8 + (\alpha^{14})\alpha^{16}$	α^5
9	α^9	$\gamma(\alpha^9) = 1 + \alpha^{12}\alpha^9 + (\alpha^{14})\alpha^{18}$	α^{14}
10	α^{10}	$\gamma(\alpha^{10}) = 1 + \alpha^{12}\alpha^{10} + (\alpha^{14})\alpha^{20}$	α^{14}
11	α^{11}	$\gamma(\alpha^{11}) = 1 + \alpha^{12}\alpha^{11} + (\alpha^{14})\alpha^{22}$	α^3
12	α^{12}	$\gamma(\alpha^{12}) = 1 + \alpha^{12}\alpha^{12} + (\alpha^{14})\alpha^{24}$	α^{11}
13	α^{13}	$\gamma(\alpha^{13}) = 1 + \alpha^{12}\alpha^{13} + (\alpha^{14})\alpha^{26}$	α^1
14	α^{14}	$\gamma(\alpha^{14}) = 1 + \alpha^{12}\alpha^{14} + (\alpha^{14})\alpha^{28}$	0
15	α^{15}	$\gamma(\alpha^{15}) = 1 + \alpha^{12}\alpha^{15} + (\alpha^{14})\alpha^{30}$	α^{10}

En la tabla 2 se puede observar que el resultado del polinomio localizador para las posiciones 2 y 14 son cero, lo cual nos está diciendo que existe error en dichas posiciones. En relación al programa realizado en Matlab, éste es corrido con la correspondiente palabra agregándole el error y se obtiene el resultado esperado en la ventana de comandos (Figura 5). En la ventana de comando se observa que la primera línea con la palabra recibida $r = (101001000001110)_2$ que tiene los dos errores ya mencionados, posteriormente está el vector $e = (01000000000010)_2$ el cual fue calculado mediante las diferentes funciones ya mencionadas para encontrar el error e indicando los lugares o posiciones correspondientes donde ocurrió el error. Así, utilizando r y e se puede aplicar una función xor a ambos vectores para poder obtener un vector resultante. La tercera línea muestra el resultado de aplicar la función xor, la cual muestra la palabra recibida sin error $r = (111001000001100)_2$. El codificador BCH (15,7,2) realizado en Matlab puede realizar la detección y corrección de hasta dos errores. Por lo tanto, si en la transmisión ocurrió un solo error, el sistema debe ser capaz de saber y poder corregirlo. Para ello se agregaron instrucciones condicionales para mostrar en el programa si ocurre uno o dos errores, e inclusive si no algún error. Los resultados se muestran en las figuras 3-5.

```
Command Window
r -> Palabra Recibida : 111001000001100
e -> Vector de Error : 0000000000000000
No hay error
fx r -> Palabra Recibida : 111001000001100
```

Fig. 3. Palabra recibida $r = (111001000001100)_2$ sin error.

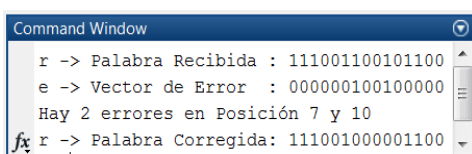
En la figura 3 se puede observar que cuando no existe error, el vector “e” está en ceros, esto debido a que es el encargado de realizar la corrección mediante una xor. Para el caso en que existe uno o dos errores (Figuras 4 y 5) el vector “e” es diferente de cero y el lugar o posición donde es “1” corresponde a donde ocurre el error.



```

Command Window
r -> Palabra Recibida : 111101000001100
e -> Vector de Error : 000100000000000
Hay 1 error en Posición 4
fx r -> Palabra Corregida: 111001000001100
  
```

Fig. 4. Palabra recibida $r = (111001000001100)_2$ con un error en la cuarta posición.



```

Command Window
r -> Palabra Recibida : 111001100101100
e -> Vector de Error : 000000100100000
Hay 2 errores en Posición 7 y 10
fx r -> Palabra Corregida: 111001000001100
  
```

Fig. 5. Palabra recibida $r = (111001000001100)_2$ con dos errores en la séptima y décima posición.

En la figura 4 se muestra cuando solo ocurre un error, el cual fue colocado en la cuarta posición y en la figura 5 está el caso en que ocurren dos errores los cuales fueron añadidos en la séptima y décima posición. Cabe aclarar que los errores fueron colocados de manera intencional para poder comprobar y constatar que el programa funciona correctamente. Sin embargo, los errores pueden ocurrir de manera aleatoria en cualquier posición como en cualquier sistema de comunicación digital (real) y el sistema decodificador es capaz de corregir los errores al cual fue diseñado, en éste caso hasta dos errores.

6. CONCLUSIONES

En éste artículo se realizó el diseño completo de un decodificador tipo BCH con polinomio primitivo $p(x) = x^4 + x + 1$, el cual puede ser utilizado en cualquier sistema de comunicación digital para el control de errores. También se implementó en el software de Matlab para poder realizar de manera práctica la corrección de errores en las palabras código validas con error.

El decodificador diseñado e implementado en Matlab es capaz de realizar la corrección de dos errores en cualquier posición de la palabra código, su estructura está pensada de tal forma que pueda ser escalable y con ello poder realizar la corrección de más errores en trabajos futuros. Con lo anterior, se demuestra su funcionamiento y se puede notar que es funcional para cualquier palabra de código válida. Este tipo de decodificador puede recibir una palabra codificada de 15 bits, de los cuales 7 bits son para representar a la información y 8 para la redundancia. Con los bits de información se puede tener un

sistema que recibe (2^7) 128 combinaciones diferentes de mensajes o alfabeto fuente, lo cual es aproximadamente 1byte y con ello podemos crear un código capaz de generar las diferentes combinaciones de texto como el código ASCII de tal forma que es aplicable (como ejemplo práctico) para secuencias de texto en un sistema de comunicación digital.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaria de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional (SIP-IPN) por el apoyo brindado en el proyecto de investigación con número de registro SIP 20190153.

REFERENCIAS

- Bose, R. C., & Ray-Chaudhuri, D. K. (1960). On a class of error correcting binary group codes. *Information and control*, 3(1), 68-79.
- Clark Jr, G. C., & Cain, J. B. (2013). *Error-correction coding for digital communications*. Springer Science & Business Media.
- Choi, S., Ahn, H. K., Song, B. K., Kim, J. P., Kang, S. H., & Jung, S. O. (2018). A Decoder for Short BCH Codes With High Decoding Efficiency and Low Power for Emerging Memories. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 27(2), 387-397.
- Hocquenghem, A. (1959). Codes correcteurs d'erreurs. *Chiffres*, 2(2), 147-56.
- Knight, A. (2019). *Basics of MATLAB and Beyond*. Chapman and Hall/CRC.
- López García, C. A., & Fernández Veiga, M. (2002). *Teoría de la información y codificación*. Enxeñaría telemática.
- López, C. P. (2002). *Matlab y sus Aplicaciones en las Ciencias y la Ingeniería*. Pearson Educación.
- Park, J., & Kim, J. (2018). Generator Polynomial Model-Based Eye Diagram Estimation Method for Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH) Code and Reed-Solomon (RS) Code. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*.
- Rhee, M. Y. (1989). *Error-correcting coding theory*. McGraw-Hill, Inc.
- Sanchez Lopez, R. (2009). *Esencias de ingenieria de comunicaciones digitalesun enfoque teorico practico* (No. 62 621.38). e-libro, Corp..
- Zhang, X., & O'Sullivan, M. (2018, May). Ultra-Compressed Three-Error-Correcting BCH Decoder. In *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)* (pp. 1-5). IEEE.
- Zhang, C., Dong, H., Ge, J., Liu, H., Bai, B., Yuan, Z. & Zhang, H. (2018, July). Study on BCH Based Encoder and Decoder Approach for EM-MWD Communication System. In *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 8640-8644). IEEE.

Evaluación perfil de misión en controlador de carga y rectificador

O. Prieto*, S. De León Aldaco**
J. Aguayo***

*Centro Nacional de Investigación y desarrollo tecnológico, Depto. Ingeniería Electrónica
México (Tel: 9231160793; e-mail: oscar.prieto17ea@cenidet.edu.mx).

**Universidad Internacional Iberoamericana, Depto. de Ingeniería Industrial (e-mail: susana.deleon@unini.edu.mx)

*** Centro Nacional de Investigación y desarrollo tecnológico, Depto. Ingeniería Electrónica,
México, (e-mail: jaguayo@cenidet.edu.mx)

Resumen: Los avances en electrónica de potencia se dirigen cada vez más en componentes y dispositivos semiconductores de potencia que permitan una eficiente producción de energía, esto se observa claramente en el uso de estos dispositivos semiconductores dentro de la producción de vehículos eléctricos, energías renovables, entre otras. El perfil de misión garantiza un correcto funcionamiento dentro de condiciones específicas, robustez, alargamiento de la vida útil, reducción en mantenimiento y reducción del dimensionamiento de los componentes, en este documento se proporcionan diferentes condiciones de operación, así como las pruebas realizadas a un controlador de carga y un rectificador de carga.

Palabras clave: Perfil de misión, RS232, Producción energética anual, controlador de carga, Generador de Pequeña Escala.

1. INTRODUCCIÓN

Los generadores eólicos se han utilizado durante al menos 3000 años primordialmente para bombear agua o moler granos, mientras tanto en los veleros el viento ha sido una fuente de energía esencial. A principio del siglo XIII los molinos de viento de eje horizontal fueron una parte integral de la economía rural, solo cayeron en desuso con la llegada de los motores baratos alimentados con combustibles fósiles, posteriormente llegó la electrificación e hizo que sus aplicaciones ya no fueran útiles, sin embargo, durante gran parte del siglo XX (Ma *et al.*, 2015). El interés en usar energía eólica era muy poco, no obstante, algunas viviendas utilizaban estos sistemas de generación, el acceso a la red eléctrica hizo que estos arreglos fueran remplazados.

Una gran excepción fue la turbina eólica smith-putnam de 1250 kW construida en 1941. Esta notable máquina tenía un rotor de acero de 53m de diámetro, control de paso completo y palas aleteadoras para reducir las cargas. Aunque tiempo después un mástil de aspas fallo de manera catastrófica aun siguió siendo la turbina eólica mas grande de la época durante alrededor de unos 40 años, el repentino aumento en el petróleo estimulo una serie de importantes programas de investigación, esto condujo a la construcción de una serie de turbinas prototipo que comenzaron con el mod-0 de 38 m de diámetro y 100 kW y culminaron con el mod-5B de 97.5 m de diámetro y 2.5 MW. Otros programas similares se llevaron a cabo en reino unido, Alemania y Suecia, hubo una considerable incertidumbre sobre que arquitectura podría resultar mas rentable, por esta razón se investigaron varios conceptos innovadores a gran escala. En el reino unido, el Dr. peter Musgrove propuso un diseño alternativo de eje vertical utilizando palas rectas para dar un rotor tipo "H" y se construyo

un prototipo de 500 kW. Se construyo y se probó una innovadora turbina eólica de eje horizontal de 3MW. La mejor opción para el número de palas permaneció poco clara durante algún tiempo y se construyeron grandes turbinas con una, dos o tres palas (Kumar, Aggrawal and Kumar, 2014). Se obtuvo mucha información científica y de ingeniería importante de estos programas financiados, los prototipos generalmente funcionaron según lo diseñado. Sin embargo, debe de reconocerse que los problemas de operar turbinas eólicas muy grandes, no tripuladas y en climas de viento difícil a menudo se subestimaban y la confiabilidad de los prototipos no era muy buena. En la actualidad una de las causas mas importantes de falla en los sistemas de energía eólica se debe al convertidor de energía, específicamente a uno de sus componentes mas críticos, los dispositivos semiconductores de potencia.

En la actualidad el uso de la energía eólica para generar electricidad es muy aceptado este se encuentra respaldado por la industria que fabrica e instala miles de MW cada año, la gran mayoría de las turbinas eólicas que actualmente están en uso son de eje horizontal y se encuentran conectadas a la red eléctrica.

2. DESARROLLO

Este artículo se tratará acerca del perfil de misión usando un generador eólico de baja potencia impulsado por un motor de C.D. En donde una de las problemáticas es como integrar un sistema que impulse el generador utilizando el protocolo de comunicación serial RS2323 (Han and Gao, 2007) y una fuente de voltaje en donde se aplicaran 3 diferentes condiciones de viento representando 3 diferentes condiciones de operación.

2.1 Simulación del Sistema Generador

Una de las ventajas que ofrece la simulación multidominio es una herramienta útil para investigar virtualmente las propiedades estáticas y dinámicas del sistema que se diseñará. Para este caso se pretende conocer las características aerodinámicas del sistema aerogenerador.

De (Burton, 2017), la potencia disponible del viento en una sección transversal circular con la misma área del disco del rotor se expresa mediante la Ecuación (1):

$$P_w = \frac{1}{2} \dot{m} v_w^2 = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 v_w^3 \quad (1)$$

Donde $\dot{m}$ es el flujo de masa del viento, v_w es la velocidad del viento, ρ es la densidad del aire y R es el radio del rotor. Solamente una fracción de la potencia disponible P_w puede convertirse en potencia mecánica del rotor P_m . La razón de cambio se obtiene mediante el coeficiente de potencia C_p , como se muestra en la Ecuación (1.2).

$$P_M = P_w C_p \quad (1.2)$$

El C_p tiene un límite superior teórico de $16/27 \approx 0.593$ esto es conocido como el límite de Betz (Henriksen, 2007). Esto se debe al hecho de que al viento no se le puede extraer completamente toda la energía, de lo contrario la velocidad del viento en el frente del rotor se reduciría a cero y el giro del rotor se detendría.

Tomando como referencia lo anterior de (Maldonado, 2007), el par Aerodinámico que genera el rotor de 3 aspas puede determinarse mediante las siguientes expresiones:

$$\tau_t = \frac{1}{\omega_T} P_R = \frac{1}{\omega_T} \left(\frac{1}{2} \pi \rho R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \theta) \right) \quad (1.3)$$

Donde

$$C_p(\lambda, \theta) = 0.5 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} \quad (1.4)$$

Con

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.0b\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \right) \quad (1.5)$$

Y

$$\lambda = \frac{R\omega_T}{v_w} \quad (1.6)$$

Aquí ρ es la densidad del aire, R es el radio de las aspas, v_w es la velocidad del viento, C_p es el coeficiente de potencia, λ es la relación de velocidades en la punta de la hélice, θ es el ángulo de ataque del aspa y ω_t es la velocidad angular de la turbina.

Así, la velocidad de la turbina debe mantenerse en su valor máximo posible para capturar la potencia del viento máxima. Sin embargo, se sugiere que, para optimizar la captura de energía anual en un sitio dado, es necesario que la velocidad de la turbina varíe para mantener el C_p en su máximo valor ver Fig. 1.

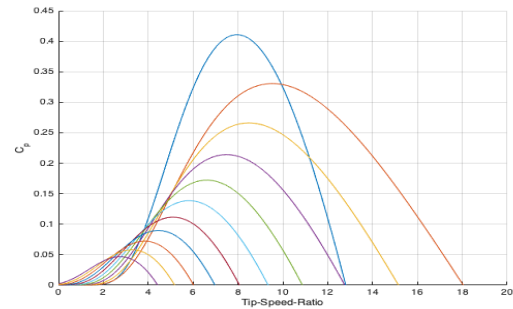


Fig. 1. Respuesta del Coeficiente de Potencia.

2.2 Perfil de viento

Para el perfil de viento se tienen contemplado aplicar 3 diferentes condiciones de operación que se definen como “A” perfil de viento alto, “B” perfil de viento medio y “C” perfil de viento bajo. La Fig. 2 muestra el perfil de viento “A”, se puede observar que su velocidad es graficada en metros sobre segundos a lo largo de 365 días.

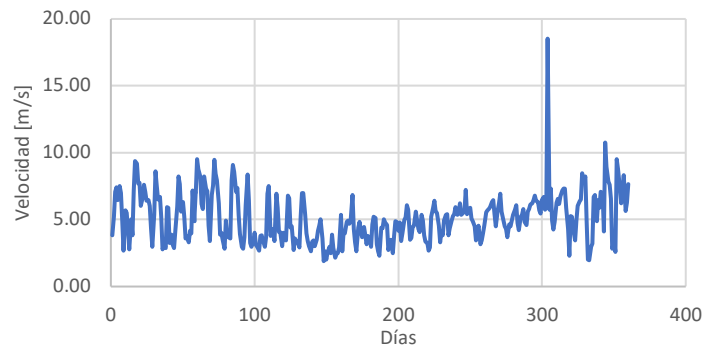


Fig. 2. Perfil de viento A.

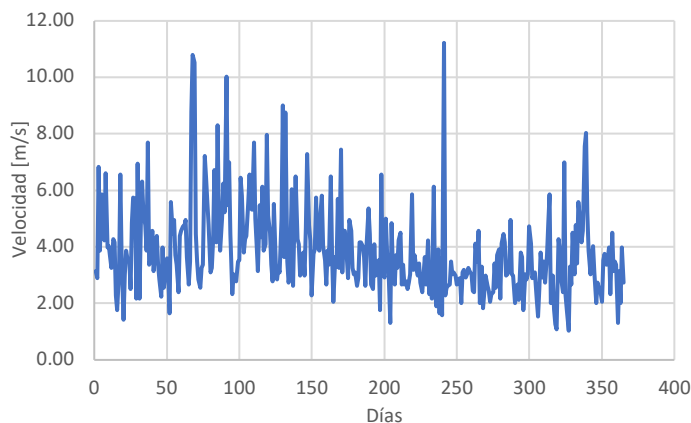


Fig. 3. Perfil de viento B.

Perfil de viento “B” con velocidades desde 1 hasta 11 m/s, representa un escenario en donde la velocidad del viento es media, pero suficiente para tener operando al generador en este rango, ver fig. 3.

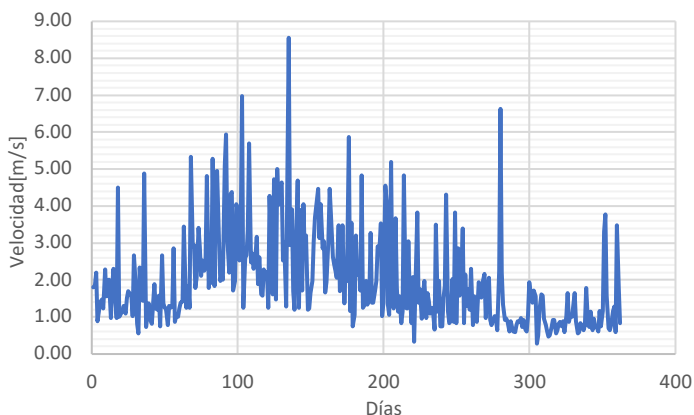


Fig. 4. Perfil de viento C.

El perfil de viento “C” representa un escenario en donde la brisa del viento es muy baja, a pesar de esta característica poco conveniente, es necesaria para poder observar el comportamiento del aerogenerador en esta condición ver, fig. 4.

En la fig. 5. se muestra un diagrama a bloques con las partes que integran este sistema para hacer funcionar el generador, principalmente consta de 4 partes las cuales son fuente de CD, motor, generador y su respectiva carga.

Mediante una fuente de CD (magna-volt) se uso una interface que permite la inserción de perfiles de viento “A,” B” y “C”, la fuente se conecta al motor de CD para de esta manera replicar el perfil de viento reflejado para a través del giro de motor replicar las condiciones de viento descritas por el perfil viento en la fuente el eje del motor fue acoplado al eje del aerogenerador.

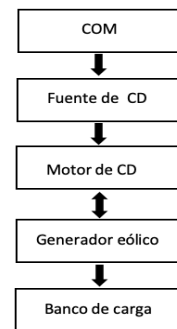


Fig. 5. Diagrama a bloques del sistema.

La fig. 6. Muestra la etapa de adquisición y acondicionamiento de datos empleada en SIMULINK se uso para recabar los datos de corriente y voltaje resultantes del controlador de carga y el puente de diodos según sea el caso.

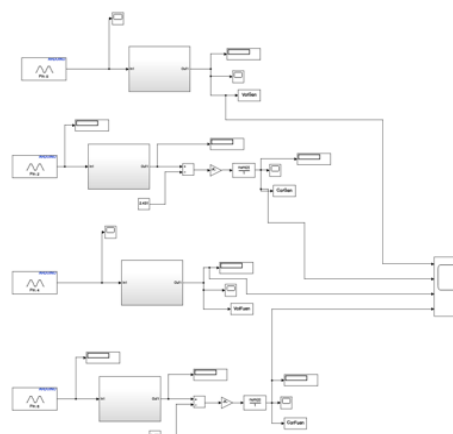


Fig. 6. Acondicionamiento de señal.

Tal y como se muestra en los trabajos de (Ma, Liserre and Blaabjerg, 2013) en donde se establece una resolución para reducir los tiempos de operación (Sorensen, Hansen and Rosas, 2002). Para este caso la resolución será de 1800 segundos. Al tomar el perfil de viento tal y como se muestra en la Fig. 2 se procede aplicar dicho comportamiento con la resolución que fue propuesta, debido a la gran cantidad de datos de carga que se generan durante 1 año de operación, resulta difícil de manejar si se consideran demasiados detalles del sistema (Luo *et al.*, 2017). Por el contrario, si se utilizan modelos demasiados toscos y un paso de tiempo mas largo, el perfil de carga generado puede no contener suficiente dinámica y la información puede desviarse significativamente de la realidad (Bhukya, 2017).

Como primer paso se utilizó un controlador de carga en una comparativa contra un rectificador trifásico, de estas dos topologías se verificará mediante ciertas condiciones de operación cual presenta más ventajas.

3. RESULTADOS

Para las condiciones de operación antes mencionadas, no se tomo en cuenta la temperatura, los valores del viento para el perfil “A” corresponden a la Ventosa, Oaxaca (ver Fig. 3) con vientos que van desde los 2 m/s hasta los 26 m/s cabe mencionar que la velocidad máxima de operación del generador es de 12 m/s, una de las ventajas con las que cuenta es su generación a bajas velocidades, aunque su velocidad máxima sea de 12 m/s cuenta con velocidades de operación de hasta 50 m/s por lo cual es ideal para estas pruebas.

Aunque los resultados fueron muy similares las pruebas realizadas al rectificador fueron demasiado pesadas, las perdidas por disipación de calor no afectaron el desempeño, razón por la cual no se recomienda emplear para altas tensiones.

La Fig. 7 corresponde a los valores de voltaje, corriente y potencia del controlador de carga, mientras que la Fig. 8 corresponde a los valores del rectificador de carga.

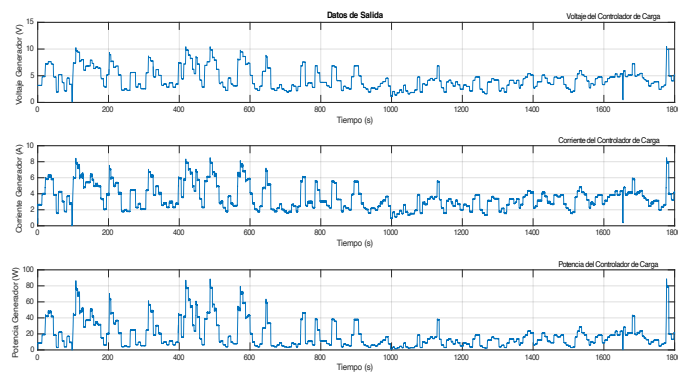


Fig. 7. Perfil “A” usando controlador de carga.

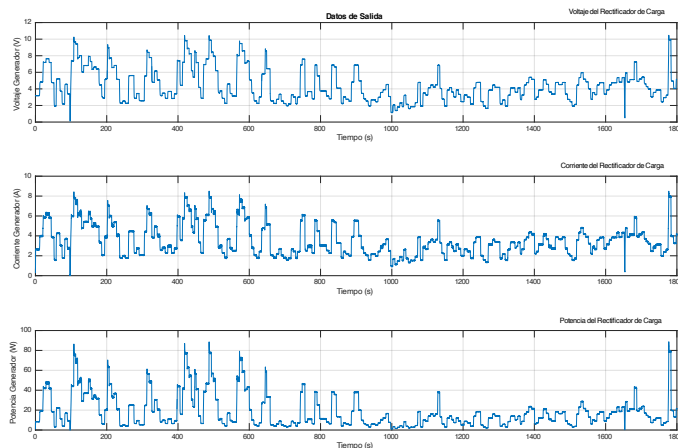


Fig. 8. Perfil “A” usando rectificador de carga.

Para la segunda prueba nuevamente se compararon el controlador de carga y el rectificador de carga, ahora se utilizo como condición de operación el perfil de viento “B” el cual pertenece a la CDMX, se verificará voltaje, corriente y potencia

para el caso del controlador de carga Fig. 9 y para el rectificador de carga Fig. 10.

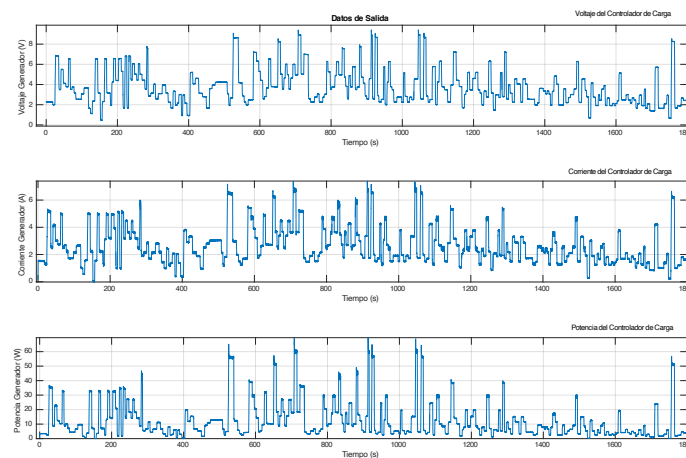


Fig. 9. Perfil “B” usando controlador de carga.

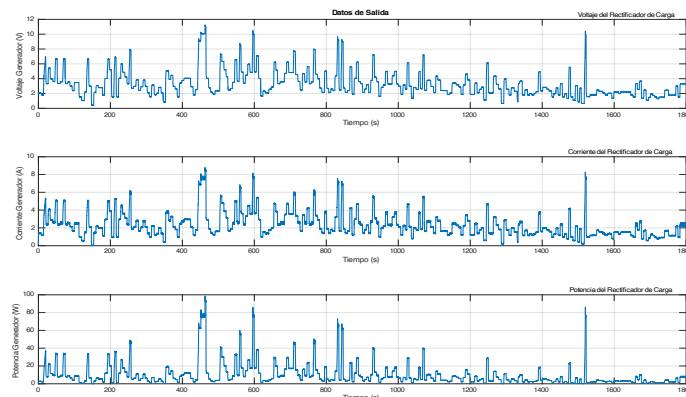


Fig. 10. Perfil “B” usando rectificador de carga.

De la misma manera las diferencias entre ambos son casi nulas, la generación de potencia fue mas baja de lo esperado, a pesar de esto en casi toda su operación estuvo generando por encima de su valor mínimo, también presento calentamiento en menor razón que la primera prueba, el rectificado de carga no es muy recomendado, pero puede ser utilizado para estas condiciones de operación.

Por ultimo se realizarán pruebas en ambos ítems ahora con el perfil de viento “C”. La Fig. 11 muestra los resultados del controlador de carga y la Fig. 12 los correspondientes al rectificador de carga.

Tomando en cuenta que esta condición de operación representa de ante mano una producción energética muy baja. Para estas condiciones de viento, usando el controlado de carga la producción de energía es muy poca, el calentamiento de los componentes no fue un problema, específicamente en este caso el calentamiento de los componentes puede ser solucionado fácilmente con un disipador de calor.

REFERENCIAS

Bhukya, J. (2017) 'Integration of DFIG Based Wind Turbine Generator on Small Signal Stability of Power Systems', pp. 1–6.

Burton, T. (2017) *Wind Energy, 13th German Wind Energy Conference*.

Han, X. and Gao, Y. (2007) 'Design and implementation of the universal RS232-GPIB interface', *2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI*, pp. 3220–3223. doi: 10.1109/ICEMI.2007.4350894.

Henriksen, L. C. (2007) 'Model Predictive Control of a Wind Turbine', p. 146. doi: 10.1109/CONTROL.2016.7737542.

Kumar, G., Aggrawal, R. K. and Kumar, A. (2014) 'Design criteria and CFD analysis of a small wind turbine installed at Banihal top in snow bound high altitude area: A case study', in *Proceedings of 2014 1st International Conference on Non Conventional Energy: Search for Clean and Safe Energy, ICONCE 2014*, pp. 180–183. doi: 10.1109/ICONCE.2014.6808716.

Luo, H. *et al.* (2017) 'Investigation and Emulation of Junction Temperature for High-Power IGBT Modules Considering Grid Codes', *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6777(c). doi: 10.1109/JESTPE.2017.2748619.

Ma, K. *et al.* (2015) 'Thermal loading and lifetime estimation for power device considering mission profiles in wind power converter', *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(2), pp. 590–602. doi: 10.1109/TPEL.2014.2312335.

Ma, K., Liserre, M. and Blaabjerg, F. (2013) 'Lifetime estimation for the power semiconductors considering mission profiles in wind power converter', *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 2962–2971. doi: 10.1109/ECCE.2013.6647087.

Maldonado, J. V. (2007) 'Modelado del coeficiente de potencia de un Aerogenerador Por Efecto De Fricción'.

Sorensen, P., Hansen, A. D. and Rosas, P. A. C. (2002) 'Wind models for simulation of power fluctuations from wind farms', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(12–15), pp. 1381–1402. doi: 10.1016/S0167-6105(02)00260-X.

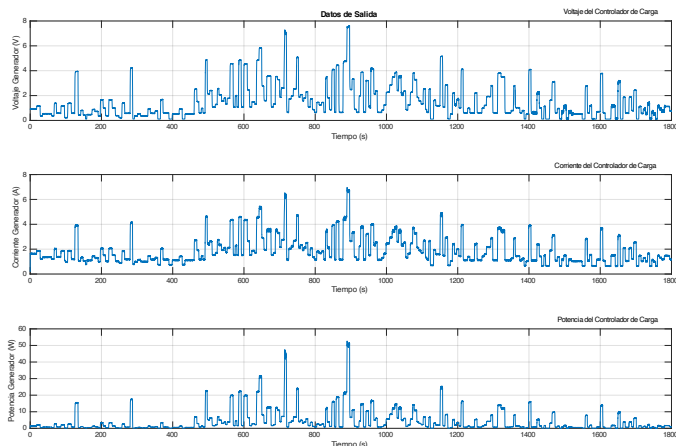


Fig. 11. Perfil "C" usando controlador de carga.

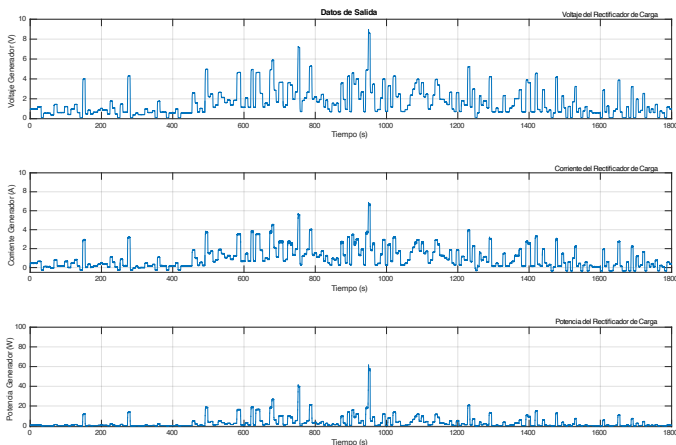


Fig. 12. Perfil "C" usando rectificador de carga.

En cuanto a la comparativa de ambas con el perfil "C" es claramente visible que el rectificador de carga no logra ser eficiente ya que las perdidas son mayores, sumando a esto, el perfil de viento es muy bajo por lo cual el uso del rectificador no es recomendable, dando como resultado una clara ventaja el uso del controlador de carga ya que a pesar de ser puesto a prueba bajo condiciones en operación bajas pudo procesar más energía que el rectificador.

6. CONCLUSIÓN

En estas pruebas se aplicó el perfil de viento, omitiendo el parámetro de la temperatura ambiente, la resolución aplicada fue de 1800 segundos para un año, las condiciones de operación están centradas en la energía producida a la salida del aerogenerador, se encontró que en la aplicación de energía eólica podrían presentarse muchas condiciones de operación que no están cubiertos por la mayoría de modelos de los fabricantes, por lo tanto se requieren pruebas de operación más avanzadas como podría ser el caso de la estimación de la vida útil en función del perfil de misión.

Diseño de un Convertidor Tipo Buck-Boost Para Almacenamiento de Energía

Luna-Aguilar, N.M. Zepeda-Hernández, J.A. *
Mina-Antonio, J.D. ** Claudio-Sánchez, A. ***

* *Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, TURIX-Dynamics Diagnosis and Control Group, Carretera Panam. Km 1080, Cp. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. (Tel: 244-133-4300, e-mail: noe.luna.920409@gmail.com)*

** *Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Interior Internado Palmira S/N Col. Palmira, Cp. 62490, Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: jmina@cenidet.edu.mx)*

*** *Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Interior Internado Palmira S/N Col. Palmira, Cp. 62490, Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: peabraha@cenidet.edu.mx)*

Resumen: En el presente artículo se realiza el análisis de los parámetros de una batería plomo-ácido tales como: tensión de las baterías, capacidad de carga, energía específica, densidad energética, ciclos de carga (SoC), profundidad de descarga (DoD). Este tipo de baterías son conocidas como sistemas de almacenamiento de energía los cuales son ampliamente utilizados en los Vehículos Eléctricos (VE), por lo cual es necesario que estas cuenten con una eficiencia alta en distribución y almacenamiento de energía. Dicho análisis servirá para el diseño y simulación de una topología de convertidor de potencia, tipo Buck-Boost, el cual cumplirá la función de aprovechar la energía proveniente de un sistema externo para realizar una eficiente recarga de energía al banco de baterías, minimizando el tiempo de descarga.

Keywords: Convertidores de potencia, simulación de sistemas, calidad de la energía, sistemas de almacenamiento de energía.

1. INTRODUCCION

Las baterías electroquímicas son un componente importante tanto en vehículos eléctricos (VE) como en los vehículos eléctricos híbridos (VEH) ya que estos dispositivos realizan una transformación de energía química a energía eléctrica y viceversa mediante un proceso electroquímico. Las baterías son también conocidas como sistemas de almacenamiento de energía reversible. Los atributos deseables de las baterías para aplicaciones en VE y VEH son: alta energía específica, alta potencia específica, larga vida útil y de ciclo, bajos costos iniciales y de reemplazo, alta confiabilidad, amplio rango de temperaturas de operación, y alta robustez.

Las baterías están compuestas por una cantidad de celdas individuales en las que están presentes tres componentes principales: dos electrodos, donde se producen reacciones que dan como resultado la circulación de electrones a través de una carga externa, y un medio que proporciona el mecanismo de transporte de iones entre lo positivo y lo negativo. El cátodo es el electrodo donde tiene lugar la

reducción (ganancia de electrones). Es el electrodo positivo durante la descarga, y el electrodo negativo durante la carga. Por el contrario, el ánodo es el electrodo donde tiene lugar la oxidación (pérdida de electrones). Es el electrodo negativo durante la descarga y el electrodo positivo durante la carga. En la Figura 1 podemos observar el efecto químico que se efectúa en una celda de batería bajo descarga, ya que suceden dos semireacciones (Guzzella et al., 2007). Hay diferentes tipos de baterías de acuerdo a los aspectos electroquímicos de cada una que se presentan en la Tabla 1, las más comúnmente usadas son: (1) plomo-ácido, (2) níquel-cadmio, (3) ión-litio. Las baterías de tipo ácido-plomo son la elección más popular y confiable de entre otro tipo de baterías ya que fueron diseñadas para ofrecer una alta potencia a bajo costo, y confiabilidad (Pedro, 2018).

Por otra parte, resulta oportuno el uso de la electrónica de potencia ya que influye en muchas aplicaciones que tienen que ver con el manejo de la energía, ya que se encarga de la conversión de energía empleando componentes electrónicos. Se han encontrado en la bibliografía

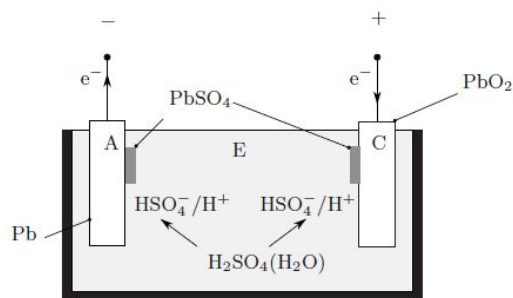


Figura 1. Esquema interno de una batería

algunas topologías de convertidores que se han propuesto enfocados en el almacenamiento de energía en vehículos eléctricos en específico en la carga de baterías. En (Bosso et al., 2016) proponen una nueva topología electrónica (buck-boost) de potencia para interconectar una red de CC y una red trifásica de CA de baja frecuencia, de manera bidireccional, aislada sin etapa de CC intermedia con un factor de potencia unitario, utilizando una estrategia de modulación que permite reducir las pérdidas de conmutación en el convertidor. También los autores de (Reyes et al., 2018) proponen un diseño e implementación de un convertidor DC-DC que sea capaz de manejar las densidades de potencia, la generación intermitente de energía y además de tener una alta eficiencia superior al 90 % para llevar a cabo la recuperación de energía de un sistema cinemático.

Tabla 1. Características electroquímicas de diversas tipologías de baterías

Batería	Ánodo	Cátodo	Electrolito	Voltaje en celdas
NiMH	Metal	$Ni(OH)_2$	KOH	1.2 V
Ion - litio	Carbono	Li oxido	Sol. litiada	3.6 V
Litio - Pm	Li	Plástico	Pol. sólido	3.7 V
Na - níquel	Na	NiCl	Al ₂ O ₃	2,58 V
Pb - acid	Pb	PbO_2	H_2SO_4	2 V

En (Niasar and Sabbaghean, 2017) encontramos el diseño e implementación a bajo costo de un convertidor maximizando el tiempo de conmutación de los inversores, controlando de mejor manera el factor de potencia que da un motor sin escobillas (BLDC) generando una forma de onda de corriente óptima. Hablando sobre motores sin escobillas o mejor conocidos como motores brushless (por sus siglas en inglés BLDC) en (Yang et al., 2009) nos presentan un circuito de potencia el cual contiene 6 dispositivos conmutadores los cuales durante el período de frenado de un motor BLDC, solo cambian la secuencia de conmutación para controlar el par inverso para que la energía de frenado regrese a la batería, la regeneración de energía podría aumentar el rango de conducción de un VE aproximadamente 16.2 %

Finalmente en (Valencia and Gómez, 2010) nos presentan el diseño de un convertidor bidireccional de tipo buck-boost (reductor-elevador) para la administración de

energía en baterías utilizados como sistemas de alimentación ininterrumpida, controlando el flujo de energía y regulando la tensión de alimentación en DC. Dicho artículo nos da la base para poder llevar a cabo el desarrollo y diseño de nuestro propio convertidor tipo buck-boost con las características necesarias para poder alimentar al banco de baterías (5 baterías tipo Pb-acid interconectadas en serie cada una) transfiriendo la energía que se recupere de cada frenada realizada en la parte experimental. Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección II se describe la caracterización de una batería tipo ácido-plomo. En la sección III se describe la topología propuesta y se explica su principio de funcionamiento. En la sección IV se detallan los resultados de simulación para evaluar el desempeño del convertidor. Finalmente, en la sección V, se presentan las conclusiones.

2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA BATERÍA ÁCIDO-PLOMO

La batería a analizar es una TROJAN T1275 es una batería de 150 [Ah] y 12[V] de tensión, de tipo monobloc. Para lograr una eficiente carga en la batería se presenta en la Figura 2 las etapas de carga de una batería proporcionados por la hoja de datos del fabricante:

1. Etapa Bulk: En esta primera etapa se suministra corriente a la batería a intensidad máxima, de manera que el voltaje (tensión) aumenta rápidamente hasta llegar aproximadamente a 12.6 [V]. Si se desea cargar un banco de baterías el límite de voltaje recomendado debe ser entre un 10 a 20 % de la corriente nominal de la batería.
2. Etapa de Absorción: En este instante la corriente de carga disminuye lentamente hasta que la batería se carga al 100 %. En esta etapa trabajamos al voltaje alcanzado al final de la etapa Bulk, denominado límite de absorción.
3. Etapa de Flotación: En esta 3^{ra} etapa la batería ya está cargada al 100 % y lo que se hace es proporcionar la corriente necesaria para compensar la autodescarga, de manera que permanezca al 100 %. Se trabaja a potenciales bajos y constantes.
4. Etapa de Ecualización: Tiene como fin el ascenso del gas dentro del ácido (electrolito) haciendo que la disolución llegue a ser homogénea. Tras esta etapa conseguimos que todas las celdas tengan el mismo voltaje (Tremblay et al., 2007).

Teniendo de conocimiento las etapas de carga de la batería, a continuación se definen las ecuaciones para obtener los parámetros requeridos de la batería, las cuales se obtuvieron en (Husain, 2010). La capacidad de una batería se define como la cantidad de electricidad que puede suministrar cuando se descarga, antes de que el voltaje entre sus terminales disminuya por debajo de su valor mínimo, conocido como *voltaje de corte*. La capacidad se representa con el símbolo C y se expresa en [Ah]. La capacidad para un tiempo de descarga en particular y una corriente dada se expresa por:

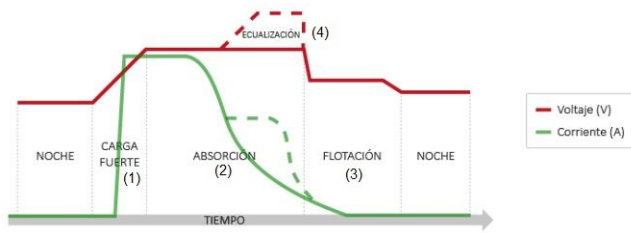


Figura 2. Etapas de carga de una batería

$$C = It \quad (1)$$

donde C es la capacidad de la batería en $[Ah]$, I es la corriente de descarga $[A]$ y t es el tiempo de descarga expresado en $[h]$.

Al hablar de tiempo de descarga es importante también tener en cuenta la capacidad de carga que permanece después de la descarga de una condición de carga máxima en la batería. Se obtiene integrando desde un tiempo inicial t_0 hasta el tiempo final t , la expresión del estado de carga instantáneo que se obtiene como sigue:

$$SoC_T(t) = Q_T - \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (2)$$

El estado de descarga (SoD) es una medida de la carga extraída de una batería. Matemáticamente, el estado de descarga se da de la siguiente manera

$$SoC_T(t) = Q_T - SoD_T(t) \quad (3)$$

En ese sentido también es importante hablar de la profundidad de descarga (DoD) que sufren las baterías al tiempo que ocurre un cambio en la demanda de energía. Este parámetro es el porcentaje de la capacidad de la batería (capacidad nominal) a la que se descarga una batería. La profundidad de descarga viene dada por la siguiente ecuación.

$$DoD(t) = \frac{Q_T - SoC(t)}{Q_T} \times 100\% = \frac{\int_0^t i(\tau) d\tau}{Q_T} \times 100\% \quad (4)$$

Cabe agregar que en la ecuación (5) nos sirve para calcular la capacidad de la batería y debe expresarse en coulombs $[C]$ y se representa en $[Wh]$, donde t_0 es el tiempo en que la batería está completamente cargada, t_{cut} es el tiempo en que las terminales de la batería son V_{cut} , v es el voltaje en terminales y es la corriente de descarga de la batería. E_p es dependiente en la forma en que se descarga la batería. En (6) obtenemos el parámetro de la energía específica donde P es la potencia entregada por la batería, y M_B es la masa de la batería. En la Tabla 2 observamos el resto de los parámetros de la batería utilizada en el banco de almacenamiento de energía para el VE de estudio.

$$E_p = \int_{t_0}^{t_{cut}} v i dt \quad (5)$$

$$SP = \frac{P}{M_B} \quad (6)$$

Tabla 2. Parámetros de la batería

Batería	Pb - acid
Voltaje nominal	12 V
Capacidad nominal	40 Ah
C_{10}	
Energía específica	35 Wh/kg
Densidad de energía	67 Wh/l
Máxima descarga continua de corriente	200 A (5C)
Temperatura de trabajo	- 20 to + 45°C
Profundidad de descarga (DoD)	500

3. DISEÑO DEL CONVERTIDOR

Un convertidor conmutado DC-DC es un circuito eléctrico el cual transfiere energía desde una fuente de voltaje DC hacia una carga de tal manera que las acciones de conmutación periódicas de los interruptores controlan la transferencia dinámica de energía desde la entrada a la salida, para producir una conversión (de voltaje y/o corriente) deseada en la salida (Ang et al., 2010). Con referencia a lo anterior, la topología que se diseña en este artículo es la tipo *buck-boost* que se presenta en la Figura 3, que es una combinación en cascada de un convertidor *buck* (reductor) y un convertidor *boost* (elevador). V_i representa el voltaje que otorga el banco de baterías y V_o representa el voltaje que va hacia el motor/generador. S_1/S_2 son los switch o conmutadores, C_1/C_2 son los capacitores que funcionarán como almacenadores de energía, D_1/D_2 son diodos que hace que el convertidor sea bidireccional y L es el inductor. El funcionamiento del convertidor es el siguiente:

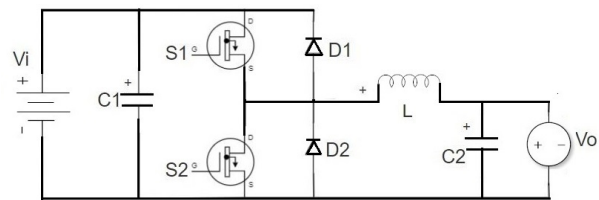


Figura 3. Convertidor Buck-Boost

Se presenta en la Figura 4, la primer función que es de tipo buck, es decir, cuando el VE se encuentra en movimiento; la energía se extrae del banco de baterías hacia el motor (movimiento de izquierda a derecha), provocando que el voltaje de alimentación sea variable. En ese sentido el comportamiento de cada componente cuando la corriente lo atraviesa se presenta en la Figura 5, donde $V_{(t)}$ es el ciclo de trabajo en On y Off, i_L es la corriente del inductor, i_{Q1} es la corriente del switch, i_{D2} es la corriente del diodo y C_2 es la corriente que se presenta en el capacitor que se obtiene mediante $i_{C2} = i_L - I_O$ donde I_O es la corriente de salida.

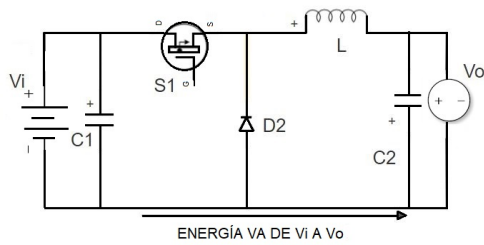


Figura 4. Modo Buck

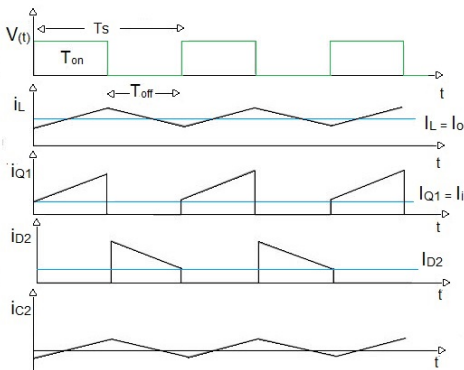


Figura 5. Formas de onda modo Buck On/Off

De la misma manera pero en la Figura 6, se presenta la segunda función que es de tipo boost, es decir, cuando el VE se encuentra frenando; ahora la energía se extrae del motor pero en modo generador, dirigiendola hacia el banco de baterías (movimiento de derecha a izquierda), provocando que el voltaje de alimentación sea variable y por lo tanto se tenga que elevar. En ese sentido el comportamiento de cada componente cuando la corriente lo atraviesa se presenta en la Figura 7, donde $V(t)$ es el ciclo de trabajo en On y Off, i_L es la corriente del inductor, i_{Q2} es la corriente del switch, i_{D1} es la corriente del diodo y C_1 es la corriente que se presenta en el capacitor que se obtiene mediante $i_{C1} = i_{D2} - I_O$ donde I_O es la corriente de salida.

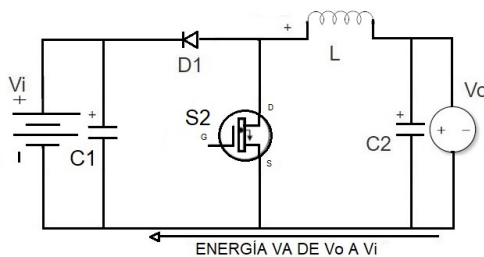


Figura 6. Modo Boost

Para obtener los cálculos del inductor y capacitor en modo buck se realizó mediante análisis de voltajes de Kirchhoff la siguiente ecuación del inductor:

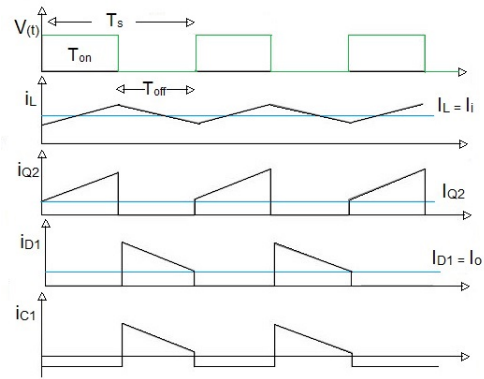


Figura 7. Formas de onda modo Boost On/Off

$$L = \frac{(V_i - V_o)DT_s}{\Delta i_L} \quad (7)$$

y del capacitor:

$$C_2 = \frac{\Delta i_L}{8\Delta V_{C2}f_s} \quad (8)$$

Para obtener los cálculos del inductor y capacitor en modo boost se realizó mediante análisis de voltajes de Kirchhoff la siguiente ecuación del inductor:

$$L = \frac{V_oDT_s}{\Delta i_L} \quad (9)$$

y del capacitor:

$$C_1 = \frac{I_oD}{\Delta V_{C1}f_s} \quad (10)$$

donde f_s es la frecuencia de muestreo, D es el ciclo de trabajo, Δi_L es el rizo de corriente del inductor, ΔV_{C1} y ΔV_{C2} son el rizo de corriente del $C1$ y $C2$ respectivamente, T_s es el periodo de conmutación y es igual a $\frac{1}{f_s}$.

4. RESULTADOS EN SIMULACIÓN

En Tabla 3 se establecen los parámetros de funcionamiento necesarios, para calcular los componentes que integran el convertidor y establecen las condiciones de funcionamiento del mismo, se muestran los parámetros del motor brushless que se pretende utilizar. Finalmente se presentan los valores del inductor y capacitor para cada modo del convertidor. El ciclo de trabajo para el modo buck es $D=0.86$ y para el modo boost $D=0.13$. El convertidor fue simulado en el software *PSIM*, el objetivo de simulación consiste en evaluar el desempeño del convertidor en los dos modos, tomando en cuenta valores reales tanto del motor que proveera los voltajes de entrada como de la batería analizada que será nuestra carga, por lo tanto se presentan los siguientes resultados: En la Figura 8 se observa la respuesta de funcionamiento de la topología buck, mostrando el voltaje de entrada

Tabla 3. Parámetros de funcionamiento

Parámetros de funcionamiento del Convertidor				
P_{salida} [W]	I_{salida} [A]	V_{max} [V]	$\Delta i_L, \Delta v_c$ [%]	f_s [kHz]
3000	55	63.6	30	50
Parámetros de funcionamiento en modo Buck				
Voltaje de entrada [V]	Voltaje de salida [V]	Corriente de salida [A]	Valor del L [μ H]	Valor del C1 [μ F]
60	52	46.5	22.53	2.23
Parámetros de funcionamiento en modo Boost				
Voltaje de entrada [V]	Voltaje de salida [V]	Corriente de salida [A]	Valor del L [μ H]	Valor del C2 [μ F]
52	60	20	22.53	3.33
Parámetros de funcionamiento del Motor				
Voltaje de entrada [V]	Potencia [W]	Corriente nominal [A]	Velocidad máxima [RPM]	
48/60/72	2200	55/46.5/38	3420	

V_i que lo otorgará el banco de baterías, el voltaje de salida V_o que corresponde hacia el motor brusless y la corriente de salida I_o , además del rizado que tendrá cada componente: $i_L = 13.95$ [A], $C2 = 15.6$ [V]. En la Figura 9 se observa el funcionamiento de la topología boost mostrando el voltaje de entrada V_i que lo otorgará el sistema cinemático teniendo anteriormente una conversión de AC-DC, el voltaje de salida V_o y la corriente de salida I_o que corresponden hacia el banco de baterías, además del rizado que tendrá cada componente: $i_L = 6$ [A], $C1 = 15.6$ [V].

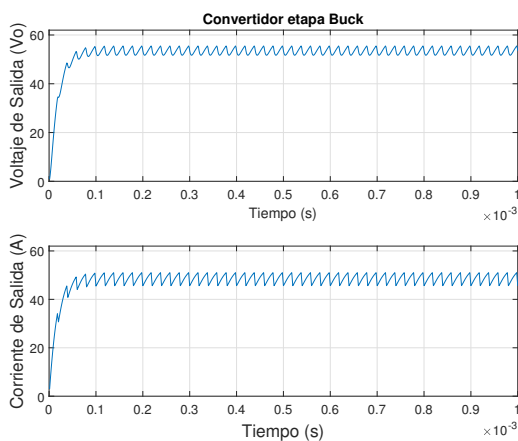


Figura 8. Corriente y voltaje en modo Buck

Esta última será la configuración principal que tendrá el convertidor ya que la energía que va a captar será enviada por el motor en modo generador a través de cada frenada que realice el vehículo siendo dicha energía menor que la requerida por el banco de baterías, es por ello que se decide por esta configuración, cabe resaltar que el valor del inductor no cambia con respecto a la topología buck.

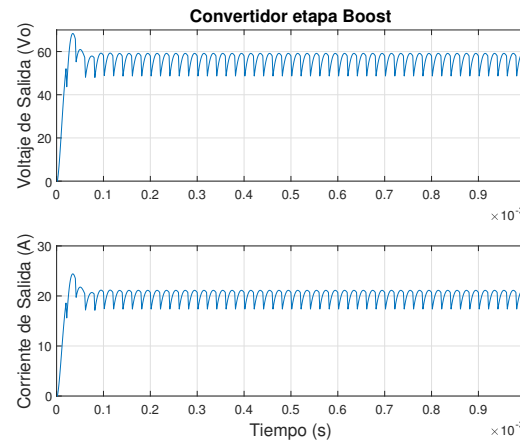


Figura 9. Corriente y voltaje en modo Boost

5. CONCLUSIONES

Se ha cumplido uno de los objetivos secundarios de este proyecto ya que se logró el análisis, diseño y simulación de un convertidor reductor-elevador bidireccional en cascada. Los resultados obtenidos de dicho convertidor en modo elevador (boost) cumple con la expectativa principal que es la recarga del banco de baterías del vehículo eléctrico, es por ello que fue de suma importancia modelar, saber su comportamiento, sus parámetros de carga y descarga de una de las baterías que conforman dicho banco.

REFERENCIAS

- Ang, S., Oliva, A., Griffiths, G., and Harrison, R. (2010). *Power-switching converters*. CRC press.
- Bosso, J.E., Oggier, G.G., and Garcia, G.O. (2016). Isolated buck/boost bidirectional dc-three phase topology. *IEEE Latin America Transactions*, 14(6), 2669–2674.
- Guzzella, L., Sciarretta, A., et al. (2007). *Vehicle propulsion systems*, volume 1. Springer.
- Husain, I. (2010). *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*. CRC press.
- Niasar, A.H. and Sabbaghean, A. (2017). Design and implementation of a low-cost maximization power conversion system for brushless dc generator. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(4), 571–580.
- Pedro, A.A. (2018). *Caracterización dinámica de un vehículo eléctrico*. B.S. thesis, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutierrez.
- Reyes, I., Claudio, A., Flores, E., and Lopez, M. (2018). Analysis of kinetic energy recovery system based on inertial flywheel. In *2018 14th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, 130–136. IEEE.
- Tremblay, O., Dessaint, L.A., and Dekkiche, A.I. (2007). A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. In *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 284–289. Ieee.
- Valencia, M.G. and Gómez, A.A. (2010). Diseño estático de un convertidor dc/dc reductor-elevador bidireccional. *Tecnura*, 14(26), 7–14.

Yang, M.J., Zhou, H.L., Ma, B.Y., and Shyu, K.K. (2009).
A cost-effective method of electric brake with energy
regeneration for electric vehicles. *IEEE Transactions
on Industrial Electronics*, 56(6), 2203–2212.

Detección de Acoplamiento de Receptor Inalámbrico para Manejo Eficaz de Potencia Mediante Buck Simétrico.

Ing. Luis A. Sotres Jara* Dr. Leobardo Hernández González**
M. en C. Marco Carbajal Retana*** Dr. Pedro Guevara López ****

Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME Culhuacan, CDMX, México * (lasotres@hotmail.com), ** (lhernandezg@ipn.mx),
*** (carbajalmarco@gmail.com), **** (pguevarra@ipn.mx).

Resumen: La transferencia inalámbrica de energía ha ido en auge debido a su gran versatilidad y facilidad de utilización para el usuario final, sin embargo, se continúa trabajando para alcanzar sistemas más eficientes. En este artículo se propone un método de control para el manejo eficaz de energía para un transmisor inalámbrico tipo inductivo, lo anterior mediante la detección de acoplamiento transmisor-receptor. Para generar la transmisión inalámbrica tipo inductiva se utilizó un esquema buck simétrico con carga resonante tipo paralelo. Basado en el comportamiento del voltaje del circuito resonante que se presenta cuando se acopla el modulo receptor, se propone la técnica de control de manejo de energía a través de las señales PWM en ráfaga. El principio de operación y las características del método propuesto se encuentran descritas a detalle en el desarrollo del artículo, la propuesta se validó mediante simulaciones y resultados experimentales, obteniéndose resultados que reducen el consumo energético de 21.1 Watts (sin detección de acoplamiento) a 1.9 Watts (con detección de acoplamiento), equivalente a una reducción del 91%.

Palabras clave: Transferencia Inalámbrica de Energía, Circuito resonante, Consumo Energético, Convertidores de Potencia.

1. INTRODUCCIÓN

La recarga inalámbrica ha ido en auge debido al creciente desarrollo y demanda de equipos portátiles, hoy en día existe una gran variedad de equipos que se pueden recargarse inalámbricamente (Ahmed et al., 2017) desde implantes médicos (Al-Kalbani et al., 2014), celulares (Riehl et al., 2015), hasta vehículos (Park et al., 2015).

La transferencia inalámbrica de energía WPT (del inglés *Wireless power transmission*) puede ser dividida en 3 categorías: transferencia de energía por medio inductivo (IPT, *Inductive power transmission*) (Liu et al., 2018), (Berger et al., 2015), transferencia de energía por medio capacitivo (CPT, *Capacitive power transmission*) (Zhou et al., 2017), (Dai and Ludois, 2015) y transferencia de energía por medio inductivo-capacitivo o híbrido (HPT, *Hybrid power transmission*).

El CPT utiliza principalmente el campo eléctrico para transmitir energía, este esquema presenta la ventaja de: diseño flexible, bajo volumen y peso en las estructuras transmisoras y receptoras, y la capacidad de penetrar por el metal, sin embargo, presenta como desventaja una separación de placas de algunos mm, la potencia de transmisión es muy baja en comparación con la de los sistemas IPT, para el CPT se han reportado potencias menores a 1kW, y distancias menores a 10mm (Dai and Ludois, 2015).

El IPT utiliza el campo magnético para transmitir energía, este esquema ofrece ventajas como son: capacidad de transmitir

mayor potencia con eficiencias reportadas de más de 94% (Lu et al., 2016), flexibilidad para utilizar diferentes topologías de transmisión y recepción, variedad de tipos de control (Liu et al., 2018), (Berger et al., 2015), el espacio entre transmisor y receptor es mayor que en un sistema CPT, mayor a 10mm.

La propuesta que a continuación se desarrolla, presenta algunas desventajas y ventajas en comparativa con otros controles reportados (Miller et al. 2015), la diferencia principal es que toda la parte del control se localiza en el dispositivo transmisor, esto podría llegar a ser una desventaja debido a que no hay una interacción entre transmisor y receptor, sin embargo, una de las principales ventajas es que el control es relativamente sencillo de implementar y que la respuesta al cambio es rápida debido a que no es necesario un sistema de telemetría.

La estructura de este artículo es la siguiente. En la sección 2, se presenta el circuito eléctrico de transmisión de energía, al cual se propondrá la técnica de reducción de consumo, se describen las características de diseño del prototipo y se hace la propuesta de control para modo acoplado y no acoplado. En la sección 3, se muestran los resultados obtenidos de simulación y experimentales, y finalmente en la sección 4 se presenta un análisis de los principales resultados obtenidos del control propuesto.

2. TRANSMISOR INALÁMBRICO TIPO INDUCTIVO

2.1. Circuito eléctrico propuesto

En la Fig. 1, se presenta el circuito eléctrico propuesto para el transmisor inalámbrico tipo inductivo, este está integrado con tres bloques básicos, remarcado en color rojo se indica el convertidor Buck-1, en color azul el convertidor Buck-2, en verde el inversor de medio puente y en gris el circuito resonante paralelo. Para lograr un convertidor compacto para la adecuada generación de la señal sinusoidal, el capacitor de filtrado es compartido por cada Buck y el circuito resonante, la integración de Cout con Ltx permite obtener una señal sinusoidal con baja distorsión armónica y al mismo tiempo condiciona un bajo nivel de rizo a la salida de cada Buck.

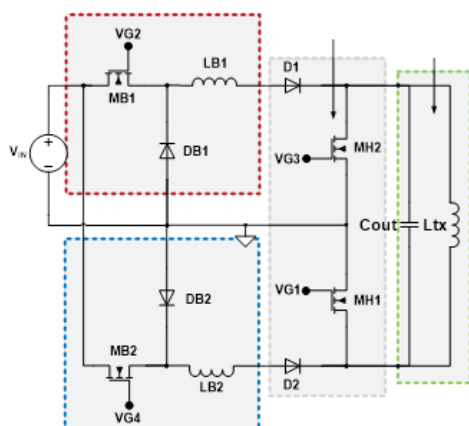


Fig 1. Propuesta de Transmisor Inalámbrico.

La operación del transmisor se basa en el control de 2 señales PWM complementarias y 2 señales PWM tipo ráfaga (PWM-Burst), las cuales se muestran en la Fig. 2. La sincronización y el control de las 4 señales (PWM complementarias y PWM-Burst) generan una señal cuadrada bipolar, donde el control de ganancia de cada buck condiciona la amplitud máxima de la señal cuadrada bipolar. La aplicación de la señal cuadrada bipolar a la carga resonante, Cout-Ltx, genera una señal sinusoidal con amplitud pico igual a la amplitud de salida del buck simétrico, con baja distorsión armónica, ver Fig. 3.

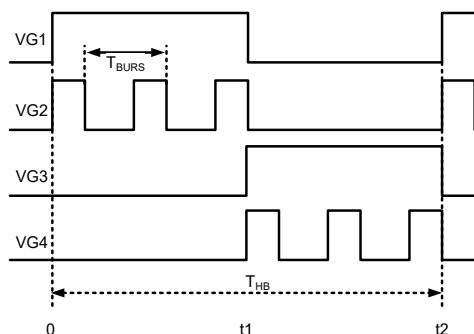


Fig 2. PWM-Burst (convertidor) y PWM-complementario (inversor).

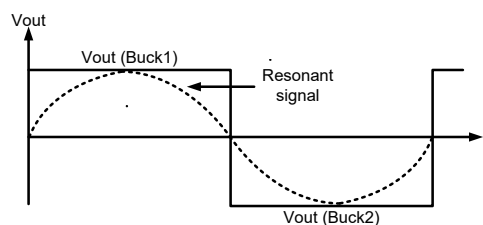


Fig 3. Voltaje aplicado a circuito resonante y señal sinusoidal obtenida.

Para lograr una correcta operación del transmisor inalámbrico, los periodos de las señales de conmutación de los MOSFET del medio puente (MH1 and MH2) deben ser múltiplos de las señales de los MOSFET de los Buck (MB1 and MB2), ya que se debe de asegurar que todos los pulsos PWM-Burst entren en la ventana de activación de los MOSFET del medio puente.

2.2 Diseño del Prototipo

Para comprobar el principio de operación del transmisor, se procedió a diseñar un prototipo para una potencia máxima de transmisión de 15Watts. Las especificaciones de diseño se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones de diseño

Vin	15 V
Voutpico	27 V
Ioutpico	700 mA
F _{Burst}	500 KHz
F _{HB}	100 KHz
Ltx	6.3 μH
r _{Lr}	17mΩ

El procedimiento de cálculos se puede encontrar a detalle en Cabrera, *et al.*, 2018.

2.3 Diseño del control para modo reposo.

La base para realizar el diseño del control del transmisor parte de la ecuación de ganancia del convertidor Buck, expresión (1), (Park et al., 2015).

$$M = D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (1)$$

La ecuación (1) puede ser reescrita como se muestra en la expresión (2).

$$V_{out} = D * V_{in} \quad (2)$$

De (2) se deduce que al controlar la ganancia de los convertidores Buck, se altera directamente la amplitud pico con la que se energiza al circuito resonante. Al ser un circuito simétrico si se modifican ambos ciclos de trabajo se modifica la

amplitud pico a pico de manera simétrica en la sinusoide obtenida en el circuito resonante. El diseño del control se basa en dos comportamientos:

Comportamiento 1. Cuando el transmisor no se encuentra acoplado a un circuito receptor que genere una carga, el voltaje pico a pico de la sinusoide obtenida en el circuito resonante está dado por la ganancia del Buck como se muestra en la Fig. 4

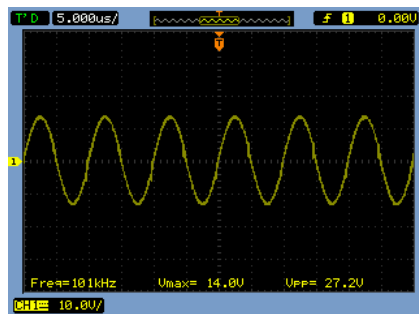


Fig. 4. Voltaje en el circuito resonante (sin acoplamiento).

Comportamiento 2. Cuando el transmisor se encuentra acoplado a un circuito receptor que energiza una carga, el voltaje pico a pico de la sinusoide obtenida en el circuito resonante presenta una caída de voltaje y una distorsión como se observa en la Fig. 5.

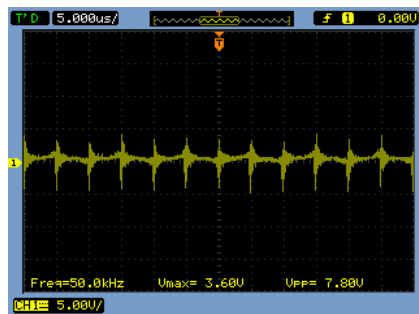


Fig. 5. Voltaje en el circuito resonante (con acoplamiento).

En base a los dos comportamientos anteriores se diseña el lazo de control para el manejo eficiente en modo reposo (sin acoplamiento), mediante la programación de dos modos de operación en el transmisor, las condiciones de diseño son las siguientes:

El modo 1 reduce la ganancia en los Buck hasta el punto en el que el transmisor es capaz de transmitir a una distancia máxima de 80mm a mínima potencia, la condición anterior permitirá detectar cuando un circuito receptor se acople.

El modo 2 se activará cuando se detecte que hay un circuito receptor acoplado al transmisor, en este caso la ganancia del Buck aumenta hasta lograr la potencia nominal requerida.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados de simulación.

Para la validación del diseño de control propuesto en el transmisor inductivo, se procedió a obtener resultados de simulación mediante un modelo implementado y validado en MATLAB, el cual se muestra en la Fig. 6.

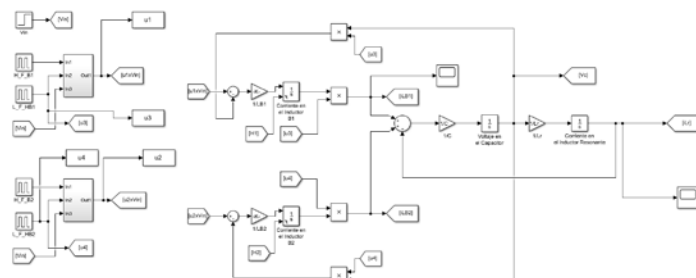


Fig. 6. Modelo de Buck simétrico.

En la Fig. 7, se muestran las señales de control de cada Buck con un ciclo de trabajo del 90%, en la Fig. 8 se muestra la señal de salida obtenida en el circuito resonante, este representa el caso de operación dos en el cual se desea entregar la máxima potencia a la carga.

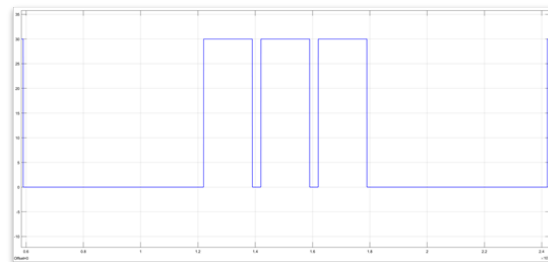


Fig. 7. Señal de control Burst con D=90%.

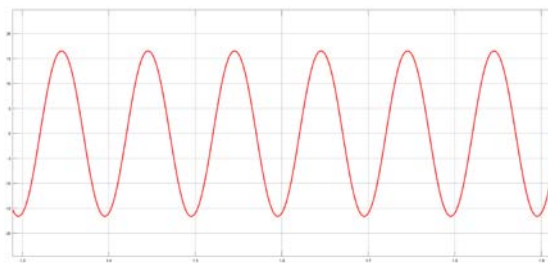


Fig. 8. Señal en el circuito resonante con D=90%.

En la Fig. 9, se muestra la señal de control de cada Buck con un ciclo de trabajo del 30%, en la Fig. 10 se muestra la señal de salida obtenida en el circuito resonante, este representa el caso de operación 1, en el cual se desea transmitir la mínima potencia para el caso "sin carga acoplada".

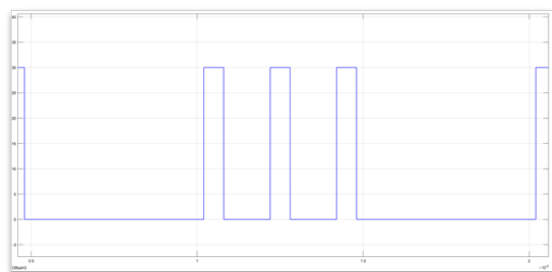


Fig. 9. Señal de control Burst con D=30%.

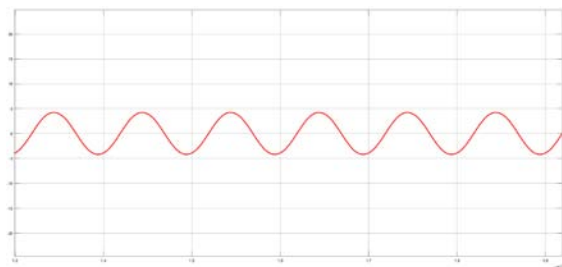


Fig. 10. Señal en el circuito resonante con D=30%.

3.2 Resultados experimentales.

Para la validación experimental se procedió a probar el prototipo experimental con los valores indicados en la Tabla 1. En la Fig. 11, se muestra la señal de control de MH1 en la parte superior y la señal de control de MB1 en la parte inferior.

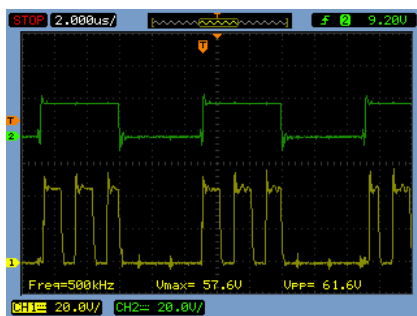


Fig. 11. Señales de control de MH1 y MB2.

En la Fig. 12, se observan las señales de control de MH1 y MB1 con un ciclo de trabajo del 30%, estas señales representan la operación del transmisor en el caso de operación 1, en el cual se desea utilizar la mínima potencia de transmisión. En la Fig. 13 se muestra la señal de salida obtenida en el circuito resonante y el espectro en frecuencia de la misma.

En la Fig. 14 se observan las señales de control de MH1 y MB1 con un ciclo de trabajo de 90%, estas señales representan el caso de operación 2, en el cual se desea entregar la máxima potencia a la carga, en la Fig. 15 se encuentra la señal obtenida en el circuito resonante y su espectro en frecuencia, donde se comprueba el valor teórico indicado en la ecuación (2).

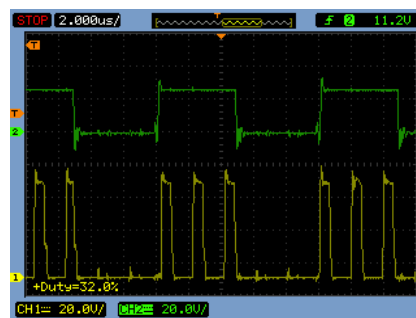


Fig. 12. Señales de control para modo de operación 1.

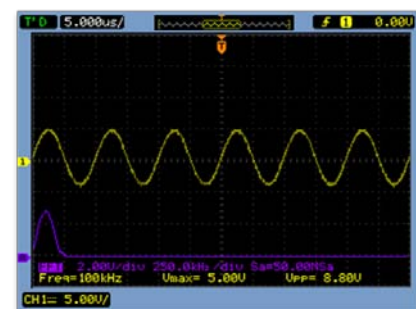


Fig. 13. Señal en el circuito resonante con D=30%.



Fig. 14. Señales de control para caso de control 2.

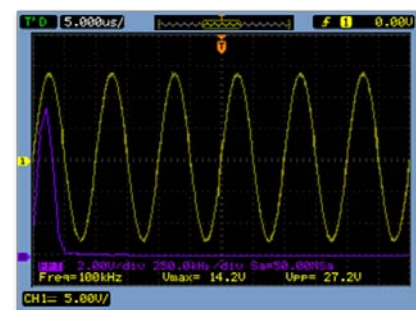


Fig. 15. Señal en el circuito resonante con D=90%.

Se destaca la comparación del espectro en frecuencia entre la Fig. 13 y la Fig. 15, en donde se observa que la mayor concentración de la energía se encuentra en la frecuencia fundamental de 100kHz y al aumentar el ciclo de trabajo esta misma componente aumenta en magnitud.

En la Tabla 2, se resumen los principales resultados obtenidos en el desarrollo de la propuesta, de este modo queda validado que el caso de operación 1 reduce la potencia consumida del prototipo y para el caso de operación 2 la potencia es máxima de acuerdo a la carga acoplada.

Tabla 2. Resultados experimentales.

D	Modo de operación	Receptor Acoplado	Potencia consumida, tx
30%	Modo 1	No	1.9W
30%	Modo 1	Si	3.4W
90%	Modo 2	Si	21.1W
90%	Modo 2	No	12.6W

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se propuso un método de control para el manejo eficaz de energía del transmisor inalámbrico tipo inductivo, el cual está basado en un circuito Buck inversor simétrico, a partir del análisis de comportamiento de las señales en el circuito resonante, se planearon 2 modos de operación, el primero (modo reposo) en el cual se desea obtener solo la potencia mínima requerida para transmitir a 80 mm y lograr sensar si hay un circuito receptor acoplado, el segundo modo (modo acoplado) en el cual se requiere obtener la potencia máxima para carga inalámbrica. Se validó la propuesta de control mediante simulaciones y un prototipo físico, obteniendo resultados que reducen la potencia de transmisión en un 91% con respecto a la potencia de transmisión sin acoplamiento. Más específicamente se redujo de 21.1W a 1.9W.

La principal ventaja de la propuesta es el ahorro energético y la rápida acción de cambio entre modos de operación, El método de control propuesto puede ser mejorado si se implementa un controlador que actúe únicamente en el segundo modo de operación, de esta manera se espera compensar la diferencia de potencial en la bobina transmisora mediante la variación del ciclo de trabajo, logrando así la recepción de potencia constante en el receptor.

Finalmente, la propuesta funciona eficazmente en sistemas transmisores menores a 50 watts, como trabajo a futuro se están realizando estudios más rigurosos, que permitan el control óptimo de energía a la bobina de transmisión a potencias mayores a 50watts.

REFERENCIAS

Ahmed A. S. Mohamed, A. A. Marim, and O. A. Mohammed. (2017). *Magnetic Design Considerations of Bidirectional Inductive Wireless Power Transfer System for EV Applications*, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 53, No. 6, pp. 8700105-8700105.

Al-Kalbani A. I., Yuce M. R., and Redoute J. (2014). *A biosafety comparison between capacitive and inductive coupling in biomedical implants*, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 13, No. 1, pp. 1168-1171.

Berger Andreas, Agostinelli Matteo, Vesti Sanna, Oliver Jesús A., Cobos José A. and Huemer Mario. (2015). *A Wireless Charging System Applying Phase-Shift and Amplitude Control to Maximize Efficiency and Extractable Power*, IEEE Transaction on power Electronics, VOL. 30, NO. 11, pp. 6338-6348.

Cabrera J. C., Rubio J. F. M., Hernández L. and Retana M. C. (2018). *Modeling and Control of a Novel Buck Inverter with Application to Inductive Wireless Power Transmission*, 14th International Conference on Power Electronics (CIEP), Cholula, 2018, pp.77-82.

Dai J. and Ludois D. (2015). *A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications*, IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 11, pp. 6017-6029.

Fei Lu, Hua Zhang, Heath Hofmann and Chunting Chris Mi. (2016). *An Inductive and Capacitive Combined Wireless Power Transfer System With LC-Compensated Topology*, IEEE Transaction on power Electronics, Vol. 31, No. 12, pp. 8471-8482.

Liu X., Clare L., Yuan X., Wang J., Wang C. and Liu J.. (2018). *Constant Output Power Control Methods for Variable-Load*, Wireless Power Journal of Power Electronics, Vol. 18, No. 2, pp. 533-546.

Miller J. M., Onar O. C. and Chinthavali M. (2015). *Primary-Side Power Flow Control of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging*, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 1, pp. 147-162.

Park C., Lee S., Jeong S., Cho G., and Rim C. T. (2015). *Uniform power Itype inductive power transfer system with DQ-power supply rails for electric vehicles*, IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 11, pp. 6446-6455.

Riehl P. S., Satyamoorthy A., Akram H., Yen Y.-C., Yang J.-C., Juan B., Lee C.-M., Lin F.-C., Muratov V.. (2015). William Plumb and Philip F. Tustin, *Wireless Power Systems for Mobile Devices Supporting Inductive and Resonant Operating Modes*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 63, No. 3, pp. 780-790.

Zhou W., Su Y.-G., Xie S.-Y., Chen L., Dai X. and Zhao Y.-M. (2017). *An Interference Isolation Method for Wireless Power and Signal Parallel Transmissions on CPT Systems*, Journal of Power Electronics, Vol. 17, No. 1, pp. 305-313.

Observer design for heart dynamics estimation^{*}

Dulce-A. Serrano Cruz,^{*} Carlos-M. Astorga-Zaragoza,
Gerardo-V. Guerrero-Ramírez, Juan Reyes-Reyes,
Carlos-D. García-Beltrán

^{*} *Tecnológico Nacional de México, CENIDET, Cuernavaca, Mor.,
Mexico, C.P. 62490.*

e-mail: alejandra.serrano17ee@cenidet.edu.mx

Abstract: An observer-based state estimation method for the cardiovascular system is presented in this work. The approach is based on the use of a four-element windkessel model which allows to design state observers to estimate the systemic pressure and the aortic blood flow for monitoring purposes. Two different observers are designed: (i) a Luenberger observer and (ii) a proportional observer for descriptor systems. These observers are tested through numerical simulations in order to perform a comparative study

Keywords: cardiovascular system, windkessel model, observer, singular system.

1. INTRODUCTION

An interesting lumped-parameter representation of the dynamics of the blood pumped by the heart through the arterial system is the four-element windkessel model Stergiopoulos et al. (1999), Kind et al. (2010). Although distributed cardiovascular system models provide a greater number of physiologically meaningful parameters and a more realistic representation of the cardiovascular system dynamics (see e.g. Ravanshadi and Jahed (2012), Safaei et al. (2016)), the four-element windkessel model has many important conveniences (refer to Westerhof et al. (2009) for a complete study about the advantages of the four-element windkessel model), for instance:

- a) its simplicity. A few interconnected elements are enough to reproduce the main dynamics of the cardiovascular system;
- b) there is a clear analogy between the electrical elements and the hydraulic components involved in the windkessel effect. Consequently, they are easily related with the hemodynamic meaning and the ventriculo-arterial coupling;
- c) it is highly suitable for developing state-space control algorithms, particularly applied to assisted heart devices.

Concerning observer-based estimation in human biological systems, very few works are found in literature. For example, in Orozco-López et al. (2018) an observer-based time-varying Luenberger observer to estimate the unmeasurable states in patients with type 1 diabetes is presented. In Imamasu et al. (2014), an adaptive observer for state esti-

mation of heart rhythm dynamics is designed. A Kalman filter for fault detection in the cardiovascular system is developed in Belkhatir et al. (2014) and a similar work is presented by Diaz-Ledezma and Laleg-Kirati (2015). This paper intends to offer a new perspective to develop different monitoring methods for cardiac problems based on non-invasive measurements.

In this work, the approach is based on a state-space representation of the well known windkessel model (Section 2). This model is used to design two observers for state estimation (Section 3). Numerical simulations are performed (Section 4) in order to test the capabilities of the proposed observers to monitor the cardiovascular activity. The main contribution of this work is to propose an alternative method based on model-based observers for monitoring cardiovascular dynamics. The proposed approach can open the way for possible future development of a wider range of applications to detect cardiovascular diseases.

2. THE FOUR-ELEMENT WINDKESSEL MODEL

The four-element windkessel model is given by the following equations Kind et al. (2010):

$$\begin{aligned}\dot{P}_p &= -\frac{1}{RC_a}P_p + \frac{1}{C_a}F_a \\ \dot{F}_L &= -\frac{Z_0}{L}F_L + \frac{Z_0}{L}F_a \\ P_a &= P_p + Z_0F_a - Z_0F_L\end{aligned}\tag{1}$$

where P_p is the pressure over the arterial compliance, F_L is the flow through the total arterial inertance, F_a and P_a are the flow through the aorta or pulmonary artery (the input of the system) and the aortic pressure (the output of the system) respectively. The parameters of the model are the arterial compliance C_a , the inertia of blood flow L , the peripheral resistance R and the characteristic impedance

^{*} Dulce-A. Serrano Cruz is PhD student in the Department of Electronics Engineering, Tecnológico Nacional de México, CENIDET, Cuernavaca, Mor., Mexico, C.P. 62490.
E-mail: alejandra.serrano17ee@cenidet.edu.mx

of the proximal part of the arterial bed Z_0 .

This model can be written in state-space form as follows:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (2)$$

where $x(t) = [P_p(t) \ F_L(t)]^T$ is the state vector, $u(t) = F_a(t)$, $y = P_a$ are the input and the output respectively and

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC_a} & 0 \\ 0 & -\frac{Z_0}{L} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_a} \\ \frac{Z_0}{L} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ -Z_0], \quad D = Z_0.$$

2.1 The windkessel model in singular descriptor form

In this subsection a versatile representation of the windkessel model is presented for observation and control purposes. The authors in ? presented this model for state estimation purposes. In this work a state and fault estimation application is developed, allowing (in future works) a wider use for biomedical applications, such as simulators for medical training or fault monitoring systems.

By using some basic algebraic operations, the mathematical model (1) can be represented in the following singular descriptor form:

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3)$$

where $x(t) = [P_p(t) \ F_L(t) \ P_a(t)]^T$ is the state vector (T is used to denote the transpose operation), $u(t) = F_a(t)$ and $y(t) = P_a(t)$.

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC_a} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{Z_0}{L} & 0 \\ 1 & -Z_0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_a} \\ \frac{Z_0}{L} \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad C = [0 \ 0 \ 1]$$

The main advantage of this representation of the windkessel model is that the measured output y depends only on the aortic pressure $P_a = x_3$. This measurement is possible to be performed via non-invasive methods, see for instance Naidu and Reddy (2012).

3. STATE ESTIMATION OBSERVERS

In this section, two state observers are proposed for monitoring purposes of the heart dynamics:

- A Luenberger observer for system (2).
- A proportional observer for system (3).

3.1 Luenberger observer.

In order to design an observer for system (2), the following well known observability assumption (A0) must be satisfied:

$$(A0) \text{ rank } \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = n$$

If assumption A0 is verified, a Luenberger observer for system (2) is given by:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{x} + Du \end{aligned} \quad (4)$$

where $\hat{x} \in \mathbf{R}^n$ is the estimated state vector. The observer gain L is a constant matrix of appropriate dimensions.

It can be easily demonstrated that the observer stability depends of the dynamics of the error equation given by:

$$\dot{e} = (A - LC)e \quad (5)$$

where $e = x - \hat{x}$.

In conclusion, the observer converges if matrix $A - LC$ has its eigenvalues in the left-hand side of the complex plane.

3.2 Proportional observer for descriptor systems.

In order to design an observer for system (3), the following assumptions (A1, A2) must be satisfied:

$$(A1) \text{ rank } \begin{bmatrix} E \\ C \end{bmatrix} = n$$

If assumption (A1) is verified, then it is possible to compute (via singular value decomposition of matrix $[E \ C]^T$)

a nonsingular matrix $M = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \xi \end{bmatrix}$ such that

$$\begin{aligned} \alpha E + \beta C &= I_n \\ \gamma E + \xi C &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

where α, β, γ and ξ are constant matrices of appropriate dimensions.

$$(A2) \text{ The pair } \left[\alpha A, \begin{bmatrix} \gamma A \\ C \end{bmatrix} \right] \text{ is detectable.}$$

If assumptions A1, A2 are verified, an adequate observer for system (3) is given by:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Nz + (L_1 + L_2)y + Gu \\ \hat{x} &= z + \beta y + K\xi y \end{aligned} \quad (7)$$

where $z \in \mathbf{R}^n$ is the state of the observer and $\hat{x} \in \mathbf{R}^n$ is the estimated vector. The observer gains G, K, L_1, L_2, N are constant matrices of appropriate dimensions.

It can be easily demonstrated that the observer stability depends of the dynamics of the error equation given by:

$$\dot{e} = (A - KC)e \quad (8)$$

where $e = x - \hat{x}$, $A = \alpha A$, $K = [-K \ L_2]$ and $C = \begin{bmatrix} \gamma A \\ C \end{bmatrix}$.

The observer gains N , G and L_1 are:

$$N = K\gamma\Phi + \alpha\Phi - L_2C \quad (9)$$

$$G = (\alpha + K\gamma)\Lambda \quad (10)$$

$$L_1 = N(\beta + K\xi) \quad (11)$$

In conclusion, the observer converges if matrix $N = A - KC$ has its eigenvalues in the left-hand side of the complex plane.

4. STATE ESTIMATION OF THE CARDIOVASCULAR SYSTEM

In this section, two observers are developed to estimate the dynamics of the cardiovascular variables. For this end, assume that the flow through the aorta F_a is as depicted in Fig. 1. Then, $F_a = u$ is the input signal of the models (2) and (3).

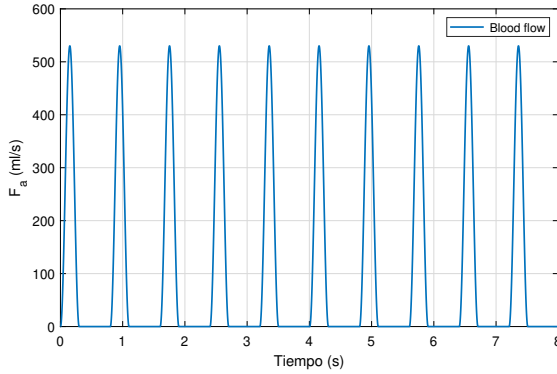


Fig. 1. The flow through the aorta F_a .

These parameters are taken from Kind et al. (2010), resembling physiology in normal condition (normotensive blood pressure) and are originally assessed in Stergiopoulos et al. (1999) and Segers et al. (2000). The parameters of the windkessel model are:

Table 1. Parámetros cardiovasculares.

Parámetros	Normal	Unidades
R	0.95	$mmHg.s/ml$
L	0.01	$mmHg.s^2/ml$
C_a	1.50	$ml/mmHg$
Z_o	0.033	$mmHg.s/ml$

4.1 Luenberger observer design.

It should be noted that $rank \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = 2$.

Consequently, Assumption A0 is verified.

The observer gain L is computed such that the eigenvalues of the stability matrix $A - LC$ are located at $\lambda_1 = -3$ and $\lambda_2 = -0.7$.

4.2 Proportional observer for the descriptor representation.

It should be noted that $rank \begin{bmatrix} E \\ C \end{bmatrix} = 3$.

Consequently, Assumption A1 is verified. Matrices α , β , γ and ξ are computed via singular value decomposition of matrix $\begin{bmatrix} E \\ C \end{bmatrix}$:

$$\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \gamma = [0 \ 0.99]$$

and $\xi = [0 \ 0.9]$. Then, Assumption 2 is also verified.

In consequence, an observer having the form given in (7) can be designed in order to estimate the unknown states $x_1 = P_p$, $x_2 = F_L$, based on the knowledge of the aortic pressure $y = P_a$ and the input $u = F_a$ (see e.g. Naidu and Reddy (2012) and Boulnois and Pechoux (2000) which describe non-invasive methods to measure these variables).

By following the steps in the proposed algorithm in section 3, the observer gains are:

$$G = \begin{bmatrix} 0.8175 \\ 10.6123 \\ 3.9936 \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} -0.1973 \\ 0.2794 \\ -0.5000 \end{bmatrix}$$

$$L_1 = \begin{bmatrix} -70.1704 \\ 41.0016 \\ -0.5000 \end{bmatrix} \quad L_2 = \begin{bmatrix} 70.2084 \\ -34.4282 \\ -70.8141 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} -0.6855 & 0.0021 & -70.1704 \\ -6.5734 & -10.6123 & 41.0016 \\ 71.3141 & -3.9936 & -0.5000 \end{bmatrix}$$

where the eigenvalues of matrix N are at the left-hand side of the complex plane at $v_1 = -0.5728$, $v_2 = -0.5728$, $v_3 = -10.6522$ and then, the observer is stable.

Simulation results are depicted in Fig. 2. The estimated pressure over the arterial compliance $\hat{x}_1 = \hat{P}_p$, the estimated flow through the total arterial inertance $\hat{x}_2 = \hat{F}_L$ and the estimated aortic pressure $\hat{x}_3 = \hat{P}_a$ (dotted lines) converge adequately to the simulated cardiovascular variables P_p , F_L and P_a (solid lines), respectively.

5. CONCLUSION

Two observer-based for state estimation for monitoring purposes of the cardiovascular system are presented. The observers are designed via the windkessel model which consists of a state-space model in both, a LTI form and a singular form. The main advantage of the second representation is the possibility to incorporate a wider range of applications of the control theory for research projects on cardiovascular diseases. The observers performance are shown through simulations to estimate the pressure over the arterial compliance P_p and the flow through the total

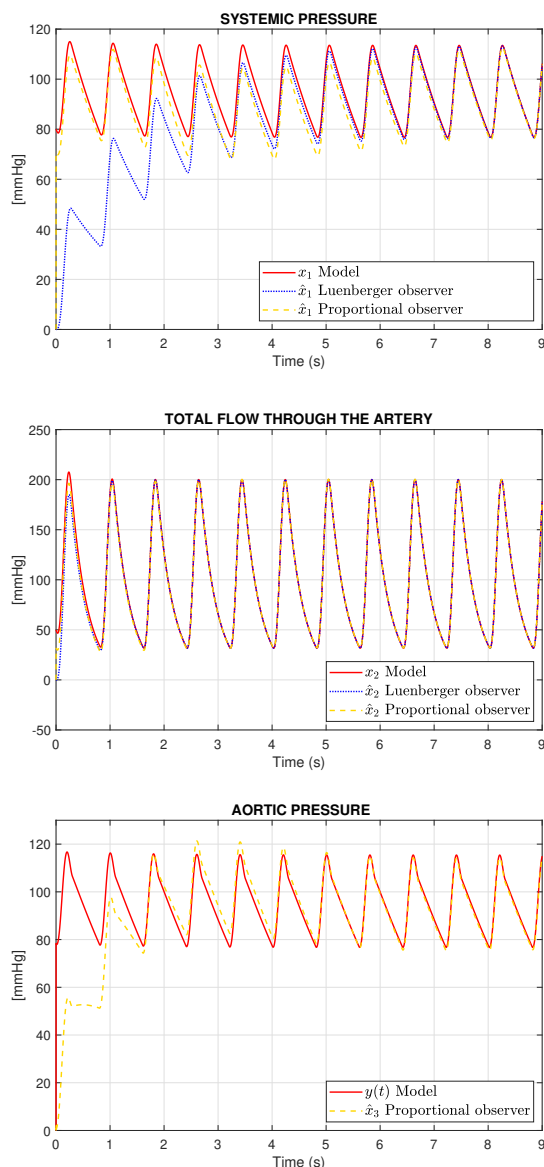


Fig. 2. Estimation of the cardiovascular variables P_p , F_L , P_a .

arterial inertance F_L based on the measure of the aortic pressure P_a .

ACKNOWLEDGEMENT

This work is supported by Tecnológico Nacional de México and CONACyT.

REFERENCES

- Belkhatir, Z., Laleg-Kirati, T.M., and Tadjine, M. (2014). Residual generator for cardiovascular anomalies detection. In *2014 European Control Conference (ECC)*, 1862–1868. IEEE.
- Boulnois, J.L.G. and Pechoux, T. (2000). Non-invasive cardiac output monitoring by aortic blood flow measurement with the dynemo 3000. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 16(2), 127–140.
- Diaz-Ledezma, F. and Laleg-Kirati, T.M. (2015). A first approach on fault detection and isolation for cardiovas-

- cular anomalies detection. In *2015 American Control Conference (ACC)*, 5788–5793. IEEE.
- Imamasu, K., Matoba, C., Suemitsu, H., and Matsuo, T. (2014). Parameter estimation of heart rhythm dynamics using adaptive observer. In *Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, 73–77. IEEE.
- Kind, T., Faes, T.J., Lankhaar, J.W., Vonk-Noordegraaf, A., and Verhaegen, M. (2010). Estimation of three- and four-element windkessel parameters using subspace model identification. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 57(7), 1531–1538.
- Naidu, M. and Reddy, C.P. (2012). Non-invasive measurement of aortic pressure in patients: Comparing pulse wave analysis and applanation tonometry. *Indian Journal of Pharmacology*, 44(2), 230.
- Orozco-López, J.O., Castañeda, C.E., Rodríguez-Herrero, A., García-Sáez, G., and Hernando, E. (2018). Linear time-varying Luenberger observer applied to diabetes. *IEEE Access*, 6, 23612–23625.
- Ravanshadi, S. and Jahed, M. (2012). Introducing a distributed model of the heart. In *2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 419–424. IEEE.
- Safaei, S., Bradley, C.P., Suresh, V., Mithraratne, K., Muller, A., Ho, H., Ladd, D., Hellevik, L.R., Omholt, S.W., Chase, J.G., Müller, L.O., Watanabe, S.M., Blanco, P.J., de Bono, B., and Hunter, P.J. (2016). Roadmap for cardiovascular circulation model. *The Journal of Physiology*, 594(23), 6909–6928.
- Segers, P., Stergiopoulos, N., and Westerhof, N. (2000). Quantification of the contribution of cardiac and arterial remodeling to hypertension. *Hypertension*, 36(5), 760–765.
- Stergiopoulos, N., Westerhof, B.E., and Westerhof, N. (1999). Total arterial inertance as the fourth element of the windkessel model. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 276(1), H81–H88.
- Westerhof, N., Lankhaar, J.W., and Westerhof, B.E. (2009). The arterial windkessel. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 47(2), 131–141.

Diseño de Prototipo Conversor de Energía Undimotriz a Energía Eléctrica

Hugo Alberto Solís Martínez, Gabriella Itzel Chavarría Macías,
Noé Toledo González

Universidad Tecnológica de Matamoros, Carretera Matamoros-Reynosa Km. 8.5 Ej. Guadalupe (tel: 8681533443 e-mail: hugo.solis@utmatamoros.edu.mx) Universidad Tecnológica de Matamoros, Carretera Matamoros-Reynosa Km. 8.5 Ej. Guadalupe (gabriella.chavarria@utmatamoros.edu.mx), Universidad Tecnológica de Matamoros, Carretera Matamoros-Reynosa Km. 8.5 Ej. Guadalupe (e-mail: noe.toledo@utmatamoros.edu.mx)

Resumen: Durante muchos años el uso desmedido de hidrocarburos como fuente de generación eléctrica y la gran variedad de productos que de ellos derivan ha ocasionado una gradual disminución de los mismos. Su explotación y quema esta ocasionando fuertes cambios climáticos, además de ser procesos altamente contaminantes. Es por eso la urgencia de desarrollar fuentes de energías limpias y renovables que ayuden a sustituir parcialmente de manera eficiente y rentable a las fuentes de energía producida con combustibles fósiles, como son la energía fotovoltaica, eólica, hidráulica, geotérmica, solar etc. Los océanos también proveen una gran cantidad de energía a partir de las mareas y de las olas marinas conocidas como energía undimotriz. En nuestro país durante el año anterior se registra el 75.88% de la energía eléctrica utilizada en el país es de fuentes fósiles, 17.29% de energías renovables y 6.83% de otras energías limpias. La energía de las olas o energía undimotriz es una alternativa consistente basada en la fuerza de las olas a lo largo de los océanos. El diseño mecánico del conversor de energía se basa en el aprovechamiento de la energía cinética y potencial de las olas de los océanos de manera vertical para que el mecanismo biela manivela lo transforme en movimiento circular que haga girar el tren de engranes produciendo las revoluciones en el generador eléctrico convencional. La investigación demuestra la factibilidad del uso del conversor de energía, con la alternativa de uso en plataformas petroleras.

Palabras clave: energía renovable, energía undimotriz, conversor de energía, combustibles fósiles.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace más de dos siglos la evolución social, industrial y tecnológica a derivado en el consumo excesivo de combustibles fósiles, debido a una infinidad de productos que de ellos provienen así como una dependencia de la energía eléctrica a la que se está sujeto el desarrollo tecnológico, siendo los hidrocarburos la principal materia de generación eléctrica en el país y en el mundo, colocando esta situación en un dilema ya que de un lado está el desarrollo y bienestar de la humanidad y por otro lado el cobro de nuestro planeta por la gran contaminación que el uso de estos conlleva.

De ahí el pensar seriamente en la necesidad de dar un giro a nuestra dependencia energética haciendo uso de las fuentes renovables que nos ofrece nuestro planeta, debido a los efectos casi nulos que este tipo de energía produce.

Existen diferentes tipos de energía que se aprovechan en los océanos, para la conversión a energía eléctrica, entre las más

viabiles se consideran: la energía undimotriz, la energía mareomotriz y los gradientes salinos.

La energía undimotriz se define como aquella que es obtenida a través de la captación de la energía cinética contenida en el movimiento de las olas, Energía Undimotriz (2015, a). Esta energía del mar es considerada la más joven y menos exploradas de las energías oceánicas, donde lo estudios realizados indican que existe un gran potencial. La energía undimotriz está dividida en primera, segunda y tercera generación de acuerdo a la profundidad del suelo marino donde esté instalado el dispositivo conversor.

El potencial undimotriz es grandísimo y su distribución al igual que las demás energías renovables es desigual en todo el planeta, en la siguiente (fig. 1). Se muestra la distribución del recurso mundial de energías de las olas.



Fig.1 Recurso mundial de energía de las olas. Los números representan el flujo de energía promedio en (kwm) UPPSALA.

1.1 Las olas como recurso energético

Las olas son ondas que se desplazan por la superficie de los mares y océanos, son puestas en marcha por el viento, y representan el principal agente modelador de las costas.

Las olas se caracterizan por tener:

- Longitud de onda (L): Distancia entre dos picos consecutivos.
- Altura de onda (H): Diferencia entre un pico y un valle.
- Periodo (T):
- Tiempo (en segundos) que tarda un valle o un pico de la ola en recorrer su longitud de onda. Como se muestra a continuación en la (fig. 2).

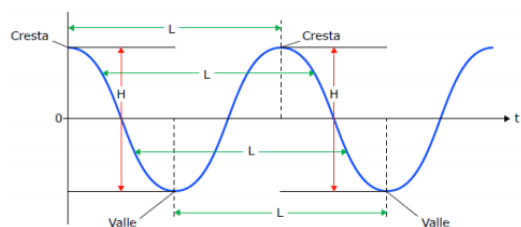


Fig. 2 Características de la ola.

El tamaño de una ola dependerá de tres factores:

- Velocidad del viento.
- Tiempo durante el cual éste está soplando.
- Distancia sobre el cual la energía del viento se transfiere al océano para formar olas Energía Undimotriz (2015, b).

Dadas las características de las olas se pueden aprovechar su potencial como recurso energético de una manera constante.

1.2 La energía eléctrica y su generación

La energía eléctrica se produce en las plantas eléctricas que son un ensamble de sistemas o subsistemas para generar electricidad, es decir, potencia eléctrica con economía y satisfaciendo ciertos requerimientos técnicos (eficiencia, disponibilidad, etc.) y de impacto ambiental. Una planta

generadora de electricidad o planta eléctrica debe ser útil económicamente y desde el punto de vista ambiental amigable con la sociedad, Enríquez (2009). Se puede dividir en 2 grandes grupo: energías convencionales y no convencionales. Las energías no convencionales son la de mayor capacidad instalada en México siendo la principal fuente de energía con el uso de materiales fósiles, como se muestra en la (fig. 3). En cuanto a las energías renovables la hidroeléctrica representa la energía con mayor capacidad instalada seguida de la energía eólica y la energía undimotriz no tiene registro hasta el primer semestre del 2018 SENER (2018, a).

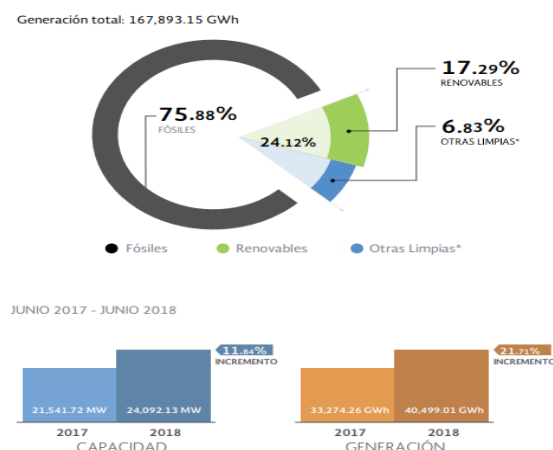


Fig. 3. Capacidad de generación eléctrica durante el primer semestre de 2018 en México. SENER (2018, b).

1.3 Tecnologías de conversión

Existen diferentes tipos de metodologías para el aprovechamiento de la energía de las olas, tales como:

La Columna de Agua Oscilante es una estructura semi-sumergida fija o flotante, parcialmente llena por el agua de mar y está integrada por una cámara de aire, una turbina bidireccional Wells y un turbogenerador, este funciona en dos semiciclos: el primero cuando la ola impulsa el agua hacia la cámara y el segundo cuando la ola regresa el agua saliendo de la cámara, en los dos casos el movimiento del agua produce una variación de presión impulsando al aire a través de la turbina. Por ejemplo: Voith Hydro Wavegen, Wave Pico Plant, OE Buoy.

El Atenuador utiliza la energía de las olas incidentes para inducir un movimiento oscilatorio entre dos (o más) componentes estructurales contiguos. El movimiento es soportado por cilindros hidráulicos que bombean fluido hidráulico de alta presión a través de un motor, o por una potencia de accionamiento directo despegan del sistema, para generar electricidad. Pueden ser flotantes o totalmente sumergidos, el primero es más común, tiende a moverse automáticamente para enfrentar la dirección natural del oleaje. Por ejemplo: Pelamis y Dexawave, IMP (2017).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se diseñó un prototipo para la recolección de datos en un ambiente controlado utilizando una biela manivela embolo conectado a una rueda excéntrica, que a su vez mueve un tren de engranes el cual hace rotar el eje de un generador eléctrico.

Se utilizaron herramientas informáticas tales como: Solidword para el diseño 3D de las pieza del prototipo, Microcontrolador Arduino con la shield MicroSD para el almacenamiento de datos que fueron analizados estadísticamente con el software ISSP.

2.1 Análisis estadístico

Los datos del comportamiento del prototipo fueron analizados en un ambiente controlado donde el oleaje de laboratorio es provocado para obtener un comportamiento a escala pero muy similar al mar en la zona del puerto del mezquital de Matamoros Tamaulipas. Para el análisis del oleaje provocado se utilizó el software ISSP, arrojando resultados con una altura significativa promedio entre 0.3m y 0.4m, con un periodo de 3.5 segundos entre ola. Dato indispensable para la obtención del resultado final como el flujo de energía que será aprovechado por el prototipo conversor.

Utilizando los datos obtenidos del ISSP de la altura significativa, el periodo de oleaje y las ecuaciones necesarias para, el comportamiento del mar que está generalmente compuesto por olas que poseen diferentes alturas, periodos, y direcciones. Para un mar irregular, la energía total promedio de las olas se calcula:

$$P = kH^2T \quad (1)$$

Donde k es constante, que se obtiene por la ecuación.

$$k = (\rho g^2)/64\pi \quad (2)$$

Donde: ρ : es la densidad del agua de mar (1025 kg/m^3) g: es la gravedad (9.80665 m/s^2) π : valor aproximado 3.1416 Por lo tanto: $k = 0.490H^2T$

Donde P es el flujo de energía de la ola expresado en kW/m. dando como resultado un flujo de energía

$P = 0.49 (.35\text{m})^2(3.5\text{s}) = .21008\text{kW/m}$, de potencia ofrecida, por las olas de laboratorio para ser aprovechadas en el prototipo para conversión de movimiento. Donde el par torsional de la rueda excéntrica estará dado por la potencia ofrecida entre la velocidad de rotación, despreciando la perdida de energía o potencia en el mecanismo biela manivela considerando solo la transformación de movimiento que tiene una velocidad rotacional igual al periodo de oleaje tenemos:

$$PT = P/n \quad (3)$$

Donde PT es el par torsional, P es la potencia ofrecida y n la velocidad de rotación en segundos tenemos $PT = (.21008\text{kW/m})(3.5\text{s}) = .0600\text{kg}\cdot\text{m}$.

Es la potencia de entrada en el tren de engranaje que se diseñó con una relación de 1 a 4 revoluciones para cuadruplicar la velocidad de giro en nuestro generador eléctrico en donde el potencial mecánico recibido es de:

$(0.0600/4) = 0.01500\text{kW/m}$. Con una velocidad de giro de 68.57 RPM para este diseño.

2.2 Diseño mecánico

El diseño mecánico se realizó en solidwork a través de un modelado 3D, donde se dibujó cada una de las piezas por separado para su facilidad de impresión y realizar el prototipo. Realizaron pruebas en condiciones controladas en laboratorio que se puedan extrapolar con datos obtenidos

El diseño mecánico se hace en 2 etapas, utilizando el biela manivela para transformar el movimiento lineal a movimiento giratorio y el tren de engranes para multiplicar la velocidad de giro.

2.2.1 Mecanismo biela de manivela excéntrico.

Los mecanismos se referencian por un código de letras según sus pares cinemáticos presentes en el mecanismo general: P, para el par prismático o de traslación, R, el par de rotación, C, el par cilíndrico y S, el par esférico etc. En el caso de una maquina biela manivela excéntrico el código seria: PRRR, etc. En la siguiente (fig. 4). se presenta un mecanismo de biela manivela excéntrico: tiene un par de rotación en el pistón con soporte, 1 par prismático pistón embolo y 2 pares de rotación en la manivela. García (2007).

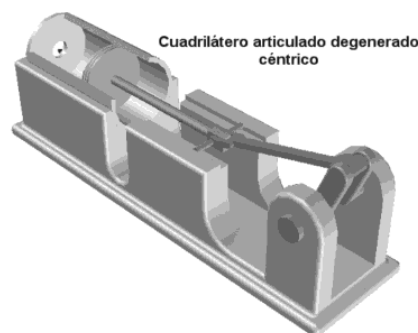


Fig. 4. Mecanismo biela manivela.

En este mecanismo, el movimiento de rotación de una manivela o cigüeñal provoca el movimiento rectilíneo, alternativo, de un pistón o émbolo. Una biela sirve para unir las dos piezas. Con la ayuda de un empujón inicial o un volante de inercia, el

movimiento alternativo del pistón se convierte en movimiento circular de la manivela.

2.2.2 Tren de engranes compuesto

Un tren de engranajes es un mecanismo que transmite movimiento desde una flecha motriz hasta una flecha accionada, por mediación de dos o más engranes se denomina tren de engranajes. Existe una relación afín, mg , llamada relación de engrane, que se emplea con frecuencia en el análisis de funcionamiento de los engranes. Siempre se define como el número de dientes de engranes entre el número de dientes del piñón independientemente de cual sea el impulsor. Así, mg , siempre es mayor o igual a 1.0 cuando el piñón es el impulsor como, en el caso de un reductor de velocidad, mg es igual a VR Moll (1985). Esto es relación de engranes

$$Mg = Ng/Np \geq 1.0 \quad (4)$$

En la siguiente figura se muestra un par de engranes que conforman el tren de engranaje utilizado en el prototipo (fig. 5). realizado en solidworks

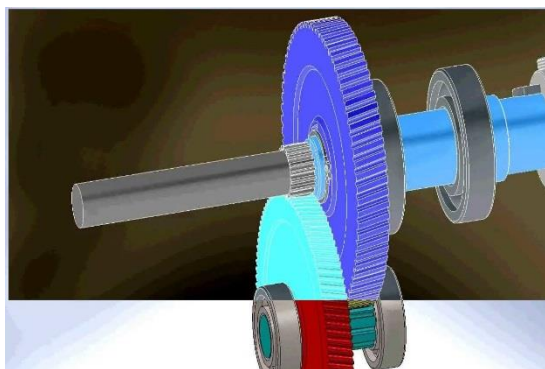


Fig. 5 Tren de engranes compuesto.

2.3 Generador eléctrico

Los generadores cambian la energía mecánica en energía eléctrica, en tanto los motores eléctricos cambian la energía eléctrica en mecánica; los generadores y motores eléctricos son muy parecidos, de hecho, están constituidos de la misma manera general, y ambos, dependen de los mismos principios electromagnéticos para su operación.

Al primer principio se le llama acción del generador y se le conoce también como inducción. El voltaje se puede inducir en un conductor que se encuentra dentro de un campo magnético, esto sucede cuando el flujo magnético se corta por el conductor. En algunos casos se mueve el

alambre; en otros se mueve el campo y aun en otros ambos se mueven pero a distintas velocidades.

Este principio toma la energía mecánica para producir el movimiento, este produce la electricidad por ser generada Enríquez (2004).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

El diseño del prototipo generó resultados que comprueban la funcionalidad del conversor tanto en funcionamiento teórico como práctico dando pie a escalar a mayores dimensiones el prototipo propuesto, así como incrementar las variables asemejando aún más el comportamiento real del mar con oleajes más grandes así como el factor marea y el incremento en la generación eléctrica utilizando otro tipo de generador más potente que conlleve un torque mayor. El diseño otorga la una gran facilidad para el aprovechamiento de tecnologías actuales como son las impresoras 3D que facilita demasiado conseguir las piezas adecuadas y disminuye los presupuestos de construcción, también la compatibilidad que ofrecen software como es solidwork para el dibujo y fabricación con la ventaja de ser muy utilizados en el sector educativo e industrial.

En general el prototipo conversor de energía undimotriz a energía eléctrica mostró la resistencia necesaria para su funcionamiento así como también soportó pruebas de estrés mecánico con oleajes demasiado altos y frecuentes durante su validación y principalmente la implementación en un generador terminó por demostrar la hipótesis de su funcionamiento bajo las condiciones establecidas.

REFERENCIAS

- Energía Undimotriz (2015). Seminario: Mercado de Energía Convencional y Renovable para Ingenieros Civiles.
- Enríquez-Harper, G. (2004). *El Libro Práctico de los Generadores, Transformadores y Motores Eléctricos*. Pag. 1. Editorial Limusa.
- Enríquez-Harper, G. (2009). *Tecnologías de generación eléctrica*. Pag. 45. Editorial: Autor-Editor.
- García-Prada, J. C., Castejón-Sisamón C., Rubio-Alonso, H. y Meneses-Alonso, J. (2007). *Problemas resueltos de teoría de máquinas y mecanismos*. Pag. 9. Editorial Paraninfo.
- IMP (2017). Reporte de inteligencia tecnológica energía del océano. Pag. 23. *SENER*.
- Moll, R. L. (1985). *Diseño de elementos de máquinas*. Editorial Pearson.
- SENER (2018). Reporte de Avance de Energías Limpias Primer Semestre. México.

Modeling and Simulation of a Series Elastic Actuator Under Gait Cycle Conditions

L. Vázquez-Sánchez, A. Blanco-Ortega, C. M. Lara-Barrios, A. Abúndez-Pliego,
J. Colín-Ocampo, W. Alcocer-Rosado

*Tecnológico Nacional de México-CENIDET, Morelos, C.P. 62490
México (Tel. 01(777) 362-7770)
andres.blanco@cenidet.edu.mx,*

Abstract: The practical application of Series Elastic Actuators (SEA) has stood out in the last decade as a result of the development of novel control systems and the availability of more efficient electric motors. One of the main applications of this type of actuators in recent years has been related to the design of active prosthetic devices, mainly for use in people with amputation at different levels of the lower limb. This paper presents the dynamic modeling of a series elastic actuator and the assessment of a control algorithm for path tracking based on differential flatness. Simulation results are presented when the dynamic model follows a path equivalent to the kinematics of an ankle joint during a full gait cycle disturbed by ground reaction forces. Results obtained show the robustness of the control algorithm by compensating the proposed path tracking with disturbance.

Keywords: Differential flatness, series elastic actuator (SEA), robotics, control.

1. INTRODUCCIÓN

Los dispositivos robóticos diseñados para la asistencia a los seres humanos en las distintas actividades de la vida diaria han tenido un amplio desarrollo en la última década. Desde máquinas para la asistencia durante sesiones de rehabilitación física hasta exoesqueletos para el aumento de fuerza o prótesis capaces de transmitir fuerzas activas al usuario. Los desarrollos en estos dispositivos se deben en cierta medida al desarrollo de las tecnologías de accionamiento (actuadores) en dispositivos robóticos que interactúan con la biomecánica humana.

El término “actuador” se define como un componente de máquina cuya finalidad es transmitir una acción dentro de un sistema automatizado a partir de una fuente de energía de entrada. 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 (Junior, Andrade and Filho, 2016).

El término de Actuador Elástico en Serie (AES) fue propuesto a mediados de la década de 1990 por Pratt y Williamson en el MIT (Massachusetts Institute Of Technology) (Pratt and Williamson, 1995). Los autores plantearon el AES como un tipo de actuador capaz de tolerar cargas de impacto y a su vez almacenar energía potencial con un control preciso de la fuerza transmitida. El principio de funcionamiento estaba basado en un ensamble motor-reductor conectado en serie con un elemento elástico pasivo (representado por un resorte) acoplado a la carga por accionar. La configuración básica de AES planteada por Pratt y Williamson se muestra en la Fig. 1.

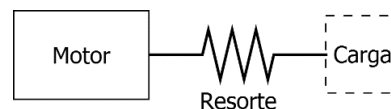


Fig. 1. Principio de funcionamiento de un actuador elástico en serie.

En comparación con sistemas de accionamiento convencionales, al emplear un AES la interfaz entre el actuador y la carga disminuye su rigidez, permitiendo un efecto de filtro pasa bajas para cargas de impacto, lo cual implica una reducción en las fuerzas de reacción para los sistemas de transmisión acoplados al motor.

En términos generales, un ensamble de AES cuenta con propiedades características como la baja impedancia mecánica, un ancho de banda mejorado y una alta sensibilidad a la fuerza en comparación con los actuadores convencionales en aplicaciones robóticas (Pratt, Krupp and Morse, 2002).

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. Las estrategias de control para este tipo de actuadores han sido estudiadas utilizando controladores anticipativos y retroalimentados empleando lazos PID y sus variantes típicas (Pratt and Williamson, 1995; Robinson *et al.*, 1999). Recientemente se han empleado otras técnicas como el control de impedancia (Sup and Goldfarb, 2006; Sup, Bohara and Goldfarb, 2007), el seguimiento de trayectorias (Pfeifer, 2010; Zhang and Agrawal, 2013; Fey *et al.*, 2014) o el control adaptativo (El-Sayed, Hamzaid and Abu Osman, 2014). En el diseño de mecanismos de accionamiento para dispositivos de asistencia biomecánica se han empleado con frecuencia los

rangos de movimiento de las articulaciones para el ciclo de marcha como entradas de diseño (Jardim and G. Siqueira, 2009; Kong, Bae and Tomizuka, 2010).

El ciclo de marcha humana comprende un proceso cíclico en el que las piernas se encuentran en constante movimiento y cuando menos uno de los pies se mantiene en contacto con el suelo en todo momento. El ciclo de marcha comprende la *fase de apoyo*, durante la cual una pierna soporta el peso corporal, y la *fase de oscilación*, donde dicha pierna se balancea libremente desde la parte posterior hasta la parte anterior del cuerpo. Dentro de cada una de las fases del ciclo de marcha, es posible identificar eventos particulares durante la progresión del ciclo. La Tabla I y la Tabla II presentan un conjunto de eventos observados durante un ciclo de marcha normal para la fase de apoyo y la fase de oscilación, respectivamente. Los eventos identificados hacen referencia a las articulaciones de rodilla y tobillo.

El uso de AES en dispositivos protésicos de miembros inferiores permite reducir las cargas de impacto que se transmiten al usuario durante las distintas actividades de la vida diaria. Para el ciclo de marcha, este escenario se puede representar con el instante de *golpe de talón*. La implementación integral de este tipo de actuadores continúa siendo objeto de estudio en la actualidad (De Roy, 2008).

En este artículo se plantea el modelado dinámico de un AES en espacio de estados y la simulación de un controlador robusto para el seguimiento de trayectorias basado en la propiedad de planitud diferencial sobre un prototipo virtual con el objetivo de abordar el diseño y la caracterización de este tipo de actuadores. Durante la etapa de simulación se evaluó la robustez de un sistema de control basado en la propiedad de planitud diferencial del modelo dinámico propuesto para realizar el seguimiento de una trayectoria de desplazamiento en el extremo del actuador. Dicha trayectoria emula los desplazamientos que tendría un AES que acciona una articulación protésica de tobillo durante un ciclo de marcha. Se modeló también el perfil de fuerzas de reacción a las que estaría sometido el mecanismo de accionamiento durante la fase de apoyo de un ciclo de marcha como una función de perturbación para el sistema de control.

La propiedad de planitud diferencial planteada en (Fliess *et al.*, 1995; Sira-Ramírez and Agrawal, 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-Ramírez *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 (De Roy, 2008).

Tabla I. Eventos durante la fase de apoyo del ciclo de marcha para las articulaciones de rodilla y tobillo.

Fase de apoyo

Ciclo de marcha				
Porcentaje	1%	10%	30%	50%
Estados en la pierna de referencia	Golpe de talón	Pie plano	Pierna vertical	Dorsiflexión máxima

Tabla II. Eventos durante la fase de oscilación del ciclo de marcha para las articulaciones de rodilla y tobillo.

Fase de oscilación

Ciclo de marcha					
Porcentaje	60%	70%	71 – 100%		
Estados en la pierna de referencia	Despegue de antepié	Flexión máxima de rodilla	Oscilación hasta 0° en las articulaciones		

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-Barrios *et al.*, 2017) para simulaciones con trayectorias y perturbaciones armónicas.

En la sección 2 de este artículo se describe el modelo dinámico del sistema a partir de un prototipo virtual, así como su expresión en espacio de estados. La sección 3 presenta el diseño del controlador para seguimiento de trayectorias partiendo del modelo en espacio de estados y la propiedad de planitud diferencial. La sección 4 muestra la implementación del controlador en el prototipo virtual dentro de un ambiente de simulación dinámica para comprobar el seguimiento de una trayectoria presente en la biomecánica de la marcha humana. Finalmente se presentan los resultados de los análisis realizados en la sección 5. La sección 6 presenta las conclusiones y el trabajo futuro relacionado.

2. MODELADO DINÁMICO DEL ACTUADOR ELÁSTICO EN SERIE

Partiendo del modelo planteado por (Pratt and Williamson, 1995), se propone el ensamble virtual de un AES lineal mostrado en la Fig. 2. El prototipo virtual contempla el ensamble de un servomotor con una transmisión de engranes acoplada a la salida con un tornillo de avance rápido. El movimiento angular del motor y la transmisión acoplados al tornillo de avance es convertido en un avance longitudinal a través de una tuerca acoplada. La tuerca está acoplada con resortes al extremo móvil del actuador que estaría en contacto con la carga a accionar.

El modelo matemático de la dinámica del sistema parte del arreglo de masas mostrado en la Fig. 3, donde dos masas m_1 y m_2 están acopladas por un resorte de rigidez k ; cada masa representa un grado de libertad en la dirección horizontal con

coordenadas generalizadas expresadas como x_1 y x_2 para cada masa, respectivamente. Se considera que cada masa se desplaza con 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 (perturbaciones desconocidas pero acotadas), efectos no-lineales de fricción seca y fuerzas externas. Una fuerza F_i actuando sobre la masa m_1 representa la fuerza de entrada transmitida por el motor y el sistema de transmisión, mientras que la fuerza F_o representa la fuerza a la salida del actuador. Partiendo de la segunda ley de Newton, se obtienen las ecuaciones que gobiernan la dinámica del sistema (Sariyildiz, Chen and Yu, 2017):

$$m_1 \ddot{x}_1 = F_i + kx_2 - kx_1 - b_1 \dot{x}_1 + d_1 \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = kx_1 - kx_2 - b_2 \dot{x}_2 + d_2 \quad (2)$$

Las ecuaciones (1) (2) se expresan como el conjunto de variables de estado de la forma:

$$\dot{z} = Az + Bu + D \quad (3)$$

que resulta en

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k}{m_1} & -\frac{b_1}{m_1} & \frac{k}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k}{m_2} & 0 & -\frac{k}{m_2} & -\frac{b_2}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{d_1}{m_1} \\ 0 \\ \frac{d_2}{m_2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde $z_1 = x_1$, $z_2 = \dot{x}_1$, $z_3 = x_2$, $z_4 = \dot{x}_2$ y $F_i = u$. Mientras que A representa la matriz dinámica, B es la matriz de control, z es el vector de estados y u es el vector de entradas del sistema.

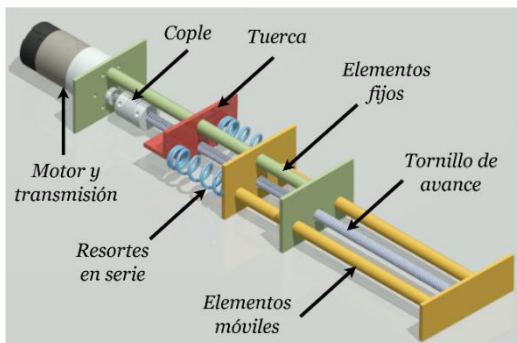


Fig. 2. Prototipo virtual de actuador elástico en serie.

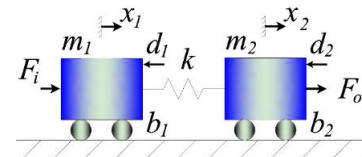


Fig. 3. Diagrama esquemático del modelo dinámico del actuador elástico en serie.

3. CONTROLADOR DE SEGUIMIENTO DE LA TRAYECTORIA DEL TOBILLO BASADO EN PLANITUD DIFERENCIAL

La propiedad de planitud diferencial permite diseñar de forma sistemática los controladores de seguimiento de trayectoria para sistemas lineales y no lineales (Veslin *et al.*, 2011; Silva Ortigoza *et al.*, 2016; Sira-Ramírez *et al.*, 2017). Con el objetivo de facilitar la implementación del seguimiento de trayectorias, el controlador robusto propuesto utiliza dicha propiedad de la dinámica del sistema para el rechazo de perturbaciones. Para la propiedad de planitud diferencial un sistema es diferencialmente plano si su representación en espacio de estados es controlable. A partir de esto se obtuvo la matriz de controlabilidad C_0 del sistema de acuerdo con la ecuación (5).

$$C_o = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & A^3B \end{bmatrix} \quad (5)$$

La controlabilidad de un sistema se comprueba siempre que las dimensiones de la matriz de controlabilidad C_0 sean iguales a su rango. Del cálculo resulta que el rango de $C_0 = 4$, por lo cual todos los estados del sistema son controlables y, a su vez, el sistema es diferencialmente plano. La planitud, o planitud diferencial, es una propiedad que generaliza el concepto de controlabilidad lineal para el caso de sistemas no lineales. En los casos lineales invariantes en el tiempo y variantes en el tiempo, coincide completamente con el concepto de controlabilidad (Sira-Ramírez *et al.*, 2017).

La salida plana F del sistema en espacio de estados se obtiene de la última fila en la inversa de la matriz de controlabilidad C_0 . Lo cual se expresa como:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} C_o^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{k} m_1 m_2 z_3 \quad (6)$$

De acuerdo con (Sira-Ramírez and Agrawal, 2004), la salida plana se expresa únicamente a partir de la variable de estado, por lo cual la salida plana resulta ser el desplazamiento de la masa 2:

$$z_3 = F \quad (7)$$

Posteriormente, las variables de estado y la entrada de control u se expresan en términos de F y sus derivadas sucesivas:

$$z_1 = \frac{m_2}{k} \ddot{F} + \frac{b_2}{k} \dot{F} + F \quad (8)$$

$$z_2 = \frac{m_2}{k} \ddot{F} + \frac{b_2}{k} \dot{F} + \dot{F} \quad (9)$$

$$z_4 = \dot{F} \quad (10)$$

$$u = \frac{m_1 m_2}{k} F^{IV} + \frac{1}{k} (b_1 m_2 + b_2 m_1) \ddot{F} + \left(m_1 + m_2 + \frac{1}{k} b_1 b_2 \right) \dot{F} + (b_1 + b_2) F \quad (11)$$

La controlabilidad es la condición necesaria y suficiente para diseñar un controlador robusto de seguimiento de trayectoria (Sariyildiz, Chen and Yu, 2017). Se diseña el controlador basado en la propiedad de planitud diferencial. De la ecuación (11) se sustituye la derivada de alto orden por un controlador auxiliar v_{aux} :

$$u = \frac{m_1 m_2}{k} v_{aux} + \frac{1}{k} (b_1 m_2 + b_2 m_1) \ddot{F} + \frac{1}{k} (k m_1 + k m_2 + b_1 b_2) \dot{F} + (b_1 + b_2) F \quad (12)$$

Se define el control auxiliar para el seguimiento de trayectorias planificadas deseadas (F_d) incluyendo dos términos de acción integral que proporcionan la robustez al sistema en lazo cerrado frente a perturbaciones de primer grado:

$$v_{aux} = F_d^{IV}(t) - \alpha_5 [\ddot{F} - \ddot{F}_d(t)] - \alpha_4 [\dot{F} - \dot{F}_d(t)] - \alpha_3 [\dot{F} - \dot{F}_d(t)] - \alpha_2 [F - F_d(t)] - \alpha_1 \int_0^t [F - F_d(\tau)] d\tau - \alpha_0 \int_0^t \int_0^\tau [F - F_d(\lambda)] d\lambda d\tau \quad (13)$$

Donde α_i ($i=0, \dots, 5$) representa los coeficientes constantes seleccionados de manera que el polinomio cumpla con el criterio de Hurwitz para garantizar que la dinámica del error sea asintóticamente estable. Posteriormente, la salida plana y sus derivadas sucesivas se calculan en términos de los estados del sistema:

$$F = z_3 \quad (14)$$

$$\dot{F} = z_4 \quad (15)$$

$$\ddot{F} = \frac{k}{m_2} z_1 - \frac{k}{m_2} z_3 - \frac{b_2}{m_2} z_4 + \frac{d_2}{m_2} \quad (16)$$

$$\ddot{F} = -\frac{k b_2}{m_2^2} z_1 + \frac{k}{m_2} z_2 + \frac{k b_2}{m_2^2} z_3 + \left(\frac{b_2^2}{m_2^2} - \frac{k}{m_2} \right) z_4 - \frac{b_2 d_2}{m_2^2} \quad (17)$$

Con el control propuesto v_{aux} , se igualan las dos relaciones del control (11) y (12) para obtener la dinámica en lazo cerrado del sistema.

$$F^{IV} - F_d^{IV}(t) + \alpha_5 [\ddot{F} - \ddot{F}_d(t)] + \alpha_4 [\dot{F} - \dot{F}_d(t)] + \alpha_3 [\dot{F} - \dot{F}_d(t)] + \alpha_2 [F - F_d(t)] + \alpha_1 \int_0^t [F - F_d(\tau)] d\tau + \alpha_0 \int_0^t \int_0^\tau [F - F_d(\lambda)] d\lambda d\tau = 0 \quad (18)$$

Al considerar el error como $e = F - F_d$ y al derivar dos veces, se obtiene el polinomio característico del sistema $p(s)$ en lazo cerrado:

$$p(s) = s^6 + \alpha_5 s^5 + \alpha_4 s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 = 0 \quad (19)$$

Se propuso un polinomio de sexto orden para determinar las ganancias del controlador de manera que sea un polinomio Hurwitz y así garantizar que la dinámica del error sea asintóticamente estable:

$$(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)^3 = 0 \quad (20)$$

con valores $\zeta = 0.7071$ y $\omega_n = 20$.

4. SIMULACIÓN

El modelo matemático del controlador basado en la propiedad de planitud diferencial fue expresado en un diagrama de bloques de Simulink dentro del software matemático Matlab® (como el mostrado en la Fig. 4) vinculado al software de ingeniería asistida por computadora MSC ADAMS® para obtener la respuesta del sistema en el seguimiento de trayectorias con la función de fuerzas de perturbación.

Para la simulación se consideró el amortiguamiento viscoso en ambas masas y una fuerza de perturbación, como se observa en la Fig. 5. La Tabla III presenta los valores de simulación utilizados en el modelo dinámico del sistema. Los valores de masa y rigidez fueron obtenidos del prototipo físico a partir de mediciones. La trayectoria deseada z_{3d} para el controlador representa el desplazamiento lineal que tendría el AES planteado al estar acoplado a un mecanismo protésico para accionar el desplazamiento angular de una articulación de tobillo durante un ciclo de marcha. La trayectoria se obtuvo mediante un ajuste de curvas de la gráfica reportada en (Winter, 2009), correspondientes a la cinemática y cinética de la articulación de tobillo de un voluntario de 56.7 kg. de masa corporal durante un ciclo de marcha sobre una superficie plana nivelada. La trayectoria está normalizada de 0 a 100% del ciclo de marcha. Se obtuvo el modelo matemático de un eslabonamiento plano de 5 barras siguiendo la trayectoria de la articulación de tobillo. La trayectoria del actuador está definida por la ecuación (21) para el intervalo comprendido por $0 \leq t \leq 100\%$.

$$F_d(t) = z_{3d} = \frac{-0.1084t^5 + 32.61t^4 - 3226t^3 + 1.192 \times 10^5 t^2 - 1.273 \times 10^6 t + 1.189 \times 10^5}{t^4 - 123.1t^3 + 4137t^2 - 2.499 \times 10^4 t + 5.113 \times 10^5} \quad (21)$$

La trayectoria deseada z_{3d} a la salida del actuador representa el desplazamiento para la articulación del tobillo durante un ciclo de marcha, con el 0% de progresión del ciclo representando el inicio de la fase de apoyo y el 60% representando el inicio de la fase de oscilación.

En un ensamble de aplicación protésica para la articulación de tobillo el mecanismo de accionamiento estaría sometido a fuerzas de reacción con el suelo mientras progresa la fase de apoyo, por lo cual se realizó el análisis dinámico en la estructura del mecanismo de 5 barras para obtener la ecuación que modela el perfil de fuerza axial actuando sobre el AES. Este modelo representó la fuerza de perturbación a la que estaría sometido el extremo del actuador. La ecuación (22) representa la función de la perturbación d_2 actuando sobre la masa m_2 para un intervalo de $0 \leq t \leq 60\%$ y un valor constante $c = 0.1033$ en la función de trayectoria. Para el intervalo $60 < t < 100\%$ la función $d_2(t)$ toma un valor igual a cero, lo que se interpretaría como la pierna protésica actuando sin contacto con el suelo durante la fase de oscilación.

$$\begin{aligned} d_2(t) = & 401.8 + 26.56 \cos(ct) - 675.6 \sin(ct) \\ & - 376.4 \cos(2ct) + 73.19 \sin(2ct) + 38.2 \cos(3ct) \\ & - 15.9 \sin(3ct) - 124.8 \cos(4ct) - 46.4 \sin(4ct) \\ & + 43.5 \cos(5ct) + 31.92 \sin(5ct) - 34.5 \cos(6ct) \\ & - 46.8 \sin(6ct) + 23.47 \cos(7ct) + 53.2 \sin(7ct) \\ & + 15.4 \cos(8ct) - 64 \sin(8ct) \end{aligned} \quad (22)$$

Tabla III. 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

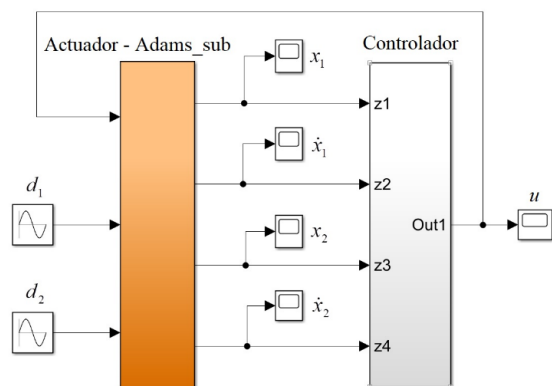


Fig. 4. Diagrama de bloques del modelo dinámico del AES y el controlador para seguimiento de trayectorias.

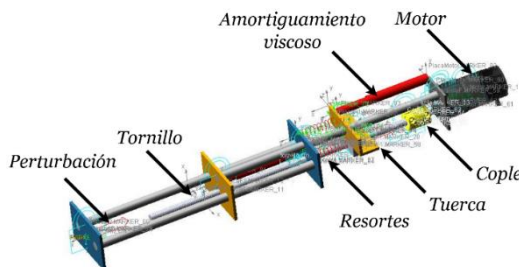


Fig. 5. Prototipo virtual del actuador elástico en serie dentro del ambiente de simulación multicuerpo MSC ADAMS®.

5. RESULTADOS

La Fig. 6 muestra el resultado obtenido para el seguimiento de trayectoria en la simulación del prototipo virtual del AES dentro del ambiente de ADAMS View® en co-simulación con el controlador en Matlab - Simulink® basado en la propiedad de planitud diferencial.

El tiempo total equivalente al 100% del ciclo de marcha se estableció en 1 segundo. Es importante resaltar que, derivado del ajuste a la trayectoria, se presenta un error al final del ciclo, ya que la curva obtenida del ajuste no termina con un desplazamiento de 0 mm. Sin embargo, la trayectoria obtenida por el controlador presentó un seguimiento de trayectoria con oscilaciones sub-amortiguadas en los intervalos de 0 – 15% y de 61 – 70% del ciclo de marcha. El primer conjunto de oscilaciones está relacionado con el inicio del seguimiento de trayectoria, mientras que el segundo conjunto está relacionado con el cambio de valor en la ecuación de la perturbación (ecuación 22) para tomar un valor igual a cero durante el intervalo correspondiente a la fase de oscilación (60-100% del ciclo de marcha). Las mayores diferencias de amplitud en dichos intervalos fueron equivalentes a errores de desplazamiento con respecto de la trayectoria deseada en los instantes dados de 1.67 y 0.95 mm, respectivamente.

En la Fig. 7 se presenta la respuesta obtenida por la fuerza de control u ante la fuerza de reacción con el suelo durante el ciclo de marcha, expresado como la perturbación d_2 . La fuerza de control presentó oscilaciones sub-amortiguadas en los intervalos de 0 – 13% y de 61 – 75% del ciclo de marcha. A partir del gráfico, se observa la compensación de la fuerza de control debido al efecto de la perturbación.

6. CONCLUSIONES

Durante la etapa de simulación se observó que los resultados presentaban un mejor seguimiento de trayectoria cuando se consideró únicamente la función de desplazamiento y su primera derivada con respecto del tiempo ($\ddot{z}_{3d} = \ddot{z}_{3d} = 0$) en la ecuación dinámica de lazo cerrado. Esto como consecuencia del orden de la función de desplazamiento deseado z_{3d} . Cuando se realizaron las simulaciones considerando las ecuaciones correspondientes a las derivadas sucesivas de la ecuación (21) hasta el cuarto orden, los resultados de simulación presentaron un seguimiento de trayectoria con mayor ruido en la respuesta del controlador.

Los resultados de simulación demostraron que el controlador basado en la propiedad de planitud diferencial del modelo dinámico del AES propuesto puede ofrecer un control robusto del actuador ante perturbaciones externas de primer orden. Dichas perturbaciones fueron modeladas para este estudio como el perfil de fuerzas de reacción resultantes que tendría un ensamble de pierna-pie protésicos durante un ciclo de marcha completo a velocidad espontánea. Los resultados demostraron diferencias en las amplitudes de posición deseadas para ambas simulaciones.

La simulación con perturbación tuvo una diferencia de amplitud en los primeros instantes del ciclo de marcha de 1.67 mm con respecto de la posición deseada. Inmediatamente después del porcentaje de progresión correspondiente al despegue de antepié, la mayor diferencia en la amplitud de la posición fue de 0.95 mm.

A pesar de las diferencias de amplitud y de las consideraciones en las derivadas a utilizar para el control en la ecuación para el seguimiento de trayectoria, la robustez del controlador permitió el seguimiento de trayectoria ante la fuerza de perturbación.

La aplicación de la propiedad de planitud diferencial para el desarrollo del controlador de seguimiento de trayectorias permitió explorar este algoritmo como una técnica alternativa para el control del AES en estudios que involucren la aplicación de estos dispositivos de accionamiento en ambientes con dinámica variable.

El trabajo futuro relacionado con esta investigación involucra el seguimiento de trayectorias en tiempo real para AES acoplados en eslabonamientos enfocados al desarrollo de prótesis robóticas de miembros inferiores. Así como la caracterización de los parámetros de amortiguamiento y de rigidez del resorte para observar la respuesta del actuador en el dominio de la frecuencia en la búsqueda de la definición óptima del ancho de banda y de la impedancia mecánica de este tipo de actuadores.

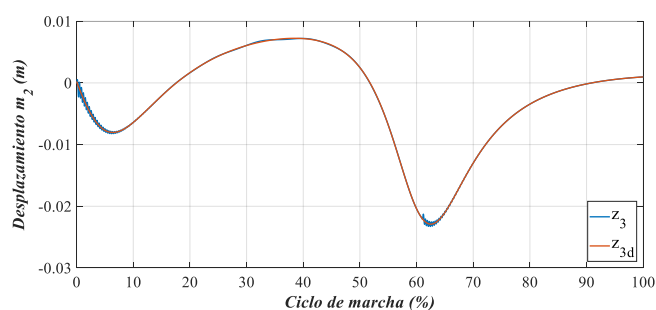


Fig. 6. Resultados de simulación del AES para el seguimiento de trayectoria de la posición de la salida plana z_3 afectada por la perturbación d_2 .

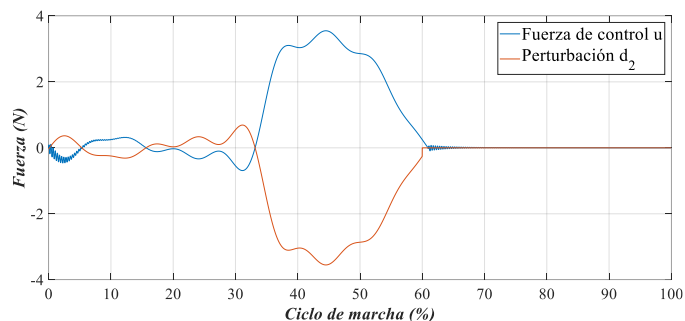


Fig. 7. Resultados de simulación del AES para la respuesta de la fuerza de control u afectada por la perturbación d_2 en el seguimiento de la trayectoria z_{3d} .

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo brindado al proyecto titulado Diseño y construcción de una prótesis transfemoral activa con clave 6304.17P.

REFERENCIAS

- El-Sayed, A. M., Hamzaid, N. A. and Abu Osman, N. A. (2014) 'Technology efficacy in active prosthetic knees for transfemoral amputees: A quantitative evaluation', *Scientific World Journal*, 2014. doi: 10.1155/2014/297431.
- Fey, N. P. et al. (2014) 'Controlling Knee Swing Initiation and Ankle Plantarflexion With an Active Prosthesis on Level and Inclined Surfaces at Variable Walking Speeds', *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*. IEEE, 2(August), pp. 1–12. doi: 10.1109/JTEHM.2014.2343228.
- Fliess, M. et al. (1995) 'Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples', *International Journal of Control*, 61(6), pp. 1327–1361. doi: 10.1080/00207179508921959.
- Jardim, B. and G. Siqueira, A. A. (2009) 'Development of Series Elastic Actuators for Impedance Control of an Active Ankle Foot Orthosis', in *20th International Congress of Mechanical Engineering*. Gramado, RS, Brazil, pp. 1–9.
- Junior, A. G. L., Andrade, R. M. de and Filho, A. B. (2016) 'Series Elastic Actuator: Design, Analysis and Comparison', *InTech*, p. 13. doi: <http://dx.doi.org/10.5772/57353>.
- Kong, K., Bae, J. and Tomizuka, M. (2010) 'A compact rotary series elastic actuator for knee joint assistive system', *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, pp. 2940–2945. doi: 10.1109/ROBOT.2010.5509227.
- Lara-Barrios, C. M. et al. (2017) 'Modelado y simulación de un actuador elástico en serie', *Memorias del XXIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, pp. 1–6.
- Pfeifer, S. (2010) 'Finding Best Predictors for the Control of Transfemoral Prostheses', in *9. Workshop*

- '*Automatisierungstechnische Verfahren für die Medizin*' (Automated Workshop 2010). VDI Verlag, pp. 39–40.
- Pratt, G. A. and Williamson, M. M. (1995) 'Series elastic actuators', in *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*. IEEE Comput. Soc. Press, pp. 399–406. doi: 10.1109/IROS.1995.525827.
- Pratt, J., Krupp, B. and Morse, C. (2002) 'Series elastic actuators for high fidelity force control', *Industrial Robot*, 29(3), pp. 234–241. doi: 10.1108/01439910210425522.
- Robinson, D. W. *et al.* (1999) 'Series elastic actuator development for a biomimetic walking robot', in 1999 *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (Cat. No.99TH8399)*. IEEE, pp. 561–568. doi: 10.1109/AIM.1999.803231.
- De Roy, K. (2008) 'Case study: intelligent and powered leg prosthesis', in *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*. Wiley, pp. 295–303.
- Sariyildiz, E., Chen, G. and Yu, H. (2017) 'A Unified Robust Motion Controller Design for Series Elastic Actuators', *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(5), pp. 2229–2240. doi: 10.1109/TMECH.2017.2719682.
- Silva Ortigoza, R. *et al.* (2016) 'Trajectory Tracking Control for a Differential Drive Wheeled Mobile Robot Considering the Dynamics Related to the Actuators and Power Stage', *IEEE Latin America Transactions*, 14(2), pp. 657–664. doi: 10.1109/TLA.2016.7437207.
- Sira-Ramírez, H. *et al.* (2017) 'Appendix A - Differential Flatness', in Sira-Ramírez, H. *et al.* (eds) *Active Disturbance Rejection Control of Dynamic Systems*. Butterworth-Heinemann, pp. 285–297. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849868-2.00015-0>.
- Sira-Ramírez, H. and Agrawal, S. K. (2004) *Differentially Flat Systems*. Edited by C. Press. New York: Taylor & Francis (Automation and Control Engineering).
- Sup, F., Bohara, A. and Goldfarb, M. (2007) 'Design and control of a powered knee and ankle prosthesis', *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (April), pp. 4134–4139. doi: 10.1109/ROBOT.2007.364114.
- Sup, F. C. and Goldfarb, M. (2006) 'Design of a pneumatically actuated transfemoral prosthesis', *American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division (Publication) DSC*, pp. 1–10. doi: 10.1115/IMECE2006-15707.
- Veslin, E. Y. *et al.* (2011) 'Motion planning on mobile robots using differential flatness', *IEEE Latin America Transactions*, 9(7), pp. 1006–1011. doi: 10.1109/TLA.2011.6129695.
- Winter, A. (2009) *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Ontario, CA.
- Zhang, C. and Agrawal, S. K. (2013) 'Design of a passive transfemoral prosthesis using differential flatness theory', *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, pp. 2189–2193. doi: 10.1109/ICRA.2013.6630871.

CÁLCULO DEL EJE DE LAS CUCHILLAS Y DEL CILINDRO NEUMÁTICO PARA UNA MÁQUINA TRITURADORA Y COMPACTADORA PARA POLIESTIRENO EXPANDIDO.

Noriega-Lozano, J. I.*, **Andrade-Avalos, L. A. ****, **Flores-Meza, E. *****, **Guadarrama-Gutiérrez, J. C. ******, **Velasco-Jiménez M.*******, **Pérez-Murillo, J. *******, **Blanco-Valdés, J. A. *******, **González-Paredes E.*******

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Unidad Profesional Adolfo López Mateos “Zacatenco”, Avenida IPN s/n, Edificio 5, 2do Piso, Col. Lindavista, C.P. 07320, Ciudad de México, México.

**Email: jorge_norloz@hotmail.es*

***Email: leoaa1995@hotmail.com*

****Email: porch_300d@hotmail.com*

*****Email: jguadarramag95@gmail.com*

******Email: marthavelaipn3511@gmail.com*

******Email: jorgepermuri@gmail.com*

******Email: jblanco7434@gmail.com*

******Email: entrelazo@gmail.com*

Resumen: La contaminación en la Ciudad de México es un problema el cual se enfrenta actualmente, debido a que afecta en varios aspectos a los ciudadanos y al medio ambiente que nos rodea. La inmensa producción de basura que se genera anualmente es uno de los grandes retos a solucionar. La recopilación y el reciclaje en algunos productos tal como es el poliestireno expandido en muchos casos no es suficiente. La composición de este material no permite que se degrade fácilmente en el medio ambiente, por lo que puede considerarse como un foco de infección. Por otro lado, el reciclaje de poliestireno expandido en la Ciudad de México es muy escaso, debido a que existen muy pocas empresas que se dediquen a este proceso. La máquina trituradora y compactadora para poliestireno expandido se compone principalmente por el eje de las cuchillas y de un cilindro neumático, su diseño permitirá obtener un bloque compactado de 15cm x15 cm x 15cm, dicha máquina podrá producir 13 bloques por hora.

Palabras clave: contaminación, ciudad, ambiente, poliestireno expandido, reciclaje.

Abstract: Pollution in Mexico City is a problem that we are currently facing, because it affects citizens and the environment around us in a number of ways. The immense production of garbage that is generated annually is a great challenge to be solved. The collection and recycling of some products such as expanded polystyrene is often not enough. The composition of this material doesn't allow it degrade easily in the environment, so it can be considered as a source of infection or a nest for certain insects, which can cause diseases for humans. On the other hand, the recycling of expanded polystyrene in Mexico City is very scarce, because there are very few companies dedicated to this process. The crushing and compacting machine for expanded polystyrene consists mainly of the shaft of the blades and a pneumatic cylinder, its design will allow to obtain a compact block of 15 cm x 15cm x 15cm , this machine may produce 13 blocks per hour.

Keywords: pollution, city, environment, expanded polystyrene, recycling.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación es una problemática en la Ciudad de México, una de ellas es la generación de desechos o desperdicios (Antonio, 2007) . Si por una parte se ha optado por el reciclaje de muchos desechos o la generación de productos de fácil degradación con el medio ambiente, esto no ha solucionado del todo el problema (Anon., 2018). La demanda de tiraderos o basureros más grandes no ha llegado a solucionar tampoco el problema (Nava, 2002) . Productos como el poliestireno expandido son materiales que se consumen diariamente en industrias alimenticias o de empaquetamiento (Halden, 2010) , pero que en muchos casos no se llega a reutilizar tan fácilmente (Martínez, 2018)

El principal problema de la generación de poliestireno expandido en los basureros es debido a que ocupa grandes espacios y que su reciclaje no es tan rentable como lo es para el PET (Delgado, 2017). La generación de estos desechos en botes, que se convierten en nidos para ciertos insectos como las moscas, puede provocar enfermedades que afectan al ser humano (Gorman, 2017).

El reciclaje de este producto requiere de un proceso especial, dado que muchas veces solamente se quema para reducir su volumen, lo que genera contaminación en el aire (Flores, 2019). El proceso de reciclaje se puede realizar de forma mecánica o química. El proceso mecánico consta de 5 pasos: separación, lavado, secado, compactado y extrusión, mientras que para el químico es un proceso de despolimerización del poliestireno en un monómero constituyente. El poliestireno a reciclar debe evitar contener residuos líquidos o de comida, cualquier otro producto adherido como son popotes o tapas, insectos, tierra, cemento o varillas para el caso de las constructoras. (Moliner, 2009).

El uso de maquinaria en el proceso de reciclaje del poliestireno expandido mediante un proceso mecánico reduciría el volumen que este se genera en los basureros o tiraderos , dado que este producto está compuesto 95% de aire y 5% de plástico (Delgado, 2017).

El reciclaje del poliestireno expandido reducirá el volumen de este desecho en los grandes tiraderos que cuenta la ciudad (Delgado, 2017) y disminuiría los contaminantes que las industrias del poliestireno expandido producen al fabricar productos nuevos (Anon., s.f.).

La falta de tecnología mexicana para el proceso de reciclaje del poliestireno expandido, limita aún más este proceso . Sin embargo, estudiantes de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) crearon una maquina llamada Reps-01 capaz de transformar el poliestireno expandido en pellets que se pueden utilizar para fabricar diversos artículos como plumas, reglas o marcos. (Méndez, 2014).

El cálculo del eje de las cuchillas y del cilindro neumático para emplearse en una máquina trituradora y compactadora para poliestireno expandido facilitara el reciclaje del mismo, que puede provenir de platos, vasos o del embalaje de protección de algunos electrodomésticos que se utilizan diariamente y que solamente tienen una sola vida útil o poco tiempo de uso. La máquina será capaz de producir 13 bloque de poliestireno expandido por hora con unas dimensiones de 15cm x 15cm x 15 cm.

El proyecto se orientó a la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), Unidad Culhuacán del Instituto Politécnico Nacional (IPN) para disminuir los impactos negativos que produce tener este producto dentro del plantel.

2.- ANTECEDENTES

El poliestireno estirado es un plástico que puede ser reciclado por completo. Sin embargo, el problema de la recolección eficiente y de manera económica es obtenerlo limpio así como también transportarlo a los centros de reciclaje no es tarea fácil (Martínez, 2018). Este tipo de situaciones del reciclaje no solo

está sucediendo en México, sino también lo enfrentan otros países.

En 2008, la empresa GREENMAX proveniente de Estados Unidos construyo maquinaria que permite el reciclado de poliestireno expandido y plásticos. El modelo APOLO Series consta de un proceso de triturado y compactado de poliestireno cuya capacidad es de 200 kg/hr, el cual se usara como modelo para desarrollar la máquina (Greenmax, 2015). La empresa Mil-tek proveniente de Dinamarca en 2010, construyo la maquina EPS 1000 con capacidad para producir 15 kg/h. Estas investigaciones reflejan que desafortunadamente en México no existen empresas que se dediquen a la construcción de este tipo de máquinas.

En México, la empresa Dart abrió en el 2010 su primera planta recicladora de poliestireno expandido, ubicada en Atlacomulco, Estado de México. La planta tiene la capacidad de reciclar 400 toneladas de poliestireno expandido anuales (Ascención, 2010). Posteriormente abrió otra planta en Tijuana (Anon., 2005).

3.-DESARROLLO

La máquina trituradora y compactadora para poliestireno expandido se compone del sistema de triturado que contiene dos ejes con 8 cuchillas con un diámetro de 30 cm como se muestra en la Figura 1. Los ejes están hechos de Acero inoxidable, AISI 302 Laminado en frio y las cuchillas de láminas de acero inoxidable.

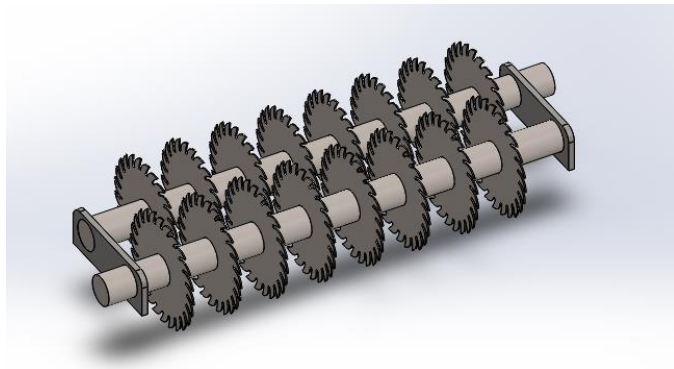


Figura 1 . Sistema de triturado.

El diámetro del eje de las cuchillas se calculó usando (1)

$$D = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi * \tau_{xy \max}} * \sqrt{M_x^2 + T_x^2}} \quad (1)$$

Dónde

D =diámetro del eje en (m)

$\tau_{xy \max}$ = esfuerzo cortante máximo en (Pa)

M_z =Momento en (Nm)

T_x =Torque en el eje “x” en (Nm)

El diámetro calculado para eje de las cuchillas es de $12.482 \times 10^{-3} \text{m}$.

La deflexión que provoca la fuerza de la polea en el extremo eje se analiza por la Teoría de Deflexión de Vigas . Se calculó la deflexión máxima usando (2)

$$y_{\max} = 0.06415 \frac{P a L^2}{E I} \quad (2)$$

Dónde:

P- es la fuerza ejercida por la polea en (N)

a-Distancia de la polea al rodamiento en (m)

L- longitud restante del eje en (m)

E- Modulo de Young en (Pa)

I-.Momento de inercia en (m^4)

El cálculo de la deflexión máxima es de $4.114 \times 10^{-5} \text{m}$. Los cálculos del eje son considerados solo bajo carga estática y empleando un motor en el eje de 1.119 KW a 1730 rpm.

El poliestireno que fue triturado posteriormente baja al sistema de compactado mediante una lámina inclinada donde cae a un recipiente de compactación. Después de ser llenado el recipiente, se ejerce una fuerza de compactación mediante un cilindro neumático.

El sistema de compactado se conforma de una un cilindro neumático con una placa en un extremo, con un recipiente que en su tapa inferior puede removerse, para la extracción del bloque como se muestra en la Figura 2.

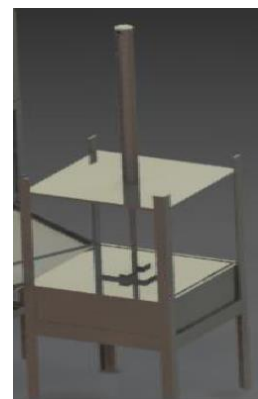


Figura 2. Sistema de compactado

Las fuerzas de avance y retroceso del sistema de compactado se calculó usando (3 y 4)

$$F_{\text{avance}} = \frac{\pi D_{\text{cilindro}}^2}{4} * \frac{P}{10} \quad (3)$$

$$F_{\text{retroceso}} = \frac{\pi (D_{\text{cilindro}}^2 - d_{\text{vástago}}^2)}{4} * \frac{P}{10} \quad (4)$$

Dónde:

F_{avance} = Fuerza de avance del cilindro en (N)

$F_{\text{retroceso}}$ = Fuerza de retroceso del cilindro en (N)

D_{cilindro} = Diámetro del embolo en (mm).

$d_{\text{vástago}}$ = Diámetro del vástago en (mm).

P- Presion en (Bar)

La fuerza de avance es de 804.247 N mientras que la fuerza de retroceso es de 696.7 N. El cilindro neumático se calculó usando una presión de 6 bares.

El sistema de triturado y compactado implementado en la maquina se muestra en la Figura 3.

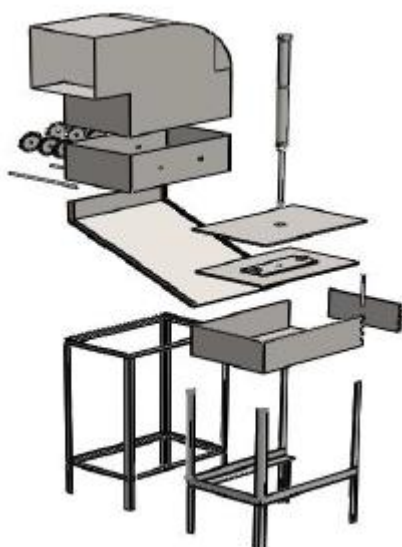


Figura 3. Máquina trituradora y compactadora para poliestireno expandido.

Para la obtención de un bloque de poliestireno expandido de 15 cm x 15cm x 15cm se necesita vaciar aproximadamente 118.125 gr de poliestireno en la tolva, dicha materia se deberá encontrar de manera limpia, por ejemplo el proveniente de embalaje de protección de electrodomésticos o cajas que se pueden encontrar en las áreas de descarga de algunos centros comerciales o tiendas. La máquina podrá producir 13 bloques de poliestireno expandido por hora.

4. RESULTADOS

Los resultados calculados para el sistema de triturado acerca de la deflexión a la que estaría sometido el eje se considera muy pequeña, por lo que no afectaría el funcionamiento del mismo. El diámetro calculado mediante la teoría se considera aceptable y disponible comercialmente en tiendas de materiales (CUPRUM, 2017).

El cálculo del cilindro neumático muestra que se encuentra comercialmente dentro de catálogos de fabricantes, en dichos se encuentran sus dimensiones y condiciones de trabajo para ser considerados en cálculos posteriores.

El diseño de la maquinas así como de todos sus componentes no tiene alguna referencia, debido a que las maquinas que realizan el triturado y compactado de poliestireno expandido se fabrican en el extranjero y no muestran especificaciones técnicas o de diseño para la misma.

5. CONCLUSIÓN

La generación de tecnología en el país permite la facilitación y la solución de muchos procesos o problemas, tal como es el reciclaje del poliestireno expandido, que por diversas condiciones o factores la accesibilidad a las máquinas de este tipo sea muy limitada, debido a que la venta de estas solo se encuentra en el extranjero o bajo el control de grandes empresas que se dedican al reciclaje.

El reciclaje del poliestireno expandido permitirá reducir los grandes volúmenes de este material que se pueden encontrar en los botes de basura, que posteriormente se van a los tiraderos de la ciudad. Reducir el tiempo que este tipo de material está en contacto con el medio ambiente impactara positivamente en la salud de los ciudadanos, así como en el medio ambiente. Ofrecerle una segunda vida útil a estos materiales ayudara a la industria del reciclaje.

El diseño de esta máquina surge como un proyecto nuevo, debido a que no existen antecedentes sobre este tipo de maquinaria en México.

Los resultados calculados previamente solo son una parte del diseño de la máquina, y sirven como base para realizar otros cálculos y selección de demás elementos como el sistema de poleas y selección de bandas a utilizar en la máquina, así como también el sistema de control del cilindro neumático y su respectiva selección de la válvula de control para el cilindro .

6.- AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Instituto Politécnico Nacional y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo que me ha brindado para el desarrollo de este trabajo.

Bibliografía

Anon., 2005. *Quiminet*. [En línea]

Available at: <https://www.quiminet.com/noticias/dart-containers-instalara-planta-en-tijuana-mexico-1843169.htm>
[Último acceso: 17 08 2018].

Anon., 2010. *DART*. [En línea]

Available at:
<https://www.dartcontainer.com/sustainability/foam-recycling-centers/>
[Último acceso: 16 08 2018].

Anon., 2015. *Campaña Unicel Campestre*. [En línea]

Available at:
<https://campanaunicelcampestre.wordpress.com/2015/02/10/sabes-cuanto-se-tarda-el-unicel-en-degradarse/>
[Último acceso: 06 09 2018].

Anon., 2018. *Greenpeace*. [En línea]

Available at: <https://es.greenpeace.org/es/noticias/los-bioplasticos-no-solucionan-la-contaminacion-por-plasticos/>
[Último acceso: 05 08 2018].

Anon., s.f. *Asociacion Nacional de Poliestireno Expandido*. [En línea]

Available at:
<http://www.anape.es/index.php?accion=producto>
[Último acceso: 23 08 2018].

Anon., s.f. *FOREMEX*. [En línea]

Available at: <https://www.foremex.com.mx/blog/reciclaje-unicel.html>
[Último acceso: 17 08 2018].

Anon., s.f. *Inforeciclaje*. [En línea]

Available at: <http://www.inforeciclaje.com/que-es-reciclaje.php>
[Último acceso: 16 08 2018].

Antonio, J., 2007. Contaminación y salud pública en México. *Scielo*, 49(2).

CUPRUM, 2017. *Cuprum Metales Laminados*. [En línea]

Available at:
[http://cuprummetaleslaminados.com/Productos/Acero-](http://cuprummetaleslaminados.com/Productos/Acero-Inoxidable/Perfiles/Barra-Redonda)

[Inoxidable/Perfiles/Barra-Redonda](http://cuprummetaleslaminados.com/Productos/Acero-Inoxidable/Perfiles/Barra-Redonda)

[Último acceso: 01 09 2017].

Delgado, D., 2017. *Más por más*. [En línea]

Available at: <https://www.maspormas.com/especiales/que-hacemos-con-el-unicel/>
[Último acceso: 17 01 2017].

Flores, M., 2019. *El Universal*. [En línea]

Available at: <https://de10.com.mx/vivir-bien/como-y-donde-se-recicla-el-unicel-en-mexico>
[Último acceso: 11 06 19].

Greenmax, 2015. *Greenmax Intco Recycling*. [En línea]

Available at: <https://www.intcorecycling.com/Manufacture-EPS-Compactor.html>
[Último acceso: 24 09 2017].

Halden, R. U., 2010. Plastics and Health Risks. *Annual Reviews*, Volumen 31, pp. 179-194.

Martínez, E., 2018. Plástico reciclado en México ¿ Bueno, bonito y barato?. *Mp*, pp. 41,42.

Martínez, I. D., 2018. *Derecho en acción*. [En línea]

Available at: <http://derechoenaccion.cide.edu/por-que-debe-prohibirse-el-uso-de-unicel-en-la-industria-alimenticia-en-mexico-i-ii/>
[Último acceso: 29 08 2018].

Méndez, R., 2014. *MVS Noticias*. [En línea]

Available at: <https://mvsnoticias.com/noticias/ciencia-y-tecnologia/crean-alumnos-de-la-unam-primera-maquina-para-reciclar-unicel-4/>
[Último acceso: 2019 11 06].

Molinero, L. A. R., 2009. *Tipos de Reciclaje*. [En línea]

Available at:
<http://tiposdereciclaje.blogspot.com/2009/12/reciclado-mecanico.html>
[Último acceso: 2019 11 06].

Nava, D. C. C. d., 2002. *Manuales para regular los residuos con sentido comun*. Ciudad de México: s.n.

Análisis Numérico Del Comportamiento De Fluido En Tubería Recubierta Con DLC Por Triboadhesión

D Saraoz-Dominguez. *J.M Rodríguez-Lelis. **
O Olvera-Tapia. ***

*Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico Interior Internado Palmira s/n,
Col. Palmira, Cuernavaca Morelos, A. P. 5-164, C. P. 62490, México dersein.saraoz17ma@cenidet.edu.mx

**Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico Interior Internado Palmira s/n,
Col. Palmira, Cuernavaca Morelos, A. P. 5-164, C. P. 62490, México jmlelis@cenidet.edu.mx

***Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México,
Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, México D. F.,

Resumen: en este artículo se realizó un análisis tribológico de la superficie de una tubería de acero al carbón y el efecto que tiene sobre el fluido al realizar un recubrimiento con diamante tipo carbono (DLC), además de que se realiza un análisis numérico de las paredes de una tubería con dos fluidos diferentes como es el petróleo y la sangre obteniendo una disminución la turbulencia, y los esfuerzos cortantes entre la superficie y el fluid, así como del trabajo de adhesión.

Palabras claves: Fluidos, Adhesión, Fricción, Petróleo, Sangre, Triboadhesión, DLC

1. INTRODUCTION

La fricción es un fenómeno complejo que involucra liberación de energía, principalmente en forma de calor. Este calor afecta las propiedades físicas de las superficies materiales, así como las químicas y físicas de cualquier elemento que este en contacto. Los problemas provocados por la fricción son motivo de investigaciones científicas, a causa de las pérdidas económicas que ocasionan.

El transporte de fluidos a través de una tubería es una actividad que requiere de equipo de bombeo. En fluidos con poca densidad como el agua, dicho transporte es fácil de realizar y los equipos de bombeo requeridos no son sofisticados. Sin embargo, para líquidos especiales como el petróleo o la sangre que posee una densidad mayor, se requiere de un método de estudio especial ya que muchas veces quedan adheridas partículas sobre la superficie la cual hace más difícil el transporte del fluido y en el caso del petróleo se requiere equipo de bombeo más sofisticado y con mayor potencia para transportar este fluido. Pero en el caso de la sangre que circula por ductos muy pequeños la adhesión de partículas puede significar un taponamiento de la circulación. Sin embargo, actualmente no existe una tubería que disminuya la fricción, las fuerzas de adhesión y los esfuerzos cortantes que provoca el paso del fluido a través de ella.

El proceso de fricción seca se usa para mejorar algunas propiedades mecánicas de una superficie. Dentro del proceso de Triboadhesión se utiliza la fricción seca para lograr la adhesión de un material de aporte, generalmente en polvo, sobre dicha superficie. Con una fresa que gira a alta velocidad se produce

calor y las partículas del material de aporte se adhieren sobre la superficie.

El diamante tipo carbono (DLC) como material de aporte, tiene una alta dureza mecánica, inercia química, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y transparencia óptica, y es biocompatible con el cuerpo humano (Ma, et al., 2009), Los recubrimientos de (DLC) por medio de triboadhesión, sirven para disminuir el coeficiente fricción y las fuerzas de adhesión, el cual se utilizará en una tubería de transporte de fluidos para disminuir la fricción, las fuerzas de adhesión y los esfuerzos cortantes al momento del transportar cualquier tipo de fluidos.

En esta propuesta se utilizará la metodología de triboadhesión para recubrir una tubería de acero al carbón, utilizando DLC como material de aporte para mejorar las propiedades de las superficies, en específico, para disminuir la fricción y mejorar la transportación de fluidos y evitar que queden adheridas partículas sobre la superficie de la tubería. Con lo anterior, se pretende diseñar una tubería en la cual las pérdidas de transporte sean mínimas.

Así se logrará disminuir la potencia de las bombas o con las mismas bombas, trasegar más líquido a mayor distancia, lo cual se traduce en un ahorro económico, y disminución de los gastos de mantenimiento y aumento de la vida útil de la tubería.

Aplicando el mismo principio al momento de usar un implante de stents para destapar las venas y arterias y evitar que se vuelva a producir un taponamiento, se pretende que al recubrir los stents con DLC disminuirá la fuerza de adhesión y el coeficiente de fricción lo cual evitar de nuevo un taponamiento en las venas aumentado la vida útil de esta.

Los primeros trabajos que reaccionaron las pérdidas de carga hidráulica debido a la fricción que existe a lo largo de una tubería dada con la velocidad media del flujo del fluido, fueron los realizados por Darcy y Weisbach (Manning & Thompson, 1991).

A lo largo de la historia se ha tratado de estudiar el comportamiento de los fluidos en una tubería y se ha ido descubriendo nuevas variables, una de ellas es la viscosidad. El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones de dinámica de fluidos fue Claude Navier en 1827 e independientemente el matemático británico George Stokes, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se les conoce como ecuaciones de Navier-Stokes (Laurencio, 2007).

Los principales métodos para disminuir la viscosidad y facilitar transporte de fluidos no newtonianos de son

- Colocación de disolvente y emulsiones (Silos Rodríguez, 2008).
- El aumento de la temperatura (Garcell, 1993).
- Campos electromagnéticos (Liang, 1999).

Hasta el momento las técnicas que existen se enfocan en mejorar o manipular las propiedades de los fluidos, por lo que en este trabajo se enfoca en mejorar y la propiedad de las superficies de las tuberías.

2. METODOLOGIA

Todo tipo de sistema fluido se basa en tres principios fundamentales de la física los cuales son: conservación de la masa; conservación del momentum y, conservación de energía; Estos se usan tanto para mecánica de fluidos además de tomar en cuenta las propiedades cada tipo de fluido, así como de su naturaleza. Figura. 1. (White, s.f.),

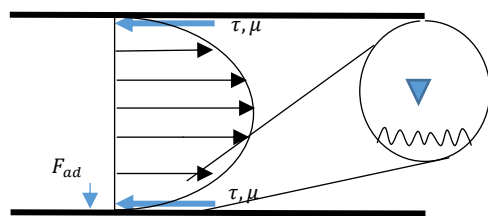


Figura. 1 diagrama de flujo en tubería

2.1 Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes involucra: Aplicar el principio de conservación de masa y fuerza-momentum y energía al volumen de control teniendo en cuenta lo que sucede en el límite cuando el volumen de control se vuelve infinitamente pequeño, aunque la derivación se puede hacer usando cualquier volumen de control con forma arbitraria por simplicidad consideramos un volumen de control cuadrada (Girault & Raviart, 1979).

Ecuación general de Navier-Stokes para un fluido (Anon., s.f.)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \bar{W} dV + \int_{\partial V} (\bar{f}v) ds = \int_V \bar{Q} dV \quad (1)$$

2.2 Viscosidad

Es aquella propiedad del fluido mediante la cual este ofrece resistencia a los esfuerzos tangenciales o cortantes. La ley de viscosidad de Newton establece que para una tasa dada de deformación angular del fluido, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la viscosidad figura 2 (Streeter, 2001).

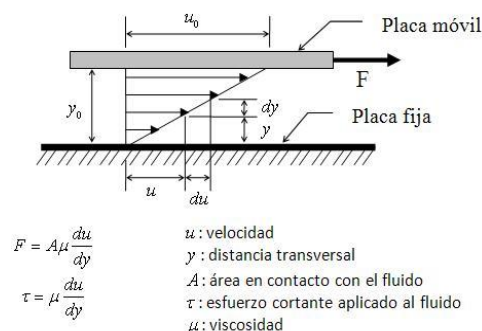


Figura. 2 Diagrama de Viscosidad

2.3 Deslizamiento

Conocer las condiciones del fluido es fundamental para resolver las ecuaciones, por lo que es un error suponer que los fluidos empiezan con una velocidad igual a cero, es decir existe un pequeño deslizamiento en la pared, el cual depende de la tensión que existe entre el fluido y la superficie; Una forma conveniente de caracterizar el flujo en la pared es introduciendo la longitud de deslizamiento como se ilustra en la Figura. 3

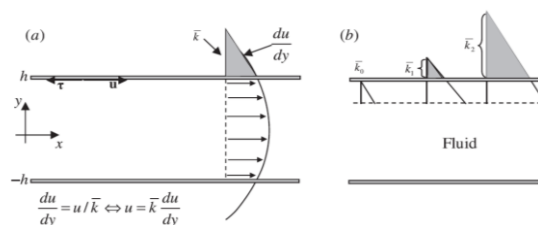


Figura. 3 Condición de límite de velocidad y longitud de deslizamiento

El desplazamiento en función de la viscosidad y el esfuerzo cortante está dado por (Ren, et al., 2016):

$$k = \frac{8u}{D} + \frac{\tau}{\eta} \quad (2)$$

2.4 Fricción solido-liquido

De acuerdo con Rabinowicz, al considerar una partícula esférica de radio R que se sumerge dentro de un fluido una distancia x, y

se genera trabajo para sobrellevar la presión del fluido como se muestra en la Figura. 4 se introduce la ecuación de energía de superficie libre, la cual contiene la suma de las energías libres que interactúan en las superficies, donde se obtienen las siguientes ecuaciones (Rabinowicz, 1965).

$$G = U - W \quad (3)$$

Considerando las contribuciones de la energía superficial y la adhesión se tienen

$$G = 2\pi R x (\sigma + \gamma_{ab}) - 2\pi R x^2 P \quad (4)$$

G es el cambio de energía, P es la presión, σ es la tensión superficial, y γ_{ab} es la energía de adhesión entre los dos materiales

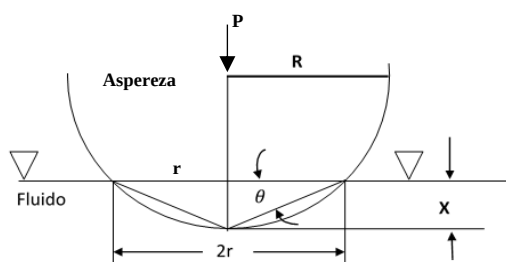


Figura. 4 Rugosidad esférica dentro de un fluido

Cuando el fluido adquiere la forma de las asperezas la derivada de G es cero, al despejar la presión e introducir la ecuación de coeficiente de fricción se obtiene el coeficiente de fricción en la interfaz sólido-líquido el cual está dado por (Rodríguez, et al., 2007):

$$f = \frac{\tau \cot^2 \theta}{\frac{3}{4} \left(\frac{\sigma + \gamma}{R} \right)} \quad (5)$$

2.5 Triboadhesión

La fricción es un fenómeno que se compone de tres contribuciones: adhesión interfacial entre asperezas en contacto, acción cortante de la película del fluido viscoso y la deformación durante el movimiento relativo (Prokopovich & Perni, 2010)

La técnica de triboadhesión consiste en hacer girar una fresa alta velocidad y pasar un material de aporte en forma de polvo sobre la superficie del material base por recubrir, esta técnica mejora las propiedades mecánicas de la superficie (Rodríguez, 1997)

3. MATERIAL

Los materiales a analizar son el diamante tipo carbón (DLC) como material para recubrimiento, las tuberías de petróleo, que son elevados con acero al carbón x52, acero inoxidable con el cual están elaborados los stent, petróleo crudo maya y sangre.

El Diamante tipo carbono (DLC) por su alta dureza, una gran resistencia al desgaste y un bajo coeficiente de fricción favorecen

la aplicación de diamante tipo carbón (DLC) como revestimiento sus propiedades se observan en la tabla 1 (Grill & Meyerson, 1994).

Tabla 1 Propiedades del diamante tipo carbón.

Densidad	Módulo de elasticidad	Esfuerzo último	Dureza	Energía superficial	Poisson
2200 kg/m ³	800 GPa	4.5 GPa	20 GPa	20.80 J/m ²	0.20

Los aceros al carbono son aleaciones hierro-carbono con un porcentaje en peso de carbono desde un 0.003 a un 1.2 por ciento, e incorporan manganeso de un 0.25 a un 1 por ciento, de este se derivan varios tipos de acero dependiendo del uso que se le dese dar y de las propiedades (Shachelford, s.f.).

Para el caso de las tuberías de transporte de ductos existen una serie de normas que den de cumplir para poder ser utilizado, uno de las tuberías aceptadas por las normas de Pemex son los acero al carbón grado X52 API 5L y sus propiedades se muestran en la

Tabla 2.

Tabla 2 Propiedades de acero al carbón X52 API 5L (Lavigne, et al., 2017) (GMBH, s.f.).

Densidad	Módulo de elasticidad	Esfuerzo último	Dureza	Energía superficial	Poisson
7850 kg/m ³	210 GPa	455 Mpa	200 GPa	8 J/m ²	0.3

El acero utilizado en para la fabricación de los stents son de acero inoxidable y las propiedades se encuentra en la Tabla 3.

Tabla 3 Propiedades del stent (Ghosh, et al., 2001).

Densidad	Módulo de elasticidad	Esfuerzo último	Dureza	Energía superficial	Poisson
7850 kg/m ³	193 GPa	550 Mpa	300 GPa	8 J/m ²	0.3

El petróleo de la zona maya la más influyente en el país por lo que se toma las propiedades físicas y se reflejan en la Tabla 4.

Tabla 4 Propiedades del crudo Maya (Sandoval, 1998), (Mobarak, et al., 2014) (Jokuty, et al., 1996).

Material	Densidad	Energía Sup.	radio molecular	viscosidad dinámica	tensión superficial
Petróleo	927 Kg/m ³	8.56 J/m ²	1.54x10 ⁻¹⁰ m	86.7 pas.s	0.0309 N/m

4. METODO NUMERICO

El análisis de simulación numérica se realizó en el programa Fluent de ANSYS 18, se realizaron dos geometrías diferentes para el análisis, una para el stent y otra para la tubería, se asignaron las propiedades y las restricciones de cada sistema Figura. 5.

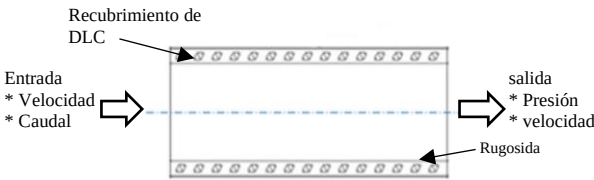


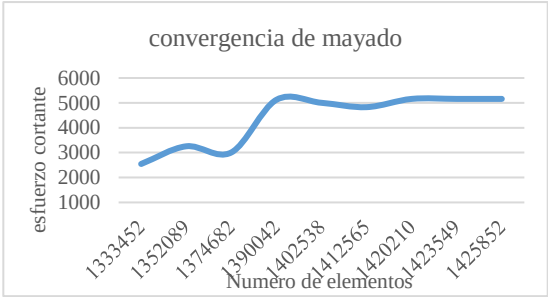
Figura. 5 Discretización del modelo de material

Los valores de entrada y los datos de la simulación de la sangre y el stent se encuentran en la tabla 1.

Tabla 5 Valores de entrada para simulación del stent

Datos	Valores
Velocidad de entrada	0.0983 m/s
Caudal	4.94x10e-6 m3/s
Diámetro	0.008 m
Área de sección transversal	5.03x10e-5 m2
Nodos	456212
Elementos	425852

Grafica 1 Convergencia de maya



Se realizó un análisis de una tubería a la cual se le asignaron las propiedades de acero x52 el cual es usado en las tuberías de transporte de petróleo. En la Tabla 6 se muestran los valores de entrada para la simulación numérica.

Tabla 6 Valores de entrada para la simulación de la tubería

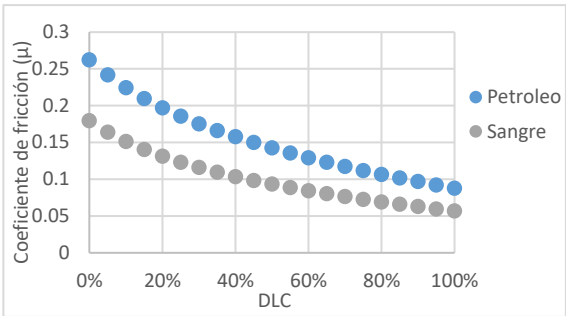
datos	Valores
Velocidad de entrada	1.697 m/s
caudal	0.00367 m3/s
diámetro	0.05251 m
Área de sección transversal	0.002165 m2
Nodos	651364
Elementos	629100

5. RESULTADOS

La Grafica 2 muestra el comportamiento del coeficiente de fricción del petróleo con una tubería de acero X52, el cual posee un coeficiente de fricción sin recubrimiento de $\mu=0.262$, y con recubrimiento de DLC de $\mu=0.0878$ y el coeficiente de fricción de la sangre con el stent el cual posee un coeficiente de fricción sin recubrimiento de $\mu= 0.18$ y con recubierto de DLC un coeficiente de fricción de $\mu=0.0568$.

El fluido presento un comportamiento más uniforme en el análisis con DLC, además de presentar valores más bajos de esfuerzo cortante y de turbulencias como se observa en la Figura.

6, las fuerzas de adhesión paso de 64.82 j/m2 a 40.20 j/m2 es decir disminuyó un 37.9% respecto al stent sin recubrimiento.



Grafica 2 coeficiente de fricción en función del porcentaje de DLC

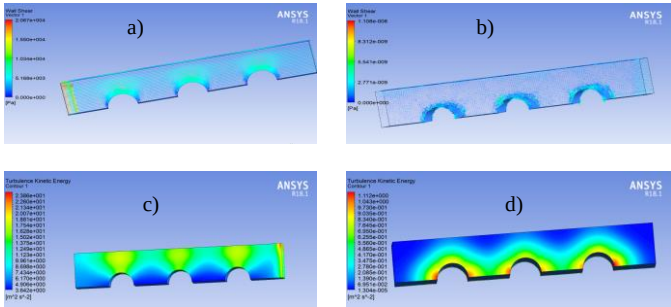


Figura. 6 Esfuerzo cortante en stent a)sin recubrimiento b) con recubrimiento y Turbulencia c) sin DLC d) con DL

Los valore de cortante, velocidad y turbulencia se ven reflejado en la Tabla 7 comparación de datos obtenidosTabla 7 donde se puede observar que los valores disminuyeron cuando el material esta recubierto con DLC

Tabla 7 comparación de datos obtenidos de simulación del stent

Parámetros	Sin DLC	Con DLC
Cortante	3.489 Pa	1.609 Pa
Velocidad	3.547m/s	1.697m/s
Turbulencia	4.95 m^2/s^2	7.57e-3 m^2/s^2
Reynols	9000	6000

En el caso del petróleo con el ducto de se obtuvo una menor turbulencia y menor esfuerzo cortante entre la superficie del ducto y el fluido como se observa en la Figura. 7. Y los valore

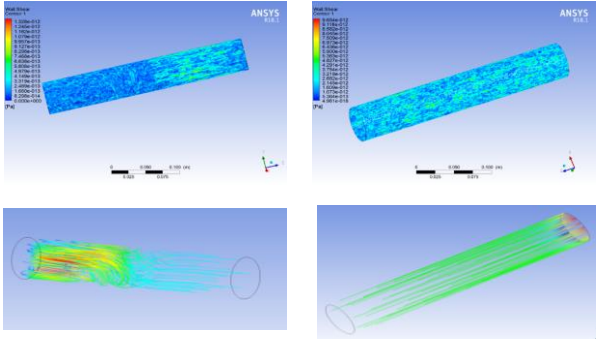


Figura. 7 esfuerzo Cortante a) sin DLC b) con DLC y turbulencia c) sin DLC d) con DLC

de cortante, velocidad y turbulencia se ven reflejado en la Tabla 8 Tabla 7 comparación de datos obtenidos

Tabla 8 datos obtenidos de simulación de tubería

Parámetros	Sin DLC	Con DLC
Cortante	5.16e3 Pa	2.71e-3 Pa
Velocidad	1.34e-1 m/s	2.67e-1 m/s
Turbulencia	15.2 m ² /s ²	0.625 m ² /s ²
Reynolds	12000	8000

6. CONCLUSIONS

El recubrimiento de por triboadhesión es uno de los métodos para mejorar las propiedades de la superficie, como es la aumentar la vida útil, aumentar la resistencia al desgaste y a la corrosión, y disminuir el coeficiente de fricción.

Al realizar el análisis numérico sobre el efecto que tiene un recubrimiento de DLC en la tubería se pudo observar que el coeficiente de fricción en el caso del petróleo y el ducto fue de 0.262 y con el recubrimiento de DLC fue de 0.0878, es decir tubo una disminución del 66.48%, esto se vio reflejado en la disminución de los esfuerzos cortantes los cuales pasaron de 3.489 Pa a 1.609 Pa disminuyendo un 46.11% y la turbulencia paso de $4.95 \text{ m}^2/\text{s}^2$ a $7.57 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ disminuyendo un 98.4%.

En el caso del stent y la sangre el coeficiente sin DLC fue de 0.18 y con DLC de 0.0568 disminuyó un 68.4 %, el esfuerzo cortante paso de $5.16 \times 10^3 \text{ Pa}$ a $2.71 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ disminuyendo 99.9% y la turbulencia paso de $15.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ a $0.625 \text{ m}^2/\text{s}^2$ disminuyendo un 95.18%

La disminución de los esfuerzos cortante y la turbulencia en ambos casos se ve reflejado en un flujo más uniforme y con menos adhesión de partículas en las superficies, por lo que el proceso de triboadhesión en tuberías para disminuir el coeficiente de fricción y las fuerzas de adhesión es muy factible y eficiente.

REFERENCES

Anon., S.F. Ecuaciones De Navier-Stokes. Fenomenos Turbulentos. S.L.:S.N.
Garcell, L., 1993. Composición Mineralógica De Las Suspensiones De Limonita De Moa, En Períodos, S.L.: S.N.
Ghosh, P., Dasgupta, K., Nag, D. & Chanda, A., 2001. Numerical Study On Mechanical Properties Of Stents With Different Materials During Stent Deployment With Balloon Expansion. Bangalona, S.N.
Girault, V. & Raviart, P.-A., 1979. Finite Element Approximation Of The Navier-Stokes Equations. New York: Springer-Verlag.
Gmbh, T. M. I., S.F. Material Data Sheet X52 , S.L.: S.N.

Grill, A. & Meyerson, B., 1994. Synthetic Diamond: Emerging Cvd Science And Technology. S.L.:Wiley.
Jokuty, P., Whiticar, S., Mcroberts, K. & Mullin, J., 1996. Oil Adhesion Testing - Recent Result. Ottawa, Canada, S.N., Pp. 9-27.
Laurencio, H., 2007. Método De Cálculo Para El Transporte De Emulsiones De Petróleo Pesado Por Tuberías, Cuba: S.N.
Lavigne, O., Kotousov, A. & Luzin, V., 2017. Microstructural, Mechanical, Texture And Residual Stress Characterizations Of X52 Pipeline Steel. Metals , 7(8), Pp. 306-316.
Liang, C., 1999. Experimental Study Of The Effect Of Magnetic Treatment On Crude Oil In A Pipeline. Oil & Gas Storage Transport, Pp. 152-178.
Manning, F. & Thompson, R., 1991. Oilfield Processing Of Petroleum. Natural Gas, Volumen 1, P. 293.
Mobarak, H. Y Otros, 2014. Tribological Properties Of Amorphous Hydrogenated (A-C:H) Andhydrogen-Free Tetrahedral (Ta-C) Diamond-Like Carbon Coatings Underjatropa Biodegradable Lubricating Oil At Different Temperatures. Applied Surface Science, Pp. 581-592.
Prokopovich, P. & Perni, S., 2010. Prediction Od The Frictional Behavior Od Mammalian Tissues Against Biomaterials. Elsevier.
Rabinowicz, E., 1965. Friction And Wear Of Materials. New York: John Wiley & Sons.
Ren, Z., Huang, X. & Liu, H., 2016. Wall Slip Velocity Measurement Of Molten Polypropylene In Capillary Flow Based On Length-Corrected Mooney Technique. Applied Polymer Science, 134(8), Pp. 1-14.
Rodriguez, J., 1997. Proceso Para Recubrir Placas Metálicas Con Óxidos Metálicos Por Fricción Seca, Cuernavaca: S.N.
Rodriguez, J. M. Y Otros, 2007. Effect On The Film Pressure Distribution On A Hydrodynamic Tilting Pad Bearing Caused By The Coating Of The Journal With Dlc By Triboadhesion. Asme.
Sandoval, A., 1998. Los Crudos Mexicanos, Sus Características, S.L.: S.N.
Shachelford, J., S.F. Introduccion A La Ciencia De Materiales Para Ingenieros.. 6a Edicion Ed. S.L.:Pearson.
Silos Rodriguez, J. M., 2008. Manual De Lucha Contra La Contaminación Por Hidrocarburos. España: Universidad De Cadiz.
Streeter, V., 2001. Fluid Mechanics. 9a Edición Ed. S.L.:Mc Graw Hill.
White, F., S.F. Fluid Mechanics. 4a Edicion Ed. S.L.:Mc Graw Hill.

Comparación de Wavelets madre como Herramienta de Extracción de Características en Señales de Resonancia Magnética

C.A. Martínez-Hernández * J.M. Rodríguez-Lelis **
M. Vargas-Treviño ***

* *Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Nacional de
Investigación y Desarrollo Tecnológico, México, (e-mail:
alejandro.martinez17me@cenidet.edu.mx).*

** *Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Nacional de
Investigación y Desarrollo Tecnológico, México, (e-mail:
jmlelis@cenidet.edu.mx)*

*** *Escuela de Sistemas Biológicos e Innovación Tecnológica,
Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, México, (e-mail:
mvargas.cat@uabjo.mx)*

Resumen. En este artículo, se presenta una comparación entre seis wavelets madre, utilizadas para aplicar la transformada wavelet continua sobre señales de resonancia magnética, con el objetivo de identificar la más adecuada para extraer información de las señales de resonancia magnética. Se utiliza la transformada wavelet continua en 1D debido a que la señal está compuesta de diversas frecuencias de precesión de los espines de Hidrógeno, las cuales son afectadas por las propiedades mecánicas de los tejidos, debido a su composición. Se extrae información de las señales y se reconstruyen imágenes, las cuales se clasifican en tres categorías: contenido de tejidos, borde de tejidos y similares a la original. Las wavelets Morlet y Meyer destacan en la detección de bordes de tejido, mientras que las wavelets Coiflet, Daubechies, Symlet y Biorthogonal tienen un rendimiento similar en la información extraída para formar imágenes de bordes y contenido de tejido.

Keywords: Resonancia magnética, Transformada wavelet, Procesamiento de señales, Extracción de información, Tejidos, Imágenes.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo y mejora de métodos de adquisición de imágenes médicas, tales como la tomografía computarizada (TC), la resonancia magnética nuclear (RMN) y sus modalidades, permiten obtener imágenes de alta resolución, Buzug (2008). Investigadores han sugerido su uso para analizar y caracterizar los tejidos humanos. Harding et al. (1987) usaron patrones de difracción de rayos X de CT mientras que Lee et al. (2005) utilizaron imágenes de resonancia magnética nuclear.

Todos los tejidos están constituidos por células y material intracelular. Las propiedades de cada tejido están relacionadas directamente con su composición; porciones de lípidos, proteínas y agua en el tejido, también su arquitectura a nivel elemental, Holmes (2013); Duck (2013). Los cambios en la composición pueden ser una señal de enfermedad, Hansma et al. (2009).

Los médicos radiólogos pueden detectar, analizar y clasificar anomalías en el tejido a través de imágenes médicas. Sin embargo, esta tarea requiere de mucha experiencia por parte del profesional y es propensa a errores debido a la cantidad de imágenes que se analizan, por lo que, los investigadores buscan proporcionar herramientas que permitan la segmentación, clasificación y diagnóstico del tejido, aumentando la efectividad y reduciendo el tiempo.

La resonancia magnética (RM), propuesta por Lauterbur et al. (1973), utiliza las propiedades mecánico-cuánticas de los núcleos atómicos, de modo que los materiales deben tener núcleos con propiedades magnéticas específicas: núcleos de fácil excitación con una gran relación giro magnética γ y que sean abundantes en la muestra.

La señal total adquirida durante el experimento de resonancia magnética, puede ser definida por (1), McRobbie et al. (2017).

$$S(m, n) = \int \int \rho(x, y) \cdot e^{\frac{-t}{T_2^*}} \cdot e^{i\gamma 2\pi(xK_{FE} + yK_{PE})} \quad (1)$$

A excepción del término T_2^* , S tiene la forma de una transformada de Fourier inversa de la densidad del spin $\rho(x, y)$. Las señales se guardan en una matriz de frecuencias espaciales, llamada espacio K, esta matriz permite analizar las características específicas de los espines en cada señal, Blümmler et al. (2008).

El procesamiento de señales es un área que permite extraer e interpretar información a través de métodos matemáticos. El análisis de wavelets en señales biomédicas se ha utilizado ampliamente, debido a que permite conocer las características temporales de la señal utilizando sus componentes espectrales en el dominio de la frecuencia, Unser and Aldroubi (1996); Akay (1995); Georgiou and Cohen (2001); Georgiou et al. (2001).

La extracción de información a través de señales RM esta basado en el análisis de los tiempos de relajación de las magnetizaciones, análisis de componentes espectrales, técnicas de espectroscopia, cuyo objetivo es segmentar y cuantificar lesiones en tejidos humanos, West (2014); Vergeldt et al. (2017).

La transformada wavelet continua definida por la ecuación (2), permite crear conjuntos de información en escala y tiempo. Estos conjuntos son generados por una función fija única, llamada “wavelet madre”, y se define por la ecuación (3).

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi^* \left(\frac{(t-b)}{a} \right) dt; \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (2)$$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{w \left[\frac{t-b}{a} \right]}{\sqrt{|a|}}; a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (3)$$

La transformada wavelet continua proporciona un conjunto de valores, denominados coeficientes de correlación, los cuales indican el nivel de correlación entre la señal, $x(t)$, y la “wavelet madre” utilizada, $\psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$, en determinada escala a , a través de los desplazamientos b .

Tomando los coeficientes de correlación (CC) en un intervalo de factores de escala se puede construir una imagen llamada escalograma, en la cual se representan los valores de los CC en valor absoluto. Esta imagen facilita la detección de factores de escala donde coinciden las características suaves de la señal con la “wavelet madre”. Para oscilaciones sinusoidales, los coeficientes proporcionados por la transformada wavelet continua muestran valores altos en escalas donde la wavelet se aproxima al período de la onda sinusoidal, Misiti et al. (2013).

Para Ngui et al. (2013), una de las dificultades en la transformada wavelet es la elección de la “wavelet madre”, debido a que no existe un método estándar o general para seleccionar una wavelet adecuada. Una practica común

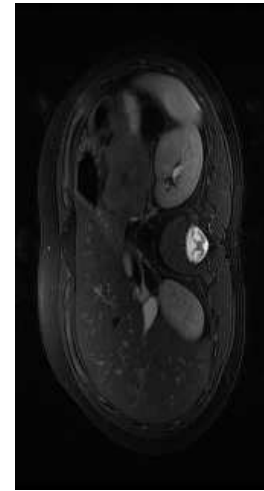


Fig. 1. Estudio utilizado: Torso superior, corte axial. El estudio consta de 40 rebanas, fue descargado del sitio www.mridata.org, Epperson et al. (2013). El tamaño de la matriz de señales es 320×168 . Las señales fueron adquiridas utilizando una trayectoria cartesiana, con un intervalo de muestro de $16 \mu s$ y un ancho de banda de 62.5 kHz .

es seleccionar “wavelet madre” a través de la forma de la señal, en este trabajo se eligieron seis “wavelet madre” cuya forma sea similar al de la señal de resonancia magnética.

2. MATERIALES Y MÉTODO

La comparacion de wavelets se realizó utilizando un estudio Spin-Echo del torso superior, corte axial, Fig. 1, potenciado en densidad, el cual se encuentra en Epperson et al. (2013), cuyas señales están almacenadas con el formato de datos crudos de la International Society for Magnetic Resonance in Medicine (ISMRMRD, por sus siglas en inglés). Los archivos están guardados en un formato de datos jerárquicos (HDF5©, The HDF Group (1997-NNNN)), los cuales están estructurados en dos secciones: *encabezado XML* y *Datos-RAW*. El *encabezado XML* contiene toda la información sobre el protocolo de adquisición y proporciona parámetros que pueden ser significativos para los experimentos de reconstrucción. La sección *Datos-RAW* es un archivo binario, que contiene un bloque de datos, en forma de matriz de tipo flotante compleja, con las dimensiones descritas por el archivo de encabezado.

Previamente se realiza una transformación del dominio de las señales de resonancia magnética, pasando del dominio de frecuencia-espacial al espacial-temporal. Siguiendo el algoritmo propuesto en (Misiti et al., 2013), se implementa la transformada wavelet continua en una dimensión (1D) para extraer la información de los tejidos tal como se muestra en la Fig. 2.

Las señales de resonancia magnética a las cuales se les aplica la transformada wavelet continua están en forma

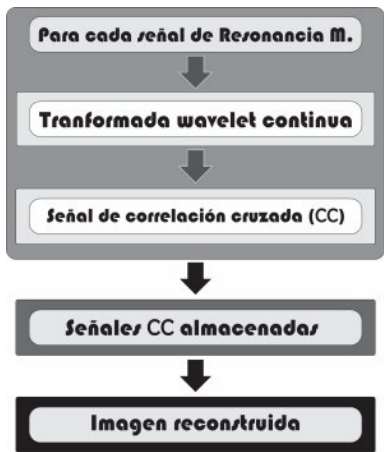


Fig. 2. Extracción de información: A cada una de las señales del estudio del torso, se le aplica una transformada wavelet continua en 1D, haciendo uso de una “wavelet madre” y una factor de escala particular, se obtiene una señal de correlación cruzada, la cual es almacenada. Luego de repetir el proceso hasta terminar con las señales del estudio se reconstruye una imagen usando las señales almacenadas previamente.

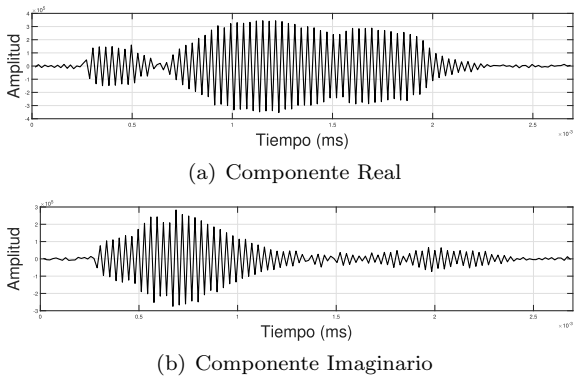


Fig. 3. Señal de resonancia magnética del Torso superior, Epperson et al. (2013), se presentan su componente real e imaginario

compleja, un ejemplo de ella se muestra en la Fig. 3, la componente real, Fig. 3(a), y la componente imaginaria Fig. 3(b).

Con el fin de comparar las seis “wavelet madre”, en la Tabla 1, se muestran principales familias utilizadas en la literatura de acuerdo con Misiti et al. (2013).

Un ejemplo de la descomposición de la señal a través de la transformada wavelet continua se muestra en Fig. 4.

La información extraída de las señales permite generar imágenes, tales como se muestran en Fig. 5, las cuales se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- Original. Es similar a la imagen inicial, Fig. 5(a).
- Contenido de tejido. Se muestra una región de tejidos presentes, Fig. 5(b).

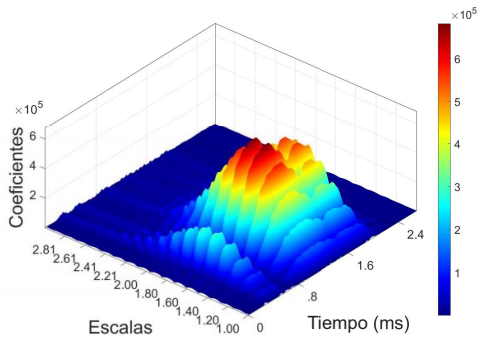


Fig. 4. Descomposición de la señal: A cada una de las señales del estudio del torso se le aplica una transformada wavelet continua en 1D, esto permite generar un escalograma, el cual ayuda a identificar donde se presenta una alta correlación.

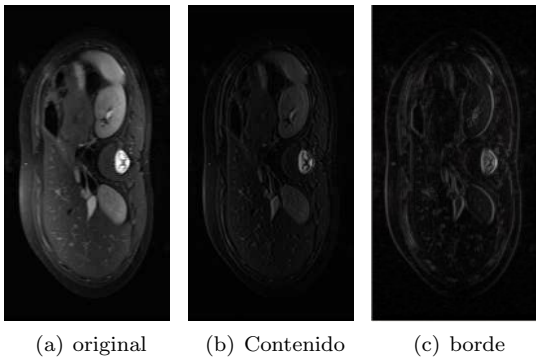


Fig. 5. Imágenes construidas de Torso superior, Epperson et al. (2013), con la información extraída se pueden generar tres tipo de imágenes: original, contenido de tejidos y borde de tejidos.

- Bordes de tejido. Se muestra únicamente los bordes de los tejidos, Fig. 5(c).

3. RESULTADOS

Las imágenes generadas utilizando la metodología de la Fig. 2, a través de un factor de escala particular, 1.603, y variando la wavelet madre utilizada. En la Fig. 6 se puede apreciar que no existe similitud entre la información de las imágenes construidas luego de la extracción a pesar de compartir la misma escala. En particular, la imagen

Tabla 1. Principales familias de “wavelet madre” utilizadas en Misiti et al. (2013)

Familia de wavelet
Coiflet
Morlet
Daubechies
Symlet
Biothogonal
Meyer

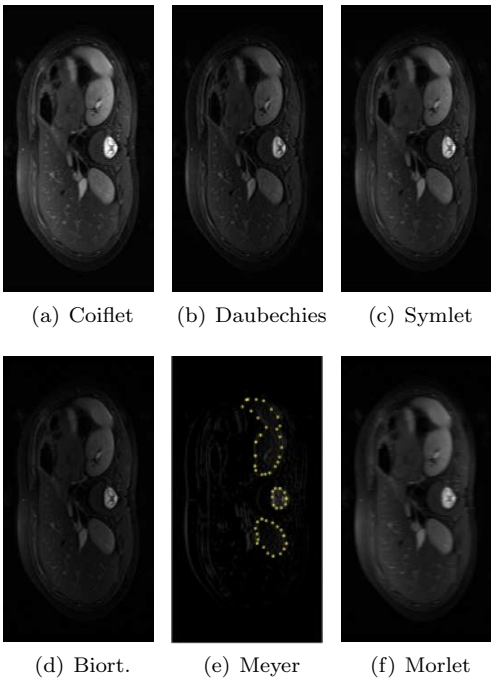


Fig. 6. Imágenes construidas de Torso superior Epperson et al. (2013), utilizando cada una de las wavelet de la tabla 1, utilizando la escala 1.603.

generada con la información extraída a través de la wavelet Meyer, Fig. 6(e) en la cual se observa la columna vertebral y los riñones, pero no los demás órganos.

La frecuencia relativa se puede calcular a través del factor de escala, es necesario conocer la frecuencia de muestreo de nuestra señal. El muestreo de la señal utilizada es de $16\ \mu s$, por lo que se pueden construir imágenes a partir de una frecuencia en particular. La información extraída de las señales permite conocer aquellas partes de tejidos que comparten una frecuencia en particular y que están relacionadas con la wavelet utilizada. En la Fig. 7 se muestran imágenes cuya información extraída proviene de la misma frecuencia central, 31 kHz.

A través la metodología mostrada en la Fig. 2 se generaron 2000 imágenes para cada una de las wavelet descritas en la tabla 1. Las imágenes se clasificaron dentro de las categorías: Original, Contenido de tejido y Bordes de tejido, en la tabla 2 se muestra el número de imágenes en cada categoría.

La forma de la wavelet, depende de la escala utilizada, tal se puede apreciar en la Fig 8, cuya frecuencia central es de 31 kHz, se observa que las wavelet que proporcionan bordes, como los de la Fig. 7(a), o contenido de tejido, Fig. 7(f), tienen una forma parecida, mientras que las wavelet que proporcionan imágenes similares a la original también presentan similitud entre ellas.

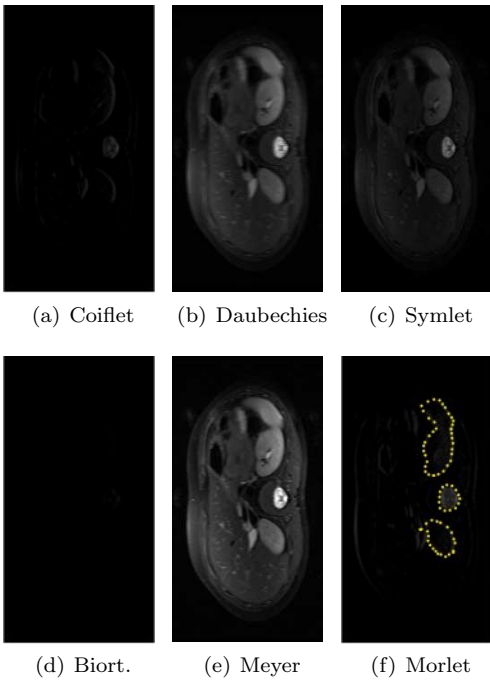


Fig. 7. Imágenes construidas de Torso superior relativas a la frecuencia 31 kHz, Epperson et al. (2013), utilizando cada una de las wavelet de la tabla 1.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Las wavelet Meyer y Morlet destacan en la extracción de información de bordes al tener tener casi el doble de imágenes dentro de esa categoría respecto las wavelets Coiflet, Daubechies, Symlet y Biorthogonal, como se puede apreciar en el gráfico de la Fig. 9. En el caso de las imágenes con contenido de tejido, las wavelet utilizadas tienen permite generar un número similar de imágenes con contenido de tejido, tal como se muestra en la Fig. 9.

Debido a la influencia de la forma de la “wavelet madre” para extraer información de la señal, es necesario utilizar un combinación de ellas de tal forma que permitan mejorar la extracción. Existen escalas donde se extrae información de bordes o de contenido de tejido independientemente del tipo de wavelet. Esto es la base para cuantificar las propiedades mecánicas de tejidos a través de las señales de resonancia magnética.

Tabla 2. Número de imágenes clasificadas dentro de las categorías, O = Original, CT = Contenido y BT = Bordes.

Wavelet Madre	O	CT	BT
Coiflet	1221	295	484
Daubechies	1209	296	495
Symlet	1293	254	453
Biorthogonal	1319	299	382
Meyer	993	273	734
Morlet	897	334	769

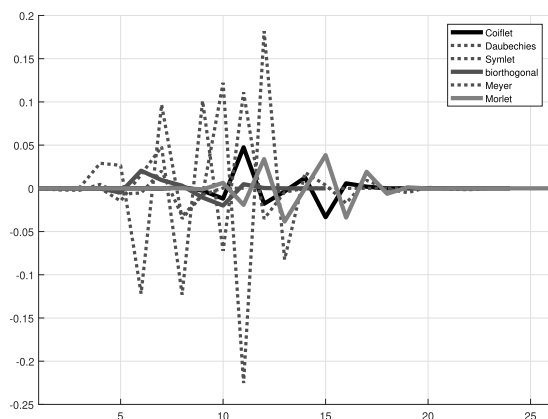


Fig. 8. Comparación de la forma de las wavelets con frecuencia similar. Las wavelet con línea continua son aquellas que permiten extraer bordes o contenido de tejido, mientras que, las wavelet con líneas punteadas no permiten diferenciar la información.

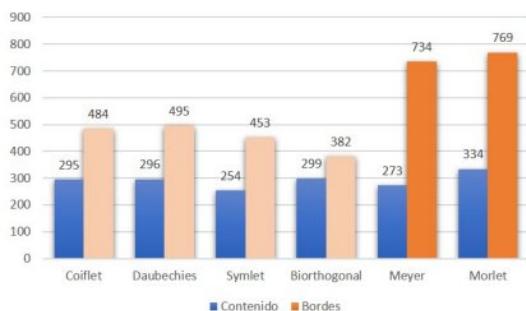


Fig. 9. Comparación entre el número de imágenes con bordes (naranja) y contenido de tejidos (azul).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET-TecNM) y la unidad de Sistemas Biológicos e Innovación Tecnológica (SBIT-UABJO) por el apoyo brindado durante la realización de esta investigación.

También agradecemos al grupo del Prof. Michael Lustig en UC Berkeley y al grupo del Prof. Shreyas Vasanawala en el Hospital de Niños Lucile Packard de Stanford por el conjunto de datos del sitio web mridata.org.

REFERENCIAS

Akay, M. (1995). Wavelets in biomedical engineering. *Annals of biomedical Engineering*, 23(5), 531–542.

Blümmler, P., Blümich, B., Botto, R.E., and Fukushima, E. (2008). *Spatially resolved magnetic resonance*, chapter Introduction to magnetic resonance, 713–740. John Wiley & Sons.

Buzug, T.M. (2008). *Computed tomography: from photon statistics to modern cone-beam CT*. Springer Science & Business Media.

Duck, F.A. (2013). *Physical properties of tissues: a comprehensive reference book*. Academic press.

Epperson, K., Sawyer, A., Lustig, M., Alley, M., Uecker, M., Virtue, P., et al. (2013). Creation of fully sampled mr data repository for compressed sensing of the knee. In *SMRT Conf., Salt Lake City, UT*.

Georgiou, G. and Cohen, F.S. (2001). Tissue characterization using the continuous wavelet transform. i. decomposition method. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 48(2), 355–363.

Georgiou, G., Cohen, F.S., Piccoli, C.W., Forsberg, F., and Goldberg, B.B. (2001). Tissue characterization using the continuous wavelet transform. part ii: Application on breast rf data. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 48(2), 364–373.

Hansma, P., Yu, H., Schultz, D., Rodriguez, A., Yurtsev, E.A., Orr, J., Tang, S., Miller, J., Wallace, J., Zok, F., et al. (2009). The tissue diagnostic instrument. *Review of Scientific Instruments*, 80(5), 054303.

Harding, G., Kosanetzky, J., and Neitzel, U. (1987). X-ray diffraction computed tomography. *Medical physics*, 14(4), 515–525.

Holmes, R.L. (2013). *Living tissues: an introduction to functional histology*. Elsevier.

Lauterbur, P.C. et al. (1973). Image formation by induced local interactions: Examples employing nuclear magnetic resonance. *Nature*, 242(5394), 190–191.

Lee, K.Y., Masi, J.N., Sell, C.A., Schier, R., Link, T.M., Steinbach, L.S., et al. (2005). Computer-aided quantification of focal cartilage lesions using mri: accuracy and initial arthroscopic comparison. *Osteoarthritis and cartilage*, 13(8), 728–737.

McRobbie, D.W., Moore, E.A., and Graves, M.J. (2017). *MRI from Picture to Proton*. Cambridge university press.

Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., and Poggi, J.M. (2013). *Wavelet Toolbox Getting Started Guide*. Mathworks.

Ngui, W.K., Leong, M.S., Hee, L.M., and Abdelrhman, A.M. (2013). Wavelet analysis: mother wavelet selection methods. In *Applied mechanics and materials*, volume 393, 953–958. Trans Tech Publ.

The HDF Group (1997-NNNN). Hierarchical Data Format, version 5. <https://www.hdfgroup.org/HDF5/>.

Unser, M. and Aldroubi, A. (1996). A review of wavelets in biomedical applications. *Proceedings of the IEEE*, 84(4), 626–638.

Vergeldt, F.J., Prusova, A., Fereidouni, F., Van Amerongen, H., Van As, H., Scheenen, T.W., and Bader, A.N. (2017). Multi-component quantitative magnetic resonance imaging by phasor representation. *Scientific reports*, 7(1), 861.

West, J. (2014). *Quantitative Magnetic Resonance Imaging of the Brain: Applications for Tissue Segmentation and Multiple Sclerosis*. Ph.D. thesis, Linköping University Electronic Press.

Resistencia de la unión eje/cubo mediante un modelo por elementos finitos

Salgado C. Manuel*. Cortés G. Claudia*. Szwedowicz W. Dariusz*. Martínez R. Eladio*
Estrada Quirino**. Bedolla H. Jorge***

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Morelos*
e-mail: manuelsc@cenidet.edu.mx.

** *Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma, Ciudad Juárez, Chihuahua.*

*** *Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Apizaco, Apizaco, Tlaxcala.*

Abstract: The present work describes a finite element model of a shaft/hub joint with an interference fit of Ø20H7/s6; which aims to evaluate and analyze the axial strength of the joint according to the surface roughness of the parts in contact. This surface roughness is a function of the normal contact stiffness. First the model was validated with the thick-walled cylinder equations. Then it was evaluated and analyzed with the normal contact stiffness. The model was made with a software of finite element. The results obtained show that the surface roughness contributes to the reduction of the load capacity of this type of joints.

Keywords: Normal contact stiffness, surface roughness, extraction force.

1. INTRODUCCIÓN

Las uniones eje/cubo se basan en el principio de los ajustes de interferencia. Dependen de la diferencia de diámetros para poder realizarse la unión. El ensamble se realiza por prensa o temperatura. La ausencia de sujeción convencional como el uso de llaves, rosca o cuñas, los hace compactos y estéticos en apariencia (Ramachandran and Radhakrishnan, 1974). Debido al bajo costo de fabricación, el fácil montaje y la integridad compacta, los ajustes de interferencia proporcionan momentos de torsión y fuerzas axiales elevadas (Buczkowski and Kleiber, 2016).

Sus aplicaciones son: en portaherramientas de corte, ruedas y bandas para material ferroviario, discos de turbina, rotores para motores eléctricos, poleas y para ubicar rodamientos de bolas y rodillos. También son una forma efectiva de ensamblar elementos de la máquina, como un engrane a un eje para transmitir el par y resistir el empuje axial a través de la resistencia a la fricción (Booker and Truman, 2011).

Los factores que afectan el rendimiento de un ajuste de interferencia son: (1) diámetro del eje; (2) diámetro externo del cubo; (3) longitud de la articulación; (4) cantidad de interferencia; (5) propiedades del material del eje y el cubo; (6) acabado superficial de las superficies de contacto (Ramachandran and Radhakrishnan, 1974).

El efecto de los cinco primeros factores sobre la capacidad de carga de un ajuste de interferencia puede determinarse

matemáticamente utilizando la teoría de la elasticidad para cilindros presurizados (Budynas and Nisbett, 2008). Pero, el efecto del acabado superficial de las superficies de contacto es complejo de analizar por cálculos teóricos, ya que se tiene que considerar la naturaleza irregular de las superficies de contacto (Ramachandran and Radhakrishnan, 1974). Dentro del acabado superficial, el parámetro con mayor influencia es la rugosidad superficial.

Buscando en la literatura los estudios o técnicas que consideran la rugosidad en la resistencia de las uniones eje/cubo, tenemos:

(Yang *et al.*, 2001) mostraron que las rugosidades juegan un papel importante y positivo en el ajuste cilíndrico de interferencia, recomiendan utilizar procesos de fabricación económicos como el torneado para producir las superficies de ajuste, en lugar de métodos como el pulido que son mucho más caros.

(Yang *et al.*, 2002) proponen un modelo sencillo para calcular la presión real de un ajuste con interferencia. Este modelo consiste en la sustitución de la compleja área real para un área equivalente.

(Boutoutaou *et al.*, 2011) analizaron la fuerza de extracción para la unión eje-cubo de forma numérica variando defectos de forma (lóbulos). Concluyeron que la fuerza de extracción incrementa conforme se aumenta el número de lóbulos.

(Boutoutaou *et al.*, 2013) presentaron una técnica de homogeneización numérica en el comportamiento de un

ajuste de interferencia por temperatura. Este enfoque permite tomar en cuenta la influencia de la rugosidad en el modelado de piezas industriales que por lo general tienen una geometría compleja. Los resultados del modelado mostraron que la predicción de la resistencia a la extracción en el uso de los elementos homogenizados se mejoró en comparación con un enfoque que considera las superficies en contacto entre las dos partes ensambladas perfectamente lisas (sin rugosidad).

(Buczkowski and Kleiber, 2016) proporcionaron una metodología para mejorar el diseño de un ensamble por temperatura. Consideraron la rugosidad de las piezas e introdujeron una ley de endurecimiento por fricción no clásica en la cual los micro-deslizamientos tangenciales son considerados. Concluyeron en que las superficies lisas logran una mayor capacidad de carga.

Como se puede observar en esta revisión de los trabajos, encontramos dos vertientes. Una menciona que la rugosidad genera una mayor resistencia axial, pero cabe resaltar que toman como referencia la línea media del perfil de rugosidad como el diámetro nominal de la pieza. La otra vertiente concluye que las superficies lisas contribuyen a una mayor resistencia de la unión; el perfil de rugosidad se considera en que no sobrepase el diámetro nominal. Esta forma de analizar la rugosidad se considera más apegada con la realidad de la medición de los diámetros de las piezas que formarán la unión eje/cubo. En la Fig. 1 se muestra un ejemplo de cómo se considera el perfil de rugosidad superficial con respecto al diámetro nominal de la pieza, en donde se considera que los picos del perfil de rugosidad no sobrepasen el diámetro nominal.

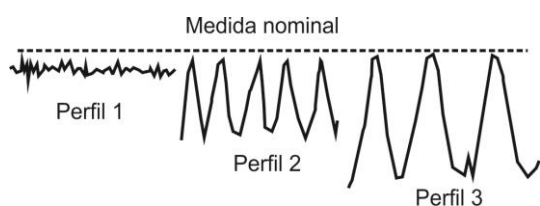


Fig. 1. Consideración del diámetro nominal respecto al perfil de rugosidad.

Debido a estas incertidumbres se plantea la hipótesis para conocer el efecto de la rugosidad superficial en la capacidad de carga de la unión eje/cubo. Para ello se desarrollará un modelo por elementos finitos con el objetivo de analizar y evaluar la resistencia axial de una unión eje-cubo Ø20 H7/s6, basándose el estudio en la rigidez normal de contacto, la cual estará en función de la rugosidad superficial de la superficie. Esta rigidez normal de contacto representará la compleja geometría del perfil de rugosidad para un modelado ligero y

práctico, ya que muchas veces el modelado de la rugosidad complica este tipo de análisis por la gran cantidad de malla a utilizar y el contacto irregular de las superficies.

2. MARCO TEÓRICO

Esta sección presenta las ecuaciones requeridas para medir la presión de contacto, la fuerza de extracción y los esfuerzos radiales y tangenciales. Además, se presenta la ecuación que considera la rugosidad superficial por medio de la rigidez normal de contacto.

2.1 Presión de contacto

Según Budynas and Nisbett, (2008), cuando se ensamblan dos partes cilíndricas por contracción o a presión una sobre la otra, se crea una presión de contacto p entre las dos partes.

$$p = \frac{\delta}{\frac{d}{E_o} \left(\frac{d_o^2 + d^2}{d_o^2 - d^2} + \nu_o \right) + \frac{d}{E_i} \left(\frac{d^2 + d_i^2}{d^2 - d_i^2} - \nu_i \right)} \quad (1)$$

Cuando el eje y el cubo son del mismo material, sería:

$$p = \frac{E\delta}{2d^3} \left[\frac{(d_o^2 - d^2)(d^2 - d_i^2)}{d_o^2 - d_i^2} \right] \quad (2)$$

donde: d es el diámetro nominal del eje, d_i es el diámetro interno (si hay alguno) del eje, d_o es el diámetro externo del cubo, E es el módulo de Young y ν es la relación de Poisson, con subíndices o e i para el cubo y el eje, respectivamente. Por su parte, δ es la interferencia diametral entre el eje y el cubo, esto es, la diferencia entre el diámetro externo del eje y el diámetro interno del cubo (ver Fig. 2).

$$\delta = d_{eje} - D_{cubo} \quad (3)$$

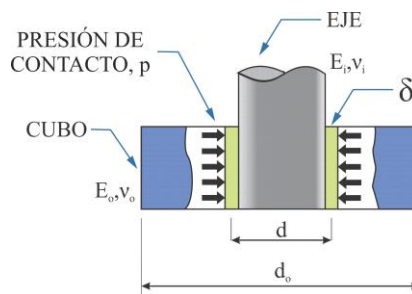


Fig. 2. Parámetros que intervienen en la presión de contacto de la unión eje/cubo.

Como habrá tolerancias en ambos diámetros, la presión mínima y máxima puede encontrarse mediante la aplicación de las interferencias mínima y máxima (Fig. 3), se expresan en la ecuación (4) y (5) respectivamente.

$$\delta_{\min} = d_{\min} - D_{\max} \quad (4)$$

$$\delta_{\max} = d_{\max} - D_{\min} \quad (5)$$

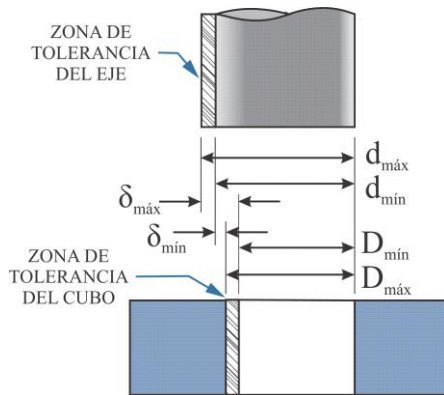


Fig. 3. Interferencia mínima y máxima por las tolerancias del eje y el cubo.

2.2 Esfuerzos radiales y tangenciales

Los esfuerzos debidos a un ajuste por interferencia pueden obtenerse si se considera al eje como un cilindro con presión externa uniforme, y el cubo como un cilindro hueco con una presión interna uniforme. Los esfuerzos tangenciales en el contacto del eje y el cubo son,

$$\sigma_{t, eje} = -p \frac{d^2 + d_i^2}{d^2 - d_i^2} \quad (6)$$

$$\sigma_{t, cubo} = -p \frac{d_o^2 + d^2}{d_o^2 - d^2} \quad (7)$$

los esfuerzos radiales en el contacto son simplemente,

$$\sigma_{r, eje} = -p \quad (8)$$

$$\sigma_{r, cubo} = -p \quad (9)$$

2.3 Fuerza de extracción

La fuerza de extracción o resistencia axial es el producto del coeficiente de fricción estático μ_s y la carga normal W que actúa en la interfaz de contacto entre el eje y el cubo. La

carga normal puede representarse mediante el producto de la presión p y el área nominal de contacto A_0 . Por lo tanto, la fuerza de extracción $F_{extracción}$ es:

$$F_{extracción} = \mu_s W = \mu_s (p A_0) = \mu_s p \pi d L_c \quad (10)$$

donde: L_c es la longitud del cubo.

2.4 Consideración de la rugosidad por medio de la rigidez normal de contacto

Para considerar el efecto de la rugosidad superficial en el contacto normal, (Buczkowski and Kleiber, 2016) recomiendan que para aplicaciones en ingeniería, la rigidez normal de contacto de superficies rugosas k_n para una presión nominal W/A_0 puede ser estimada por la siguiente ecuación:

$$k_n = \frac{3}{2} \frac{W}{A_0 \sigma} \quad (11)$$

donde: W es la carga normal de contacto, A_0 es el área nominal de contacto y σ denota la desviación estándar de la superficie rugosa. La Fig. 4 muestra cómo el contacto real de la rugosidad superficial puede ser representado por una rigidez normal de contacto.

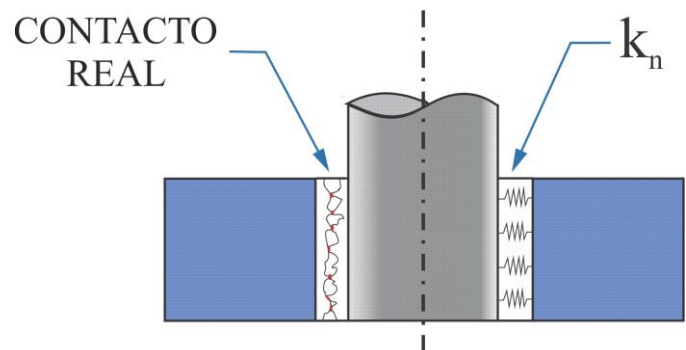


Fig. 4. Consideración de la rugosidad por medio de la rigidez normal de contacto.

3. MODELO POR ELEMENTO FINITO

3.1 Datos del ajuste

La unión eje/cubo analizada tiene un ajuste de interferencia de $\text{Ø}20\text{H7/s6}$. Los valores de los diámetros y de la interferencia se muestran en la Fig. 5.

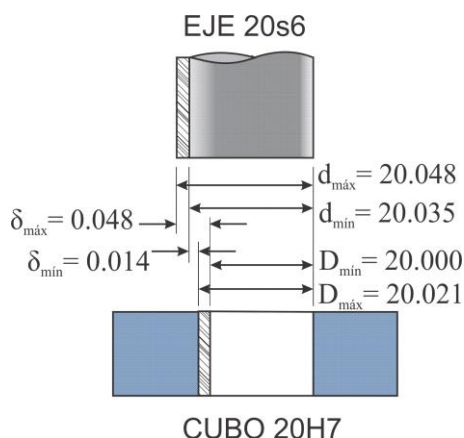


Fig. 5. Valores del ajuste $\text{Ø}20\text{H7/s6}$ para el modelo de elementos finitos en milímetros.

3.2 Material

El material utilizado en este estudio fue acero AISI 1045. Las propiedades del acero se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del acero AISI 1045.

Módulo de Young (E)	$205 \times 10^3 \text{ MPa}$
Relación de Poisson (ν)	0.29
Esfuerzo de fluencia (σ_y)	350 MPa

3.3 Consideraciones

- El eje y el cubo se consideran lisos. Se considera la rugosidad superficial por medio de un valor de rigidez normal de contacto (k_n) en la interacción.
- La opción “interference fit” se utiliza para realizar el ensamble. Por lo cual no se considera la temperatura que se utiliza para realizar el ensamble.
- El coeficiente de fricción depende de muchos parámetros (es decir, interferencia, superficies, esfuerzos de trabajo, concentración de esfuerzos, desgaste, ensamblaje, temperatura, entre otros). Se sabe que el coeficiente de fricción a presiones de ajuste por contracción es mucho más

bajo que el indicado para cargas normales bajas (Bhushan, 1999). Booker and Truman, (2004) han demostrado que el coeficiente de fricción es independiente del área. Por lo tanto, el coeficiente de fricción se considera idéntico para cada prueba. Se elige a un valor convencional de 0.15 entre acero-acero;

- El modelado se realiza con un software de elementos finitos.

3.4 Modelado numérico

Se crearon el eje y el cubo, se les asignó el mismo material (acero AISI 1045). Se declararon dos pasos para su análisis; en el paso 1 se realiza el ensamble por medio de la opción “interference fit” de elemento finito y en el paso 2 se realiza la extracción axial del eje para determinar la carga que soporta la unión. En la Fig. 6 se muestra el paso 1 “ensamble” en una vista isométrica con una sección a 180° .

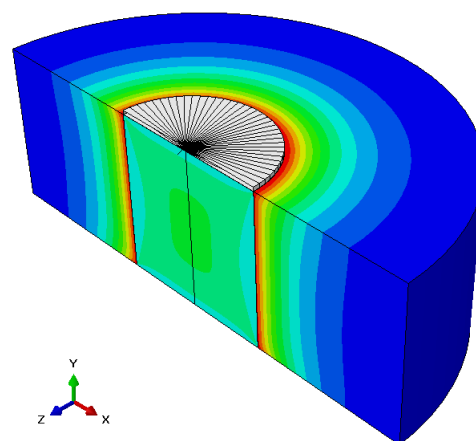


Fig. 6. Paso 1 “ensamble” del ajuste $\text{Ø}20\text{H7/s6}$ para el modelo de elementos finitos.

Se formaron dos interacciones; una entre el eje y el cubo, donde el contacto normal está en función de la rigidez de contacto de la ecuación (11), y al contacto tangencial se le asignó un valor de coeficiente de fricción de 0.15. La segunda interacción se realizó entre el eje y el cuerpo rígido para obtener la fuerza de extracción por medio de la fuerza normal de contacto por sus siglas en inglés “CFN”.

Las condiciones de frontera fueron un empotramiento en la parte inferior del cubo y un desplazamiento de 20 mm en la dirección “y” sobre el punto de referencia “RP” (ver Fig. 7).

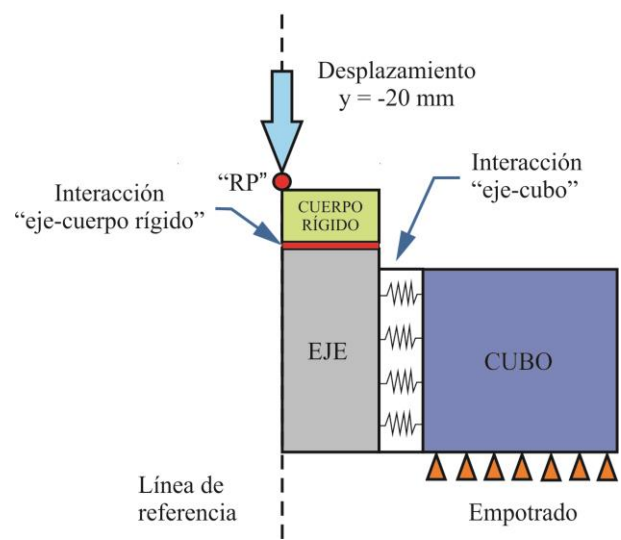


Fig. 7. Condiciones de frontera y carga.

Las condiciones de frontera y carga se aplicaron en el paso 2 “extracción” (Fig. 8), ya que en el paso 1 “ensamble” se realiza sin condiciones de frontera. El mallado de las piezas fue de 0.2 mm. El tipo de elemento que se utilizó fue el CAX4R (“A 4-node bilinear quadrilateral axisymmetric, reduced integration, hourglass control”).

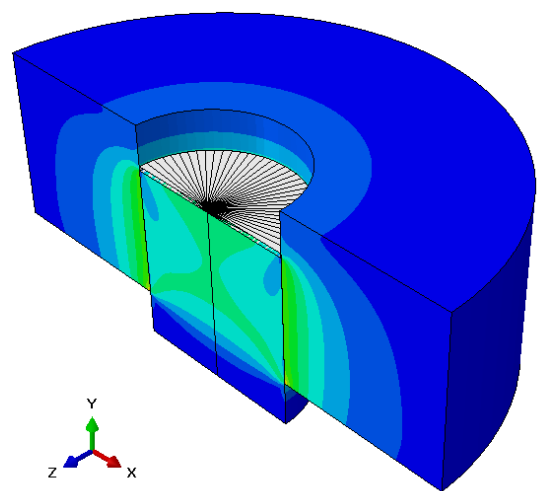


Fig. 8. Paso 2 “extracción” del eje del ajuste Ø20H7/s6.

4. COMPARACIÓN NUMÉRICA - TEÓRICA

Primeramente se realizó una comparación numérica-teórica para tener un punto de partida del estudio. Se comparó la presión de contacto y la fuerza de extracción con la finalidad de validar el modelo por elemento finito. En la Tabla 2 se muestran los resultados.

Tabla 2. Comparación numérica-teórica.

Interferencia mínima	Teórico	Numérico	% diferencia
Presión de contacto (MPa)	63.77	62.81-65.03	-1.5 – 1.97
Fuerza de extracción (N)	12,021.82	12,914.30	7.7
Interferencia máxima	Teórico	Numérico	% diferencia
Presión de contacto (MPa)	218.66	218.67-225.07	0.004 – 2.9
Fuerza de extracción (N)	41,217.69	44,278.40	7.4

La variación de la presión de contacto se atribuye a que en la ecuación (1) dan un mismo valor para todo el contacto entre las superficies del eje y el cubo. En cambio en el modelo por elemento finito la presión de contacto incrementa en el centro del contacto debido al coeficiente de fricción. Estas variaciones contribuyen también a un aumento de la fuerza de extracción en el modelo numérico. Por lo tanto, no significa que este mal el modelo por MEF, sino que la ecuación de presión de contacto no considera estas variaciones. En la Fig. 9 y 10 se muestra la gráfica de la comparación de la presión de contacto para una interferencia mínima y máxima del ajuste Ø20H7/s6 respectivamente.

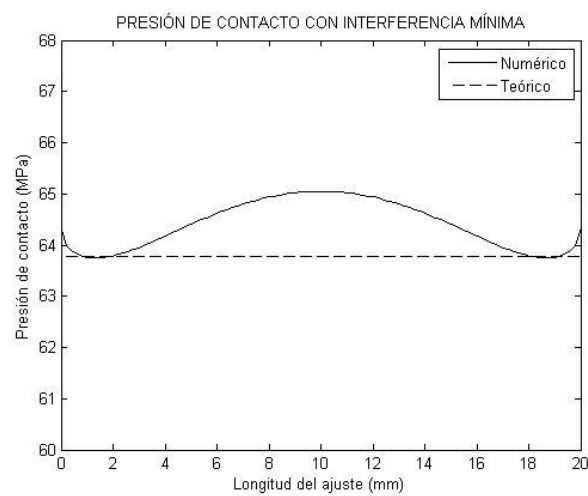


Fig. 9. Gráfica de la presión de contacto con interferencia mínima.

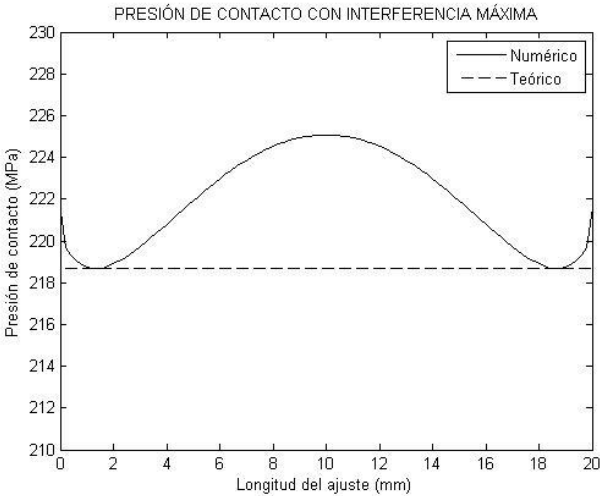


Fig. 10. Gráfica de la presión de contacto con interferencia máxima.

5. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la fuerza de extracción del modelo por el método de elemento finito de la unión eje-cubo con ajuste de interferencia Ø20H7/s6, en donde se varió el valor de la desviación estándar de la rugosidad. Ver la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de la fuerza de extracción de acuerdo a los valores de desviación estándar de la rugosidad.

Desv. σ (micras)	Fuerza de extracción mínima (N)	% de diferencia respecto al liso
Liso	12,914.30	-----
0.1	12,787.00	-0.98
0.5	12,285.70	-4.86
1	11,712.60	-9.30
5	8,535.00	-33.91

Desv. σ (micras)	Fuerza de extracción máxima (N)	% de diferencia respecto al liso
Liso	44,278.40	-----
0.1	44,165.40	-0.25
0.5	43,638.00	-1.44
1	42,960.30	-2.97
5	38,507.30	-13.03

También se graficó la fuerza de extracción mínima y máxima de la unión eje-cubo a lo largo de sus 20 mm de longitud del ajuste (Fig. 11 y 12).

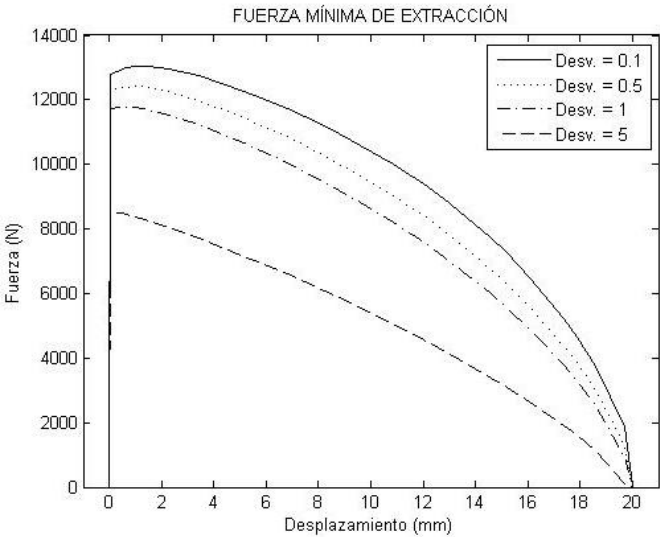


Fig. 11. Gráfica de la fuerza mínima de extracción.

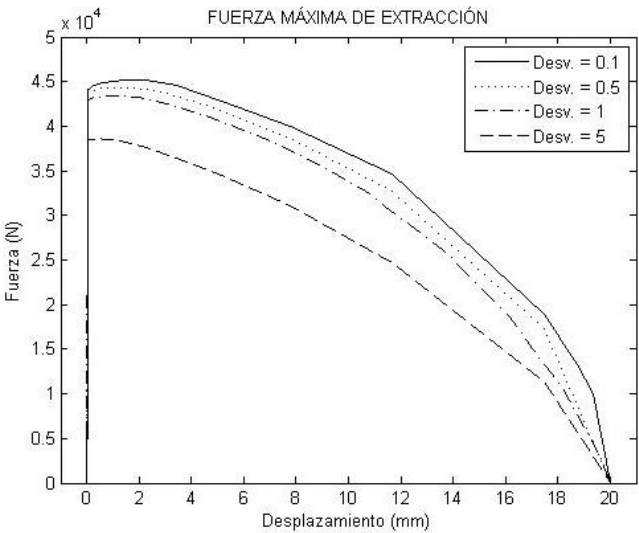


Fig. 12. Gráfica de la fuerza máxima de extracción.

Finalmente, se graficó la variación de los rangos de fuerza de extracción en función de la desviación estándar de la rugosidad superficial de las piezas (Fig. 13).

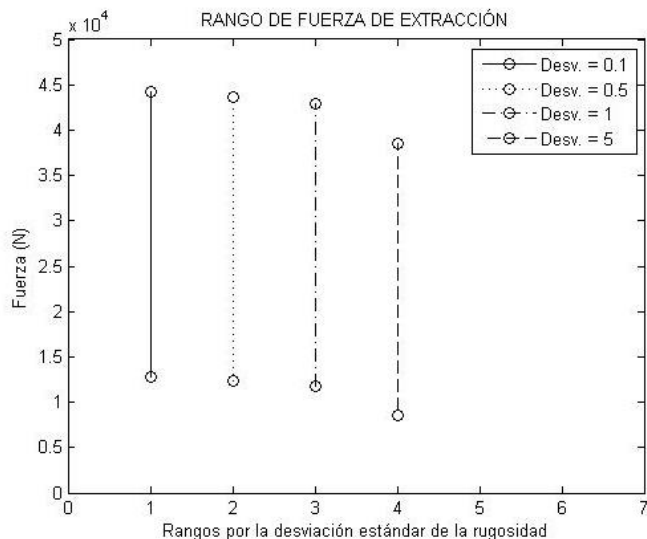


Fig. 13. Gráfica de los rangos de fuerza de extracción.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la rugosidad superficial contribuye a la disminución de la capacidad de carga de este tipo de uniones. Para todos los valores de desviación estándar de la rugosidad superficial, se redujo la fuerza de extracción. Debido a la rugosidad superficial, el ajuste Ø20H7/s6 de la unión reduce su rango de capacidad de carga.

Cabe mencionar que con un valor de $\sigma=5$ se reduce la resistencia de la unión un 13.03 y 33.91 % para una interferencia máxima y mínima respectivamente, con relación al modelo de superficies lisas.

El modelado de las uniones eje-cubo por medio de la rigidez normal de contacto para representar la compleja geometría de la rugosidad superficial de las piezas genera un modelado ligero y práctico. Muchas veces el modelado de la rugosidad complica este tipo de análisis por la gran cantidad de malla a utilizar y el contacto irregular de las superficies, lo cual se ve reflejado en un incremento del costo computacional. También cabe resaltar que sería importante analizar el comportamiento local de las rugosidades en la interfaz de contacto de la unión eje-cubo.

REFERENCIAS

- Bhushan (1999) *Principles and applications of tribology*. Edited by Wiley.
- Booker and Truman (2004) 'A comparison of shrink-fit holding torque using probabilistic, micro-mechanical and experimental approaches.', *Proc Inst Mech Eng*, part B, pp. 175–87.
- Booker and Truman (2011) 'Measuring the coefficient of friction for use in shrink-fit calculations', *TECHNIQUES*, (April), pp. 7–13. doi: 10.1111/j.1747-1567.2009.00593.x.
- Boutoutaou, Bouaziz and Fontaine (2011) 'Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account', *Materials and Design*. Elsevier Ltd, 32(7), pp. 3692–3701. doi: 10.1016/j.matdes.2011.03.059.
- Boutoutaou, Bouaziz and Fontaine (2013) 'Modelling of interference fits with taking into account surfaces roughness with homogenization technique', *International Journal of Mechanical Sciences*, 69, pp. 21–31. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2013.01.012.
- Buczowski and Kleiber (2016) 'A study of the surface roughness in elasto-plastic shrink fitted joint', *Tribology International*. Elsevier, 98, pp. 125–132. doi: 10.1016/j.triboint.2016.02.021.
- Budynas and Nisbett (2008) *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México, D.F.: The McGraw-Hill.
- Ramachandran and Radhakrishnan (1974) 'Influence of surface finish on interference fits', *International Journal of Production Research*, 12(6), pp. 705–719. doi: 10.1080/00207547408919587.
- Yang *et al.* (2001) 'Influence of roughness on characteristics of tight interface fit of a shaft and a hub', *International Journal of Solids and Structures*, 38(42–43), pp. 7691–7701. doi: 10.1016/S0020-7683(01)00035-X.
- Yang *et al.* (2002) 'Contact pressure between two rough surfaces of a cylindrical fit', *Journal of Materials Processing Technology*, 123, pp. 490–497.

Disipación de energía por deformación plástica en estructuras de pared delgada de sección compuesta bajo cargas a flexión

Julio C. Vergara*. Dariusz Szwedowicz*. Quirino Estrada**.
Ulises Jaen*. Miguel Domínguez*. Saulo Landa*.

*Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Int. Palmira S/N, C.P. 62490 Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos.
e-mail. julio.vergara17ma, d.sz, migueldominguez16m, ulises.jaen19me, saulojesuslanda@cenidet.edu.mx.

** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), Av. Plutarco Elías Calles Num. 1210, C.P 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. e-mail: quirino.estrada@uacj.mx

Resumen: En el siguiente trabajo se estudia el comportamiento de la disipación de energía empleando perfiles de pared delgada bajo cargas a flexión. Se utiliza un perfil de sección cuadrada de aluminio 6063-T5, con el cual se desarrolló el modelo discreto utilizando el software Abaqus/Explicit. Inicialmente se presenta el análisis paramétrico de la variación de la sección transversal utilizando una sección triangular, cuadrada, circular y hexagonal, para posteriormente realizar el análisis de perfiles de sección compuesta la cual presenta una mejor disipación de energía de alrededor de un 42%.

Keywords: Impacto lateral, prueba de tres puntos, perfiles de pared delgada, disipación de energía.

1. INTRODUCCIÓN

La colisión por impacto lateral es uno de los desafíos de seguridad más difíciles que enfrenta la industria automotriz en la actualidad, (Townsend, J., Kaczmar, M., & Mohamed, E.-S, 2002). El uso de perfiles de pared delgada como dispositivos de absorción de energía, aplicados a la seguridad y protección de los pasajeros, requiere satisfacer dos condiciones: reducción de la carga máxima y la maximización de la disipación de energía, (Szwedowicz et al, 2014). En los casos de los impactos laterales en los vehículos, la prueba de flexión a tres puntos caracteriza el impacto lateral, inicialmente Alexander, (1960), inicio los estudios de flexión en los cuales obtiene una fórmula para calcular la fuerza de aplastamiento en perfiles de pared delgada. Wierzbicki & Abramowicz, (1983), Abramowicz & Jones, (1986), estudiaron los efectos de la disipación de energía por deformación plástica de manera estática y dinámica. El uso de los perfiles de pared delgada en los impactos laterales presentados en la industria automotriz ha utilizado diversas variaciones con el cambio de material (Lim & Lee, 2002), multicelulares (Z. Wang, Li, & Zhang, 2016), espumas metálicas (Fang, Gao, Sun, Zhang, & Li, 2014), sección compuesta (Fu & Liu, 2019). Asimismo se han desarrollado diversos estudios realizando diversas aplicaciones; Husin, Lile, & Yaacob, (2012), estudiaron el efecto de la barra de seguridad de un automóvil empleando un perfil circular mediante el software de LS-DYNA, las variables consideradas dentro del estudio fueron el diámetro y el espesor. Ghadianlou & Abdullah, (2013), realizo el estudio

de la barra de seguridad considerando diferentes materiales (Aluminio, magnesio y acero), así como variación geométrica (perfiles multicelulares y perfiles de sección compuesta), los resultados mostraron un mejor comportamiento con el uso de perfiles de acero con perfiles multicelulares. Ghadianlou, (2012), desarrollo el análisis del daño presentado de una puerta considerando una prueba de la Estándar Federal de Seguridad de Vehículos Motorizados (FMVSS por sus siglas en inglés) No. 214, se realizaron modificaciones geométricas en la barra de seguridad utilizando perfiles de sección multicelular, los resultados presentaron un mejor comportamiento en el perfil de tres células en sentido horizontal. Estrada et al. (2018), analizo una barra de seguridad empleando un perfil de aluminio EN AW-7108T6, utilizando criterios de falla, así como el uso de perfiles multicelulares.

El siguiente artículo se presenta el análisis numérico de la disipación de energía en perfiles de pared delgada de aluminio 6063-T5. La validación del modelo discreto se realizó con una prueba de flexión de tres puntos, continuando con el estudio paramétrico; iniciando con la variación de la sección transversal para posteriormente evaluar los perfiles de sección compuesta.

2. INDICADORES DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

Para estudiar el comportamiento de los perfiles de pared delgada y conocer la absorción de energía que se origina por el colapso plástico se emplea el término resistencia al impacto (*Crashworthiness*) (Jones, 2011). Los parámetros que representan la disipación de energía se presentan en a siguientes ecuaciones (Sun, 2015). La energía de absorción E_A , es

representada por la energía cinética del impacto que es absorbida por la estructura, la cual se presenta por el trabajo realizado por la fuerza de aplastamiento F . δ_f y δ_i refiere al desplazamiento final e inicial respectivamente.

$$E_A = \int_{\delta_i}^{\delta_f} F ds \quad (1)$$

Se denomina absorción específica de energía (*SEA*) a la energía absorbida E_A por cierta masa unitaria $[m]$ de la estructura que es sometida al aplastamiento.

$$SEA = \frac{E_A}{m} \quad (2)$$

La eficiencia de la fuerza de aplastamiento (*CFE*, por sus siglas en inglés) es la relación entre la fuerza de aplastamiento promedio (P_m) y la fuerza máxima de aplastamiento (P_{max}), la *CFE* se determina por.

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (3)$$

La *CFE* es el parámetro que permite evaluar el rendimiento de absorción de energía en un elemento estructural. Idealmente un valor igual a 1 de *CFE* produce una curva fuerza-deformación constante, (Estrada et al., 2016). La fuerza promedio es definida por la relación de la energía absorbida (E_A) en función del desplazamiento (δ).

$$P_m = \frac{E_A}{\delta} \quad (4)$$

3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.

Para conocer las propiedades reales del material y con la finalidad de obtener información necesaria para el modelo discreto se realizaron pruebas a tensión, para ello se usaron probetas estandarizadas con base a la especificación ASTM E8. El desarrollo de la prueba de tensión se realizó utilizando la máquina universal Shimadzu AG-X plus 100kN empleando una velocidad de 2 mm/min , además del uso de un extensómetro Épsilon 3542-050M-050-ST (longitud calibrada de 50 mm), el montaje de la probeta y el extensómetro se muestra en la figura 1.



Fig. 1. Prueba de tensión de perfil 6063-T5.

Los resultados obtenidos de las pruebas de tensión permiten obtener los parámetros mecánicos, los cuales se presentan en la tabla 1, mientras que el comportamiento mecánico del aluminio 6063-T5 se representa en la curva de esfuerzo-deformación (ver figura 2).

Tabla 1. Parámetros mecánicos del aluminio 6063-T5.

Material	Módulo de Young (E) [GPa]	Módulo de cedencia (Sy) [MPa]	Coficiente de Poisson (ν)	Densidad (ρ) (kg/m^3)
Al 6063-T5	66.94	158.79	0.33	2700

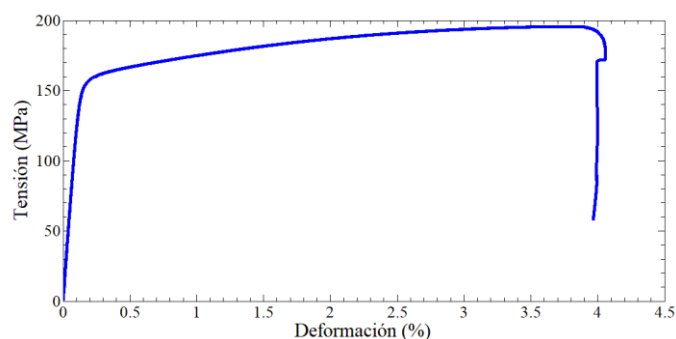


Fig. 2. Curva de esfuerzo-deformación de aluminio 6063-T5.

4. VALIDACION DE MODELO DISCRETO.

Los impactos laterales son representados por una prueba de flexión a tres puntos, de esta manera se realizó la prueba experimental la cual permitió obtener la validación del modelo discreto.

4.1 Prueba experimental

La prueba de flexión a tres puntos se realizó utilizando un perfil cuadrado de $38.3 \times 38.3 \text{ mm}$, con una longitud de 500 mm , con un claro de 300 mm y una masa de 0.290 kg con un espesor de 1.4 mm . Durante la prueba se utilizó la máquina universal modelo Shimadzu AG-X plus 100kN considerando una velocidad en el indentador 6 mm/min , con un desplazamiento de 50 mm , la prueba experimental se muestra en la Figura 3.



Fig. 3. Prueba de flexión de tres puntos.

4.2. Descripción del modelo discreto

El modelo discreto se realizó usando el software Abaqus/Explicit, las condiciones de la frontera se muestran en la figura 4. El modelo discreto considera el perfil como un material deformable utilizando elementos S4R, mientras que los soportes y el indentador se consideraron como componentes discretamente rígidos utilizando elementos R3D4. Se utilizó un coeficiente de fricción de $\mu = 0.3$ (Tang, Zhang, Yin, & Wang, 2016) entre las superficies del perfil y los soportes así como en el indentador (Surface to Surface) y un contacto general (General Contact) de $\mu = 0.15$, (Estrada et al., 2018) entre todos los elementos que integran el modelo, se consideró un tamaño de malla de 2.5 mm.

La validación del modelo discreto se realiza utilizando la carga pico (P_{max}) y la energía de absorción (E_a). Los resultados obtenidos se presentan en la figura 5. Mientras que los estados finales de deformación del perfil se presentan en la figura 6.

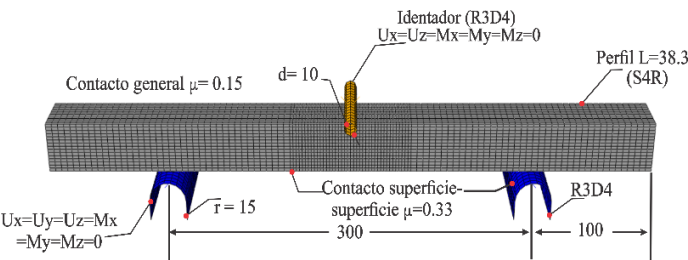


Fig. 4 Modelo discreto.

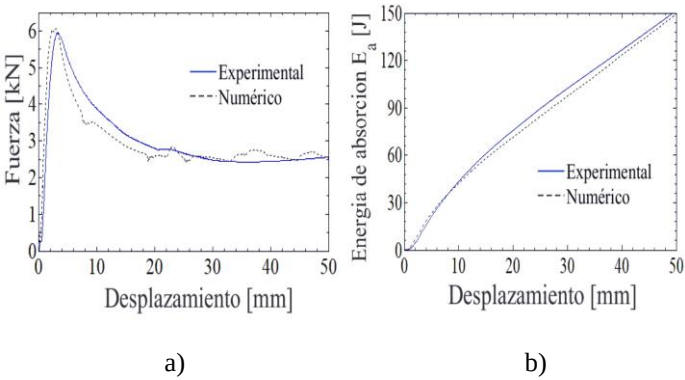


Fig. 5 Validación de modelo discreto donde, a) curva fuerza-desplazamiento, b) curva energía de absorción -desplazamiento.

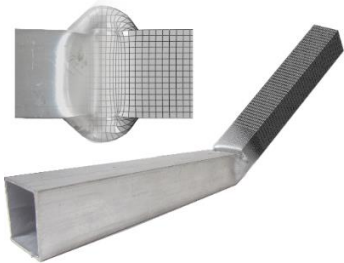


Fig. 6 Estado final de deformación del perfil.

La comparación de los resultados obtenidos de manera numérica como experimental presentan una diferencia menor al 5%, de esta se manera se valida el modelo discreto permitiendo continuar con el análisis paramétrico.

5. ANÁLISIS PARAMÉTRICO

5.1 Análisis de variación de sección transversal

Al obtener la validación del modelo discreto se realiza el estudio de la variación de la sección transversal, las secciones evaluadas son: triangular, hexagonal y circular, tomando como referencia la geometría cuadrada. Las dimensiones y características de las secciones se presentan en la tabla 2, considerando una masa igual en todas las secciones evaluadas.

Tabla 2. Variación de sección transversal.

S-T S-C-1 S-H S-C				
51.3 38.3 25.53 48.8				
Modelo	Sección	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Masa (kg)
S-T	Triangular	1.4	500	0.290
S-C-1	Cuadrado	1.4	500	0.290
S-H	Hexagonal	1.4	500	0.290
S-C	Circular	1.4	500	0.290

Al someter las secciones a condiciones de flexión de tres puntos, se obtuvieron las curvas de fuerza- desplazamiento, presentadas en la figura 7, los resultados obtenidos son similares a los presentados por Estrada et al. (2018).

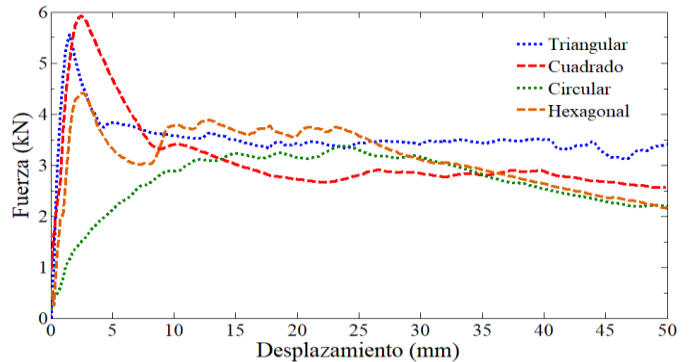


Fig. 7. Curva fuerza-desplazamiento de perfiles de diferente sección transversal.

En la figura 7, se observa el comportamiento de las secciones evaluadas, en el caso del perfil triangular (S-T), cuadrado (S-C-1), y hexagonal (S-H), presentan una recta al inicio de la prueba la cual se debe a la zona elástica del material, llegando hasta la carga máxima donde indica la transición de la zona elástica a la zona plástica, a partir de este punto inicia una fase en la cual el perfil presenta una resistencia a la carga de manera plástica, comportándose de manera decreciente conforme avanza el

desplazamiento. En el caso del perfil circular (S-C), presenta un comportamiento similar iniciando con una parte elástica, mientras que la línea de bisagra se presentara al ángulo de rotación, el cual es menor en función de los perfiles poligonales, de esta forma se presenta un cambio de sección lo cual permite moderar la carga máxima, después de este punto la carga inicia su disminución en función del desplazamiento.

Los estados finales de deformación se muestran en la figura 8, mientras que los parámetros de disipación de energía de los perfiles evaluados se presentan en la Tabla 3.

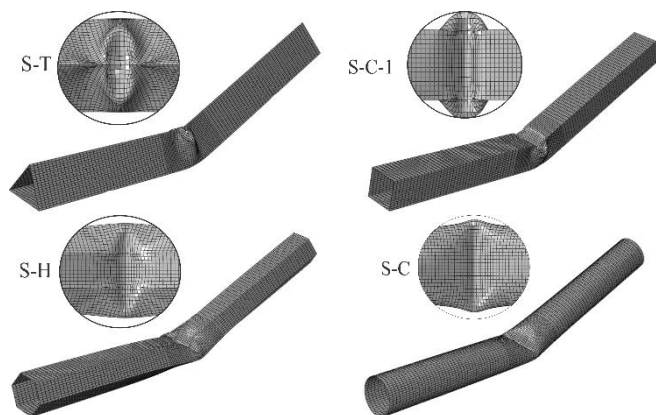


Fig. 8. Estados finales de deformación de perfiles de variación geométrica.

Tabla 3. Valores disipación de energía de análisis de sección transversal.

Sección	P_{max} [kN]	P_m [kN]	E_a [J]	SEA [J/kg]	CFE [-]
S-T	5.55	3.52	175.88	606.48	0.51
S-C-1	5.97	3.10	154.95	534.31	0.52
S-H	4.42	3.15	157.58	543.38	0.71
S-C	3.37	2.70	134.76	464.29	0.80

En los resultados se observa que el valor máximo de la carga pico (P_{max}) se presenta en la sección S-C-1 (5.97 kN), esto es debido a que el aumento de la carga máxima está influenciado por la sección transversal del perfil, en el caso de la sección cuadrada presenta mayor rigidez, la cual es manifestada como la resistencia generada por las protuberancias formadas en las esquinas. En el caso de los perfiles S-T, S-H, la carga máxima se redujo debido a la menor generación de protuberancia. De los resultados obtenidos se puede determinar que el perfil S-C muestra una mejor disipación de energía al obtener un mejor valor de CFE (0.80), lo cual equivale a un mejoramiento de un 35% con respecto al perfil cuadrado. Siendo el perfil circular el perfil con mejor disipación de energía.

5.2 Análisis de perfiles de sección compuesta.

Con base a los resultados mostrados en la sección 5.1 permite utilizar el perfil circular, como geometría base para el desarrollo de los perfiles de sección compuesta, los perfiles compuestos

analizados se muestran en la tabla 4, en las cuales se considera una misma masa en todas las secciones.

Tabla 4. Perfiles de sección compuesta.

Modelo	Díámetro (mm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Masa (kg)
S-CT	48.8	0.772	500	0.290
S-CC	48.8	0.738	500	0.290
S-CH	48.8	0.716	500	0.290

El comportamiento de los perfiles de sección compuesta se presenta en la curva fuerza-desplazamiento (Ver, figura 9). Los parámetros de disipación de energía se muestran en la tabla 5.

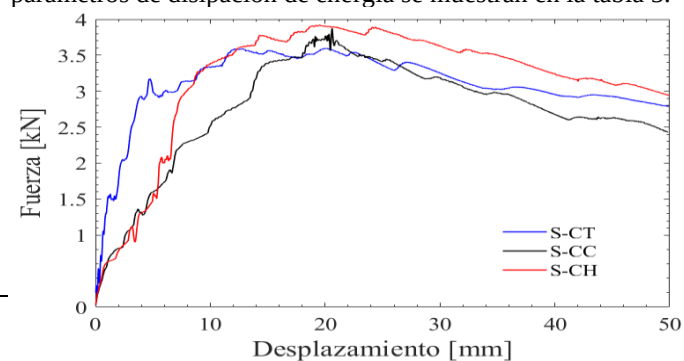


Fig. 9. Curva fuerza-desplazamiento de perfiles de sección compuesta

Tabla 5. Valores disipación de energía de perfiles de sección compuesta

Sección	P_{max} [kN]	P_m [kN]	E_a [J]	SEA [J/kg]	CFE [-]
S-CT	3.59	3.09	154.29	532.03	0.86
S-CC	3.87	2.73	136.43	470.45	0.70
S-CH	3.92	3.17	158.29	545.83	0.81

Con base en la figura 9, se observa el comportamiento de la carga pico (P_{max}), la cual se mantiene en todos los perfiles debido al uso de la sección circular, como sección base. En el caso del perfil S-CC presenta una reducción en la disipación de energía, la cual se debe por la reducción en el espesor del perfil, que se ve reflejado en baja capacidad de carga aun cuando se insertó refuerzo en la parte en el interior de la sección circular. En el caso de los perfiles S-CH y S-CT presentan una mejor disipación de energía lo cual representa una mayor resistencia a la formación de línea de bisagras, líneas estacionarias y de movimiento, lo anterior se debe a los refuerzos colocados, siendo el perfil S-CH el que presenta una mayor energía de absorción, sin embargo el perfil S-CT presenta una mejor disipación de

energía debido a un mejor valor de CFE (0.86). Con base a los criterios de resistencia al impacto un valor cercano a 1 representa un sistema óptimo.

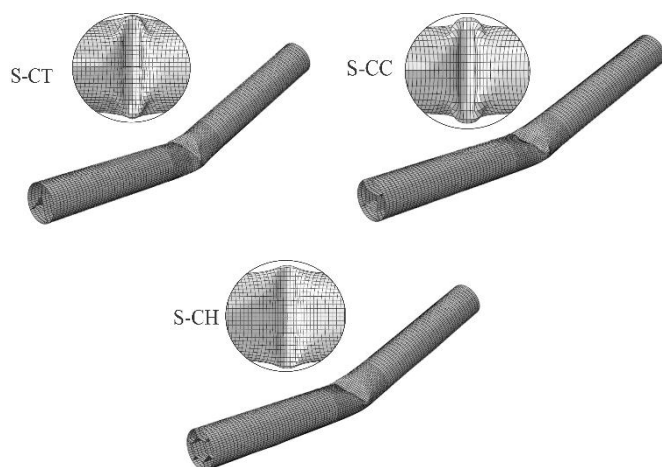


Fig. 8. Estados finales de deformación perfiles de sección compuesta

Los resultados obtenidos permiten realizar una comparación entre los perfiles analizados en este trabajo, observando los valores de CFE, se determinó que el perfil SC-T brinda una mejor disipación de energía en comparativa con los perfiles SC-C y SC-H con 0.18% y 0.13% respectivamente. Evaluando el comportamiento del perfil SC-T y el perfil inicial de análisis S-C-1, se observa una mejora de 7.5% y 35% en la disipación de energía respectivamente en comparación con el perfil base S-C.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se corroboró el uso de secciones de perfil compuesto como elementos que mejoran las capacidades de absorción de energía, asimismo se puede determinar que:

1. Se corroboró el modelo discreto desarrollado en el software Abaqus/Explicit; obtuvo una validación con una diferencia menor al 5% con respecto a los resultados experimentales.
2. Al realizar el análisis paramétrico de la variación de la sección transversal se determinó que el perfil S-C, considerando los valores de CFE mejora la disipación de energía de alrededor del 35% en comparación con el perfil S-C-1.
3. Los resultados obtenidos de CFE de la evaluación de los perfiles de sección compuesta indican que el perfil S-CT presenta una mejor disipación de energía, con un 7.5% con respecto al perfil S-C y un 42.5% con respecto al perfil S-C-1.

7. REFERENCIAS

- Abramowicz, W., & Jones, N. (1986). *Dynamic progressive buckling of circular and square tubes*. International Journal of Impact Engineering, 4(4), 243–270.
- Alexander, J. M. (1960). *An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading*. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 13(1), 10–15.
- Estrada, Q., Szwedowicz, D., Gutierrez-wing, E., Silva-Aceves, J., Rodriguez-Mendez, A., Elias-Espinosa, M., ... Bedolla-Henandez, J. (2018). *Energy absorption of single and multi-cell profiles under bending load considering damage evolution*.
- Estrada, Q., Szwedowicz, D., Baltazar, M., Cortes, C., Majewski, T., & Estrada, C. A. (2016). *The performance of energy absorption in structural profiles with different discontinuities*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84(5–8), 1081–1094.
- Estrada, Q., Szwedowicz, D., Silva-Aceves, J., Majewski, T., Vergara-Vazquez, J., & Rodriguez-Mendez, A. (2017). *Crashworthiness behavior of aluminum profiles with holes considering damage criteria and damage evolution*. International Journal of Mechanical Sciences, 131–132(May), 776–791.
- Fu, J., Liu, Q., Liufu, K., Deng, Y., Fang, J., & Li, Q. (2019). *Design of bionic-bamboo thin-walled structures for energy absorption*. Thin-Walled Structures, 135, 400–413.
- 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.
- Ghadianlou, A. (2012). *Low-speed crash optimization of vehicle side door beam under pole side impacts*, LS-DYNA Anwenderforum, Frankenthal.
- Husin, R. S. R., Lile, N. L. T., & Yaacob, S. (2012). *Optimization of Circular Side Door Beam for Crashworthiness Analysis*. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 2(3), 256.
- Jones, N. (2011). *Structural impact*. Cambridge university press.
- Lim, T. S., & Lee, D. G. (2002). *Mechanically fastened composite side-door impact beams for passenger cars designed for shear-out failure modes*. Composite Structures, 56(2), 211–221.
- Sun, G., Tian, X., Fang, J., Xu, F., Li, G., & Huang, X. (2015). *Dynamical bending analysis and optimization design for functionally graded thickness (FGT) tube*. International Journal of Impact Engineering, 78, 128–137.
- Szwedowicz, D., Estrada, Q., Cortes, C., Bedolla, J., Alvarez, G., & Castro, F. (2014). *Evaluation of energy absorption performance of steel square profiles with circular discontinuities*. Latin American Journal of Solids and Structures, 11(10), 1744–1760.
- 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.

Townsend, J., Kaczmar, M., & Mohamed, E.-S. (2002). *Modular door system for side impact safety of motor vehicles.* Proceedings of 17th international technical conference on the enhanced safety of vehicles., 1–6.

Wierzbicki, T., & Abramowicz, W. (1983). *On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures.* Journal of Applied Mechanics, 50(4a), 727.

Zhang, X., Zhang, H., & Wang, Z. (2016). Bending collapse of square tubes with variable thickness. International Journal of Mechanical Sciences, 106, 107–116.

Comportamiento térmico en una chimenea solar de un canal, bajo condiciones climáticas del estado de Tabasco, México.

Villar-Ramos M. M.*, Aguilar-Castro K. M.*, Macías-Melo E. V.*, Pérez-Olán I. Y.*, Ramírez- Hernández J. C.*

*Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura (DAIA-UJAT) Carretera Cunduacán – Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán, Tabasco, C.P. 86690, México (e-mail: mariamvillarramos@gmail.com).

Resumen: Debido al cambio climático, las temperaturas ambientales han incrementado provocando que la temperatura en el interior de las edificaciones incremente drásticamente, causando un discomfort entre sus ocupantes. Existen sistemas de ventilación pasivo como la chimenea solar, que utiliza los recursos naturales para mejorar la renovación de aire al interior de una edificación. En este trabajo se presenta el análisis experimental de una chimenea solar de un canal como sistema de ventilación pasivo, bajo condiciones climáticas del estado de Tabasco, México. Para esto se utilizó una chimenea solar construida e instrumentada con la capacidad de simular la energía absorbida por un material translúcido y por un material opaco, que mide 2 m de alto, 0.8 m de ancho. En donde se obtuvo un cambio de aire por hora máximo de 17.8 y una diferencia de temperatura de 8.1°C con una separación de canal de 0.175 m.

Palabras claves: Chimenea solar, Sistema de ventilación pasivo, Confort térmico.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Secretaría de Energía (SENER) el consumo de energía en México para uso residencial es del 70%, el cual en su mayoría se utiliza para ventilación como los sistemas de acondicionamiento de aire. El confort térmico se define como “La condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico”. Es por ello, que en los últimos años se han buscado técnicas de ventilación pasivas que contribuyan a disminuir las ganancias de calor en el interior de las edificaciones. Entre los sistemas de ventilación pasivos se encuentra la chimenea solar, dicho sistema utiliza la energía proveniente del sol para renovar el aire de un recinto, mejorando los efectos de la temperatura en el interior. Una chimenea solar generalmente está compuesta por dos placas, una de material translúcido que deja pasar parte de la energía radiante y una de material opaco que recibe parte de esa energía. Entre dichas placas se forma un canal, por donde circula aire y este al entrar en contacto con ellas, por efectos de flotación y de la gravedad remueve el aire hacia el exterior del sistema.

Existen diferentes configuraciones de chimeneas solares, entre las cuales se puede mencionar: de techo (Bansal et al., 1993; Mathur et al., 2006b; Ong y Chow, 2003), híbrida (unión de una chimenea solar acoplada a otro sistema pasivo) (Haghighi y Maerefat, 2015; Hussein y Ahmed, 2018) pared (Park y Battaglia, 2016). La mayoría de los estudios reportados de chimenea solar han sido de tipo de teórico como lo reportan Park y Battaglia et al., (2016), quienes determinaron la relación entre un modelo de menor y uno de mayor escala mediante un programa de dinámica de fluidos computacional (CFD). En este

estudio demostraron que el flujo y las condiciones térmicas en chimeneas de mayor dimensión se pueden predecir con un modelo a menor escala. Mientras que, Sudprasert et al., (2016) realizaron un estudio numérico del comportamiento de una chimenea solar vertical con aire húmedo (30 - 80% de humedad relativa). Los autores encontraron que el flujo de aire en una chimenea con aire húmedo es 15.4 – 26.2% menor que en una chimenea con aire seco, sin embargo, la temperatura del aire es mayor. Recientemente Zavala – Guillén et al., (Zavala-guillén et al., 2019) realizaron una evaluación térmica en una chimenea solar de doble canal, mediante un código numérico basado en el método de volumen finito. El análisis lo realizaron bajo condiciones climáticas de la Ciudad de Mérida, Yucatán, durante los días más cálidos y los días más fríos. Los autores concluyeron que el flujo másico promedio en días fríos es mayor que en días cálidos, además, obtuvieron un flujo másico promedio de 0.0832 kg s⁻¹, mientras que, acoplando el sistema a una habitación de 27 m³ se generó un cambio de aire por hora (ACH) desde 7.9 hasta 11.4, y un ACH mayor a 3.5 para 54 m³.

Mathur et. al., (2006a) realizaron un estudio experimental en una chimenea solar de menor escala (1 m x 1 m x 1 m), y desarrollaron un modelo variando el ancho de canal y la altura del absorbedor. Encontraron que, el flujo de aire incrementa linealmente con el incremento de la radiación e incrementa cuando el ancho del canal se incrementa, obtuvieron un ACH de 5.6 en una habitación de 27 m³ con una radiación solar de 700 W m⁻² sobre una pared vertical. Reddy et. al., (2012) experimentaron variando el ancho del canal (0.05 y 0.10 m) y el ángulo de la inclinación (30-90°), en una chimenea solar cúbica de 1 m x 0.40

m x 0.8 m. Los autores observaron que a un ángulo de 50° se obtiene una mayor temperatura y eficiencia, con un ACH de 142 y 76 para un ancho de canal de 0.10 m y 0.05 m, respectivamente. Jing et. al., (2015) estudiaron una chimenea solar vertical calentada eléctricamente, con un canal variable de 0.4 - 1.2 m y una altura de 2 m, variando un flux de 200 a 400 W m⁻². Los resultados mostraron que la tasa del flujo de aire incrementa cuando se incrementa el flux de calor. Por otro lado, para el diseño de una chimenea solar en la literatura se han reportados valores entre los 0.1-0.3 m, como es el caso de Hirunlabh et al. (1999), que determinaron que se produce un mayor flujo de aire con un ancho de canal de 0.145 m que uno de 0.1 m. Mientras que algunos autores sugieren un ancho de canal de 0.3 m (Ong y Chow, 2003; Shi et al., 2018). Los autores que han realizado estudios teóricos y experimentales mencionan que los principales factores que se deben considerar son: la configuración, el ancho del canal, condiciones de instalación, radiación solar y el ángulo de inclinación (Hosien y Selim, 2017; Lee et al., 2009; Shi et al., 2018).

En este trabajo de investigación se analizó el comportamiento térmico de una chimenea solar de un canal bajo condiciones de clima cálido húmedo, como sistema pasivo de ventilación para mejorar la renovación de aire en el interior de una edificación. Para ello, se desarrolló una chimenea solar de un canal, instrumentada para simular la energía absorbida por la irradiancia solar, variando la energía absorbida tanto en la placa absorbidora como en la placa translúcida, además, cuenta con la capacidad de variar el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal.

2. CHIMENEA SOLAR

Para realizar las pruebas experimentales se utilizó una chimenea solar que está compuesta principalmente por una placa absorbidora, una placa translúcida simulada, paredes aisladas y un sistema de giro de 0-90°, como se muestra en la Fig. 1. La chimenea solar mide 2 m x 0.8 m, tiene la capacidad de variar la separación entre las placas desde 0 hasta 0.3 m, en intervalos de 0.75, 0.125, 0.175, 0.225 y 0.28 m. La chimenea solar está instrumentada con resistencia de constantán, de tal forma que es posible simular la cantidad de energía por radiación solar absorbida por un vidrio o un material translúcido y por una placa de material opaco, dependiendo de la potencia suministrada mediante las fuentes de DC. La potencia suministrada a la placa absorbidora y a la placa translúcida simulada se calculó mediante la Ley de Ohm, en donde, la máxima potencia de la placa absorbidora de 750 W representaría una irradiancia solar cercana a 570 W m⁻² en una pared vertical con una pared con vidrio transparente de 3 mm. Lo anterior considerando una reflexión especular con una incidencia normal. Por otra parte, las paredes laterales (izquierda y derecha) y la pared posterior, están aisladas mediante placas de poliestireno extruido (Foamular®), dichas placas fueron instrumentadas con transductores de flujo de calor implementados con termopilas de termopar tipo T. Para medir la temperatura en la placa absorbidora, en la placa

translúcida simulada y la temperatura del aire en la entrada/salida canal, se utilizaron termorresistencias PT1000 calibradas de acuerdo con la norma ASTM E-220 (International, 2013). Para medir la velocidad del flujo de aire a la entrada del canal se utilizó un anemómetro de hilo caliente, con un rango de medición de 0-5 m s⁻¹. Para la adquisición de datos de las variables a medir, se utilizaron dos tarjetas multiplexoras conectadas a un sistema de adquisición de datos de la marca Keysight 34972A.

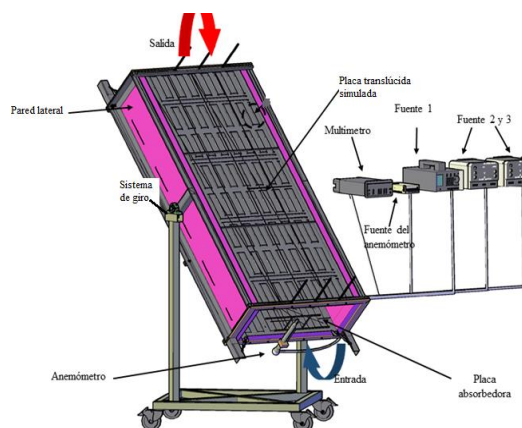


Fig. 1. Chimenea solar instrumentada.

En la Fig. 2 se puede observar la imagen de la chimenea solar en vista frontal con los instrumentos de medición.

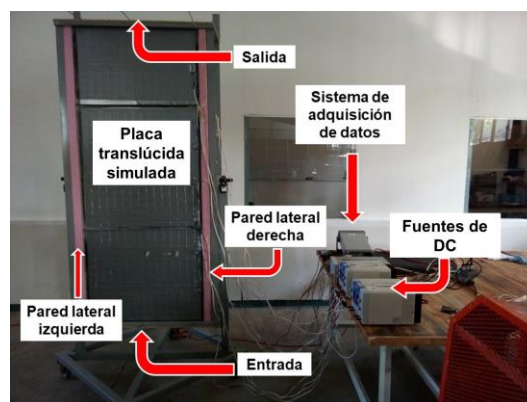


Fig. 2. Chimenea solar con vista frontal

3. PRUEBAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS

Los datos obtenidos del sistema de adquisición de datos se procesaron y analizaron mediante el software Matlab®. En este trabajo de investigación se presentan las pruebas experimentales realizadas en la chimenea solar con una separación de canal (d) de 0.175 m que se encuentra en el rango de valores sugeridos para mejorar el comportamiento del sistema (Hirunlabh et al., 1999; Shi et al., 2018), variando: el ángulo de inclinación con

respecto a la horizontal (θ) de 15 a 90° y la energía en la placa absorbidora (P_{Pabs}) desde 150 hasta 750 W; la energía en la placa translúcida simulada (P_{Pts}) fue de 40 W. Estos 40 W, representan la energía absorbida por un material translúcido con una transmitancia en un rango de 0.80 - 0.89 y una absorptancia 0.02 - 0.21. En la Tabla 1 se presentan las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo las pruebas experimentales, obteniendo un total de 12 pruebas.

Tabla 1. Condiciones de las pruebas experimentales.

No. Prueba	d (m)	θ (°)	P_{Pabs} (W)	P_{Pts} (W)
1-3	0.175	15	150,	40
4-6	0.175	30	450,	
7-9	0.175	60	750	
10-12	0.175	90		

La placa absorbidora se dividió en cuatro secciones, con la finalidad de analizar el comportamiento de la temperatura en cada una de ellas: placa absorbidora inferior (P_{ai}), placa absorbidora centro inferior (P_{aci}), placa absorbidora centro superior (P_{acs}) y placa absorbidora superior (P_{as}). En la Fig. 3 se presenta el comportamiento de la temperatura en las diferentes secciones de la placa absorbidora en estado transitorio para la Prueba 10, con la potencia máxima en la placa absorbidora de 750 W con un ángulo de inclinación de 15°. En la Fig. 3 se puede observar que la temperatura en las secciones P_{as} , P_{acs} y P_{aci} se mantienen en 82.2°C, mientras que la sección P_{ai} es mayor que las otras secciones con 85.3°C, esto se debe a los efectos de borde y la chimenea al estar inclinada a un ángulo de 15° dificulta el paso del aire al interior.

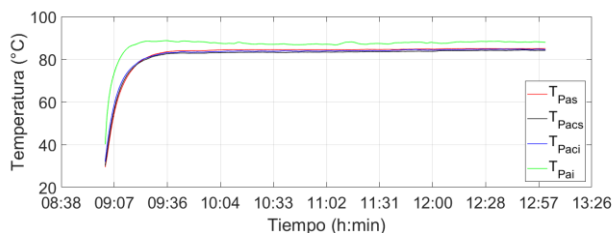


Fig. 3. Temperatura en la placa absorbidora por secciones, Prueba 10.

En la Fig. 4 se muestra el comportamiento de la temperatura en la placa absorbidora y en la placa translúcida simulada, se puede observar que una vez que alcanzaron el estado estable, las temperaturas en ambas placas se mantuvieron constantes con una diferencia de temperatura promedio de 40.3°C. Se puede observar que la placa absorbidora alcanzó una temperatura promedio de 83.3°C (T_{Pa}) y la placa translúcida simulada de 43.0°C (T_{Pts}).

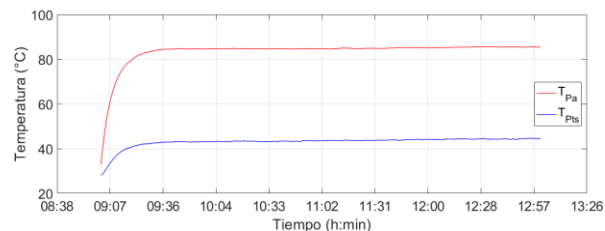


Fig. 4. Temperatura en la placa absorbidora y en la placa translúcida simulada, Prueba 10.

En la Fig. 5 se presenta el comportamiento de los flujos de calor a través de las paredes aislantes: pared lateral derecha (q_{pld}), pared lateral izquierda (q_{pli}) y pared posterior (q_{pp}). El flujo de calor se determinó a partir de la Ley de Fourier. Los flujos de calor promedio fueron 2.23 W para q_{pld} , 2.70 W q_{pli} , mientras que, para q_{pld} fue 55.83 W, estos flujos de calor representan la cantidad de energía que se transfiere por conducción a las paredes del sistema, representando una pérdida menor del 10% del total de la energía suministrada al sistema.

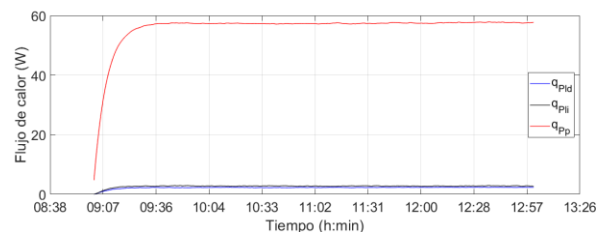


Fig. 5. Flujos de calor en paredes, Prueba 10.

Con respecto a la velocidad del aire de entrada (V_e) y la diferencia de temperatura de entrada-salida (ΔT_{s-e}) se puede observar en la Fig. 6, que el comportamiento de la velocidad del aire disminuye cuando la diferencia de temperatura se hace mayor. La máxima diferencia de temperatura que se obtuvo fue de 8.3°C y la máxima velocidad del aire de entrada fue de 0.55 m s⁻¹.

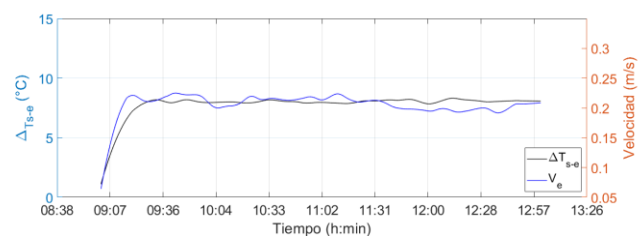


Fig. 6. Velocidad del aire del aire de entrada y diferencia de temperatura de salida-entrada, Prueba 10.

Cabe mencionar que el conjunto de pruebas mostró un comportamiento similar, sin embargo, la Prueba 10 fue la que presentó el mayor ΔT_{s-e} por lo cual, se tomó como caso tipo para describir el comportamiento de las variables de la chimenea. Posteriormente, de la Fig. 7 a la Fig. 11 se presentan de forma agrupada los resultados de las 12 pruebas experimentales.

3.1 Comportamiento de la temperatura

Con el fin de comparar el comportamiento de la temperatura en la placa absorbidora con respecto a la energía suministrada y el ángulo de inclinación, fueron graficadas. En la Fig. 7 y 8 se muestra el comportamiento de la temperatura en la placa absorbidora cuando se incrementa P_{Pabs} y cuando se varía θ , respectivamente. Se observa que la temperatura en la placa absorbidora oscila de 46.9°C a 87.9°C e incrementa cuando se incrementa la energía en la placa absorbidora, mientras que cuando se varía el ángulo de inclinación los cambios son pocos significativos entre los ángulos, ya que se tiene un incremento menor a 1°C (Fig. 7).

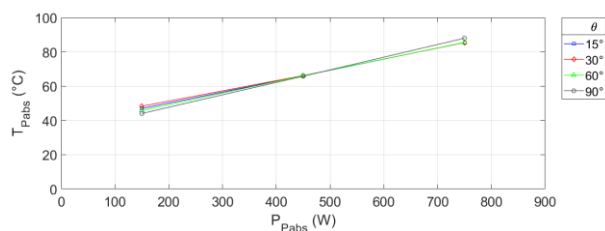


Fig. 7. Comportamiento de la temperatura en la placa absorbidora con respecto a P_{Pabs} .

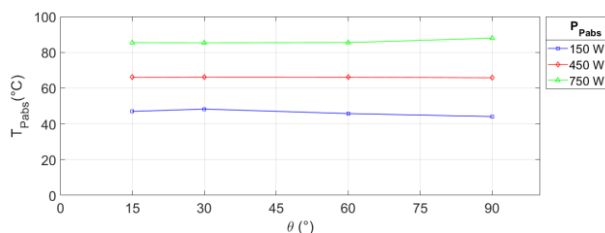


Fig. 8. Comportamiento de la temperatura en la placa absorbidora con respecto a θ .

Por otra parte, la Fig. 9 muestra las diferencias de temperatura del aire de entrada y de salida con respecto al suministro de energía en la placa absorbidora. La diferencia de temperatura promedio entre la entrada y salida se mantuvo en el rango de 1.7°C y 8.1°C, en donde se puede observar que las diferencias máximas se obtuvieron cuando la chimenea se encuentra a 15° y cuando se aumenta la P_{Pabs} . Este comportamiento sugiere que se obtiene un mayor calentamiento de aire cuando está inclinada que cuando está en posición vertical, permitiendo elegir la inclinación que se requiere para la aplicación deseada.

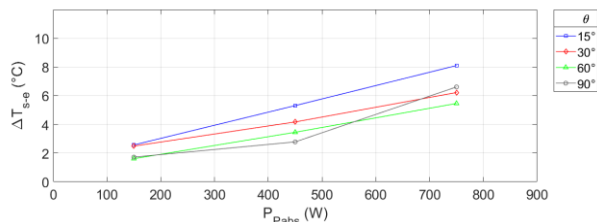


Fig. 9. Diferencia de temperatura del aire de entrada y salida con respecto a P_{Pabs} .

3.2 Eficiencia de la chimenea solar

La eficiencia térmica (η) es la relación que existe entre la energía obtenida y la energía aplicada del sistema. La eficiencia se calculó utilizando (1), en donde se consideró la ecuación de Ong y Chow (2003).

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T_s - T_e)}{PA_{\text{Pabs}}} \times 100 \quad (1)$$

En donde, $\dot{m}$ es el flujo másico del aire, C_p es el calor específico del aire, T_e es la temperatura del aire a la entrada del canal, T_s es la temperatura del aire a la salida del canal, P es la energía total suministrada al sistema y A_{Pabs} es el área de la placa absorbidora. En la Fig. 10 se muestra la eficiencia térmica con respecto a θ , en donde se puede observar que la eficiencia térmica se mantiene entre 51.2% y 56.2%. Esto debido a que P_{Pabs} es la variable que más influye sobre la eficiencia, ya que implicaría que, a mayor energía absorbida, mayor es la eficiencia en el sistema.

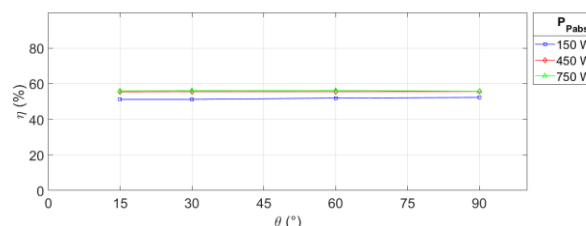


Fig. 10. Eficiencia térmica de la chimenea solar con respecto al ángulo de inclinación.

3.3 Cambios de aire por hora

Para estudiar o medir la renovación de aire al interior de un recinto es a través de los cambios de aire por hora (ACH). La Fig. 11 muestra los cambios de aire por hora con respecto a θ , acoplado el sistema a un recinto de 27 m³ en donde se obtuvo un ACH mínimo de 6.9 que podría ventilar desde una sala de espera de un hospital y un valor máximo 17.8 para un taller soldadura, de acuerdo con la tabla propuesta por Reddy et al., (Siva Reddy et al., 2012). De acuerdo con la norma ASHRAE 62.1 (2007), un valor de 6.9 ACH equivaldrían a 149 L s⁻¹ para una sala de espera, mientras que, 17.8 ACH a 381 L s⁻¹ para una sala de operación de un hospital en donde se requiere alta renovación de aire, como en un taller de soldadura donde se generan gases tóxicos. Los valores de ACH, obtenidos bajo las condiciones de prueba experimentales, en este estudio son cercanos a los reportados para una chimenea solar de un canal reportado por Mathur et al., (2006a). Además, se pudo observar que para el sistema propuesto de un solo canal en este estudio se obtuvieron ACH con valores cercanos a los reportados de forma teórica para una chimenea de doble canal acoplada a un recinto de 27 m³, que se reporta en el intervalo de 7.9 a 11.4 ACH (Zavala-guillén et al., 2019). Estos resultados muestran, que, para las configuraciones propuestas y la energía absorbida considerada, la chimenea de un canal es suficiente. Sin embargo,

debe realizarse un análisis más detallado para analizar los cambios del ACH para otras condiciones de prueba. La gráfica de la Fig. 11 muestra que al incrementar la energía en la placa absorbidora, se podría obtener una mayor renovación de aire.

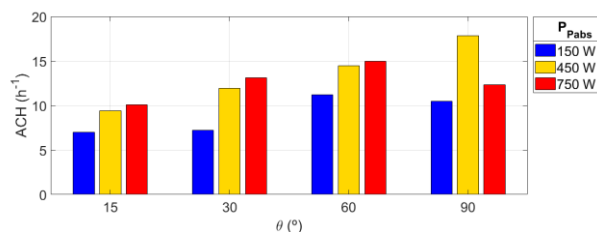


Fig. 11. Cambios de aire por hora con respecto al ángulo de inclinación.

6. CONCLUSIONES

Los resultados presentados en esta investigación sobre chimenea solar bajo las condiciones de prueba propuestas muestran que se puede obtener una diferencia de temperatura máxima de 8.1°C a un ángulo de 15° y un ACH máximo de 17.8 a un ángulo de 90°, cuando se suministra la máxima potencia. De acuerdo con el análisis de flujo de calor en las paredes con material aislante del sistema, se obtuvieron pérdidas menores al 10% por conducción hacia el exterior del sistema, con respecto a la potencia suministrada a la placa absorbidora y translúcida simulada. Los resultados sugieren que la chimenea solar muestra un comportamiento favorable si se requiere ventilar un recinto, permitiendo utilizar la mejor configuración para el lugar que se requiera, ya sea como una pared o como parte del techo. Se recomienda implementar una chimenea solar acoplada a un recinto, con el fin de evaluar su comportamiento para un volumen de fluido.

REFERENCIAS

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, I., 2007. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2004: "Ventilation for acceptable indoor air quality". Atlanta, GA.

Bansal, N.K., Mathur, R., Bhandari, M.S., 1993. Solar Chimney for Enhanced Stack. *Build. Environ.* 28, 373–377.

Haghighi, A.P., Maerefat, M., 2015. Design guideline for application of earth-to-air heat exchanger coupled with solar chimney as a natural heating system. *Int. J. Low-Carbon Technol.* 10, 294–304.

Hirunlabh, J., Kongduang, W., Namprakai, P., Khedari, J., 1999. Study of natural ventilation of houses by a metallic solar wall under tropical climate. *Renew. Energy* 18, 109–119.

Hosien, M.A., Selim, S.M., 2017. Effects of the geometrical and operational parameters and alternative outer cover materials on the performance of solar chimney used for natural ventilation. *Energy Build.* 138, 355–367.

Hussein, A.S., Ahmed, O.K., 2018. Assessment of the Performance for a Hybrid PV / Solar Chimney. *Int. J. Eng. Technol.* 7, 114–120.

International, A., 2013. ASTM E220-13, Standard Test Method for Calibration of Thermocouples By Comparison Techniques, ASTM Copyright.

Jing, H., Chen, Z., Li, A., 2015. Experimental study of the prediction of the ventilation flow rate through solar chimney with large gap-to-height ratios. *Build. Environ.* 89, 150–159.

Lee, S., Park, S.H., Yeo, M.S., Kim, K.W., 2009. An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof. *Build. Environ.* 44, 1431–1439.

Mathur, J., Bansal, N.K., Mathur, S., Jain, M., Anupma, 2006a. Experimental investigations on solar chimney for room ventilation. *Sol. Energy* 80, 927–935.

Mathur, J., Mathur, S., Anupma, 2006b. Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. *Energy Build.* 38, 1156–1163.

Ong, K.S., Chow, C.C., 2003. Performance of a solar chimney. *Sol. Energy* 74, 1–17.

Park, D., Battaglia, F., 2016. Small and Full-Scale Modeling for the Application of Wall Solar Chimneys, en: ASME 2016 Fluids Engineering Division Summer Meeting. pp. 1–10.

Shi, L., Zhang, G., Yang, W., Huang, D., Cheng, X., Setunge, S., 2018. Determining the influencing factors on the performance of solar chimney in buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 88, 223–238.

Siva Reddy, V., Premalatha, M., Ranjan, K.R., 2012. Experimental studies on solar chimney for enhanced ventilation. *Int. J. Sustain. Energy* 31, 35–42.

Sudprasert, S., Chinsorranant, C., Rattanadecho, P., 2016. Numerical study of vertical solar chimneys with moist air in a hot and humid climate. *Int. J. Heat Mass Transf.* 102, 645–656.

Zavala-guillén, I., Xamán, J., Hernández-pérez, I., Hernández-lopez, I., Jiménez-xamán, C., 2019. Ventilation potential of an absorber-partitioned air channel solar chimney for diurnal use under Mexican climate conditions. *Appl. Therm. Eng.* 149, 807–821.

Propuesta de metodología para el estudio de Sistemas de Edificación Térmicamente Activados

Villar-Ramos M. M.*, Aguilar-Castro K. M.*, Hernández-Pérez I. A.*, Macías-Melo E. V.*

*Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura (DAIA-UJAT)
Carretera Cunduacán – Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán, Tabasco, C.P. 86690, México (e-mail: mariamvillarramos@gmail.com).

Resumen: Los cambios drásticos en la temperatura del planeta es un tema que está siendo estudiado ampliamente, ya que estos cambios tan abruptos en el clima causan malestar entre los habitantes. Debido a esto, se ha incrementado el consumo de energía eléctrica en las edificaciones para el acondicionamiento del aire interior. Es por ello, que se busca el uso de tecnologías pasivas de ventilación. En este trabajo se plantea una propuesta para la evaluación térmica de sistemas de edificación térmicamente activados para reducir las cargas térmicas en el interior de un recinto. Para este fin se desarrollará una metodología, en la cual, se utilizarán intercambiadores de calor embebidos en muestras de techos y se desarrollará una celda de prueba instrumentada para cuantificar las temperaturas y flujos de calor que pasan a través de las muestras de estudio. Como resultados se espera analizar el comportamiento térmico de las muestras de estudio y evaluar su factibilidad para su implementación en edificaciones.

Palabras claves: Confort térmico, Ventilación pasiva, TABS, Techo.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el consumo de energía eléctrica ha aumentado por el uso en confort térmico, esto debido a los cambios significativos en muchos fenómenos meteorológicos y de climas extremos, de acuerdo con los expertos del Panel Intergubernamental del Cambio Climático IPCC (por sus siglas en inglés Intergubernamental Panel of Climate Change) “*En los últimos decenios, los cambios del clima han causado impacto en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos*” (2015). El consumo de energía para el confort térmico ha aumentado drásticamente, debido a los cambios climáticos no solo en nuestro país sino en el mundo.

Se ha reportado, que en una edificación las mayores ganancias de calor se presentan en el techo debido a la cantidad de irradiancia solar en zonas cálidas y debido a las bajas temperaturas en zonas frías. Por ello, surge la necesidad de buscar y estudiar técnicas de ventilación pasiva, que ayuden a disminuir el consumo de energía eléctrica en edificaciones, causados por el incremento de la temperatura en el exterior y la sobrepoblación (Tong y Li, 2014). Existen algunas alternativas que pueden contribuir a la reducción del consumo de energía eléctrica, como se puede observar en las Fig. 1 a la 4: arquitectura bioclimática (Minke, 2004), muro trombe (Rabani et al., 2017), pared radiante (Romaní et al., 2018a), recubrimientos reflectivos en techos (Hernández-pérez et al., 2018), techos con tubos embebidos (Yu et al., 2019), entre otras.



Fig. 1. Arquitectura bioclimática (Minke, 2004).

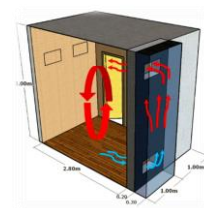


Fig. 2. Muro Trombe (Rabani et al., 2017).

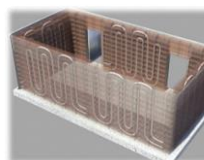


Fig. 3. Pared radiante (Romaní et al., 2018a).



Fig. 4. Cubierta reflectiva (Hernández-pérez et al., 2018).

Por lo anterior, en este trabajo se plantea una propuesta de una metodología para evaluar un sistema de edificación térmicamente activado (TABS), mediante un estudio experimental de un techo intercambiadores de calor embebidos en una celda calorimétrica de prueba, con la finalidad de reducir las cargas térmicas en el interior de una edificación.

2. ESTUDIOS EN TECHOS

La componente del techo de una edificación es donde recibe la mayor proporción de energía emitida por el sol, y que es absorbida como energía térmica por el techo debido a su geometría. Es por ello, que surge el interés de analizar esta componente mediante la búsqueda de alternativas que permitan reducir las ganancias de calor hacia el interior de la edificación.

Los techos con tubos embebidos son considerados Sistemas de Edificación Térmicamente Activos (TABS) y consisten en tubos o ductos incrustados en una estructura, tales como pisos, techos, falsos techos y paredes. Estos tubos o ductos intercambian calor directamente con la masa térmica del edificio, siendo esta una opción para mejorar la temperatura en el espacio interior de las edificaciones (Romaní et al., 2018b).

Se han reportado estudios teóricos y experimentales en techos con fines de ahorro de energía para el logro del confort térmico. Los estudios que se han reportado para techos se han direccionado principalmente a analizar diferentes recubrimientos (Hernández-Pérez et al., 2014b), sistemas de techos ventilados (Ibrahim et al., 2015), sistemas de techos ventilados con sistemas pasivos (Juanicó, 2008) y techos con tubos embebidos (Yu et al., 2019). Respecto al estudio de techos se han reportado estudios en recubrimientos reflectivos como el de Hernández-Pérez et. al. (2014a) donde se estudiaron dos configuraciones de techo. Los autores encontraron que para ciudades con altas temperaturas el techo compuesto con cubierta reflectiva disminuye de manera significativa las ganancias de calor al interior. También, se han reportado estudios en techos ventilados utilizando colectores solares de aire y agua (Hu et al., 2018; Juanicó, 2008), que además de ayudar a remover el calor del techo, reutilizan el fluido para otras aplicaciones.

2.1 Techos con recubrimiento reflectivo

La mayoría de los estudios de techos con recubrimiento son teóricos, en donde se analizan la componente en dos dimensiones, en el caso de los techos con recubrimiento se han encontrado algunos trabajos experimentales como el de Hernández-Pérez et. al., (2018) que comparó el análisis teórico y experimental encontrando que los techos con recubrimientos reflectivos tienen un mayor efecto en los climas cálidos, así como, que los techos compuestos tienen menores ganancias de calor que los techos convencionales. Yew et. al., (2013), realizaron un estudio experimental con un recubrimiento de aislante térmico (TIC), en conjunto con una cavidad con movimientos de aire (MAC), en donde reciclaron aluminio que utilizaron como tubos para la circulación de aire y así disminuir

las ganancias de calor en el interior de cuatro cajas de pruebas, concluyendo que al aplicar estas dos técnicas se logra una disminución de 13°C comparada con un techo convencional.

2.2 Tubos de calor embebidos

En los últimos años se han reportado estudios teóricos de la factibilidad del uso de sistemas embebidos que contribuyen a la ganancia de calor al interior de un recinto. Román (2017) realizó un estudio numérico en un techo compuesto de concreto con tubos de calor (con aire y agua) y con tres recubrimientos diferentes (blanco, gris y negro), encontrando que un techo compuesto con tubos de calor beneficia el comportamiento térmico de la componente y al utilizar un recubrimiento se puede aumentar el flujo de calor. Leo Samuel et al., (2018) realizaron un estudio experimental de un recinto a escala con un sistema de construcción térmicamente activado, mediante tubos de agua embebidos en el concreto utilizados en el techo, piso y paredes, en el concluyen que este sistema acoplado a un sistema pasivo de ventilación puede incrementar su factibilidad en climas con condiciones desfavorables y que puede ser operado con un fluido a temperaturas relativamente altas. Aunque el sistema presenta resultados de remoción de calor, la distribución de los tubos embebidos no es presentada, ni el análisis de las caídas de presión para conocer la energía utilizada para el suministro y recirculación del agua. Lo anterior, con el fin de analizar la eficiencia de la remoción de calor y los consumos de energía eléctrica con respecto al ahorro obtenido. Por su parte, Romaní et al., (2018b) realizó un estudio experimental en paredes con tubos embebidos acoplado a un intercambiador de calor tierra-aire. En donde, las paredes radiantes mostraron capacidad energía, incluso en condiciones de clima cálido y con ganancias internas altas. Por otro lado, Al-Kayiem et al., (2018) realizaron un estudio numérico y experimental de un colector solar acoplado a una chimenea solar de techo, en donde encontraron que es interesante el comportamiento del sistema debido al efecto que se genera por las fuerzas de flotación y la entrada transversal del aire al colector solar, removiendo el calor del techo por el efecto chimenea.

En la Fig. 5 se presenta de forma esquemática y resumida los principales trabajos que se han reportado incluyendo sus principales hallazgos. A partir de la revisión de la literatura se pudo encontrar que la mayoría de los estudios son teóricos. Los estudios de TABS se han implementado en su mayoría en paredes, bajo condiciones de clima tropical y algunos otros en climas mediterráneos, debido a sus sistemas de construcción y el modo de vida. Los autores han mostrado teóricamente que, los techos con tubos incrustados o embebidos en concreto pueden ayudar a reducir significativamente las cargas térmicas atribuidas principalmente a la irradiancia solar. Desde el punto experimental se han propuesto dispositivos de prueba, sin embargo, la mayoría son en paredes. Lo anterior, muestra una oportunidad de contribuir al desarrollo de esta área y que complementa los estudios en edificaciones con la aplicación de técnicas pasivas de ventilación.

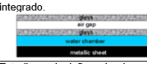
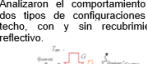
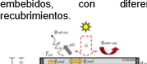
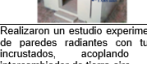
Autor (es)	Tipo de Estudio	Componente	Clima	Descripción	Hallazgo
Juanico, (2008) 	X	Techo	-	Propuso un nuevo diseño de techo con un colector solar de agua integrado. 	1) Este diseño no requiere de aislamiento térmico. 2) Es un diseño de bajo costo que puede ser usado para calentamiento y enfriamiento.
Lee et al., (2009) 	X	Techo	-	Estudiaron la influencia de varios factores que influyen en el flujo de aire en una cavidad ventilada de techo, bajo condiciones controladas en un laboratorio. 	1) Al emplear una cavidad que ventile el techo mejora la temperatura del recinto, disminuyendo las cargas de enfriamiento. 2) El ángulo de inclinación influye en el comportamiento del fluido, así como en el área de incidencia de energía sobre la superficie.
Yew et al., (2013) 	X	Techo	-	Realizaron pruebas experimentales con prototipos, utilizando recubrimiento aislante en el techo y tubos de calor de aluminio para mejorar el confort térmico. 	1) La combinación de recubrimiento de aislamiento térmico y cavidad ventilada de aire muestran una significativa mejora en la reducción de temperatura, de hasta 13°C.
Hernández-pérez et al., (2014) 	X	Techo	Frio seco, árido, subtropical y sabana tropical	Analizaron el comportamiento de dos tipos de configuraciones de techo, con y sin recubrimiento reflectivo. 	1) La configuración de techo con recubrimiento blanco reduce la temperatura al interior. 2) Utilizar recubrimientos en el techo ayuda a reducir las ganancias en verano. 3) Un techo compuesto con recubrimiento reflectivo es la mejor configuración para ciudades con clima cálido, debido a que reduce significativamente las ganancias de calor.
Román, (2017) 	X	Techo	Cálido	Estudio numérico de un techo de concreto con tubos de calor embebidos, con diferentes recubrimientos. 	1) Utilizar un techo compuesto con tubo de calor incrustado reduce el flujo de calor hacia el interior, tanto para clima cálido como para clima frío. 2) El aire tiene un mejor comportamiento en el sistema, al disminuir las ganancias de calor al interior en comparación con el agua. 3) Al cambiar de recubrimiento blanco a negro aumenta el q_{in} hasta un 50%.
Leo Samuel et al., (2016) 	X	Techo, pared y piso	Tropical	Estudiaron de manera experimental el comportamiento de una construcción térmicamente activada con una torre de enfriamiento. 	1) El sistema acoplado a un sistema pasivo de enfriamiento puede operar con agua con altas temperaturas. 2) Si se utiliza TABS para el enfriamiento de todas las componentes de una edificación, puede reducir hasta 4°C.
Romani et al., (2018) 	X	Pared	Mediterráneo	Realizaron un estudio experimental de paredes radiantes con tubos incrustados, acoplando un intercambiador de tierra-aire. 	1) El muro radiante mostró la capacidad de almacenar energía, incluso bajo condiciones de climas cálidos, contribuyendo con la iniciativa de edificios con cero energías. 2) El intercambiador de calor tierra-aire, limita la capacidad de enfriamiento de las cajas de prueba.
Yu et al., (2019) 	X	Pared	Subtropical-Húmedo	Propusieron un nuevo modelo dinámico de un colector solar en una construcción, comparando por separado el comportamiento del colector, el muro y un muro aislado. 	1) La temperatura del agua tuvo una gran influencia sobre las ganancias de calor en las paredes. 2) La integración del colector solar disminuyó las pérdidas de calor en invierno, y las ganancias del calor durante el verano.

Fig. 5. Resumen de los trabajos reportados en la literatura.

3. PROPUESTA SOLUCIÓN

Entre las ventajas de los TABS se encuentra que pueden ser utilizados para bajas temperaturas de calentamiento y altas temperaturas de enfriamiento, la integración del sistema a la estructura de la construcción permite incluir el uso de fuentes de energías renovables y ayuda a disminuir la contaminación por los gases de efecto invernadero. Entre las desventajas de utilizar los TABS se encuentra los costos de inversión para construcción, que no es compatible con falsos techos debido a la capacidad de intercambio de calor con el sistema. La implementación de este tipo de techos contribuiría a mejorar el confort térmico en el interior de las edificaciones, disminuyendo el consumo de energía eléctrica por sistemas de enfriamiento, así como contribuir con las medidas que se requieren para minimizar los efectos del cambio climático.

Aunque se han reportado estudios teóricos en techos con fines de ahorro de energía para el confort térmico, es importante comentar que en los trabajos que se han reportado sobre estudios

de techo ventilados, no se han realizado estudios que integren el comportamiento de todo el sistema, la mayoría de los estudios analizan por separado cada uno de sus componentes. Es por ello, que en la Fig. 6 se plantea de forma general una propuesta para evaluar un TABS mediante el desarrollo de un prototipo experimental y el análisis teórico de una vivienda tipo con el fin de reducir las cargas térmicas en edificaciones.

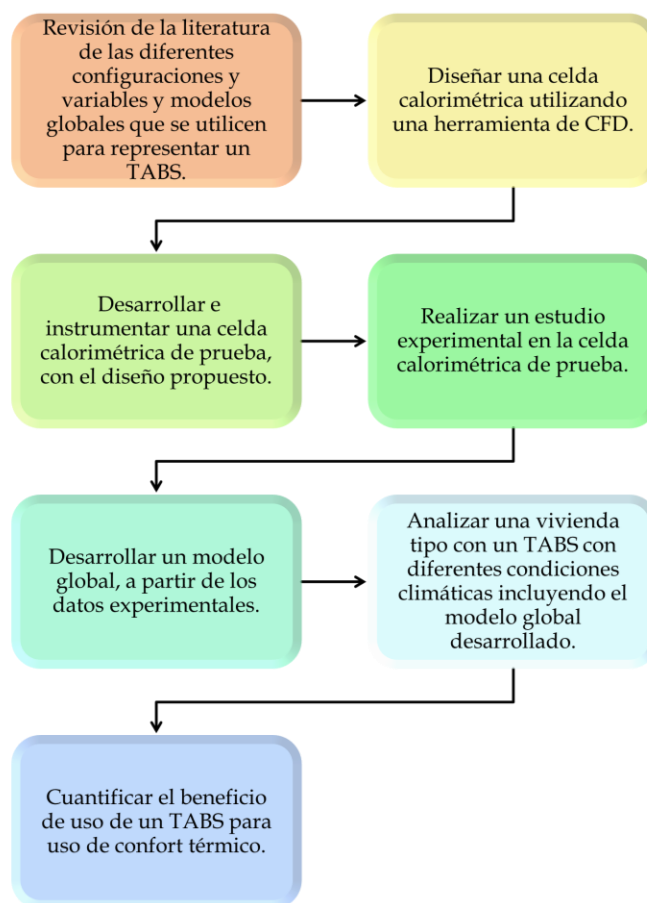


Fig. 6. Metodología para el estudio de un TABS.

Como se puede observar en el diagrama de la Fig. 6, se plantea realizar una revisión bibliográfica de los estudios con las diferentes configuraciones, variables y modelos globales de un TABS. Posteriormente, la propuesta plantea el diseñar, manufacturar e instrumentar un prototipo de celda calorimétrica, en donde se realice el estudio experimental del TABS con las diferentes variables. Lo anterior, con la finalidad de desarrollar un modelo global con los datos experimentales, que permita analizar una vivienda tipo bajo diferentes condiciones climáticas y así poder evaluar el costo-beneficio del uso de un TABS como sistema de ventilación pasivo para disminuir las cargas térmicas, y así contribuir a disminuir el consumo de energías no renovables.

En la Fig. 7 se presenta un esquema de la celda de prueba propuesta para el estudio del TABS, de dimensiones de $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ($H \times W \times L$) y espesor de la losa de 0.15 m con tubos de calor embebidos. En el esquema se presenta el modelo físico de intercambio de calor considerando la irradiancia solar (G), la temperatura interior (T_{in}), temperatura exterior (T_{ext}), el flujo de calor por convección al interior y exterior ($q_{conv-out}$ y $q_{conv-in}$), flujo de calor por radiación al interior y exterior ($q_{rad-out}$ y q_{rad-in}), así como, el área (A_r) y las propiedades ópticas del material del techo (α y ρ).

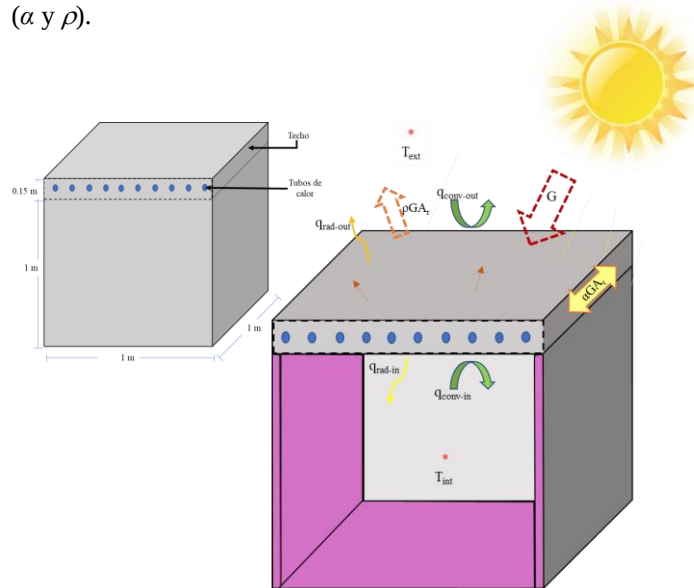


Fig. 7. Diseño de celda de prueba propuesta.

4. CONCLUSIÓN

Este tipo de sistemas podrían implementarse en edificaciones en diversos climas, como en el clima del estado de Tabasco, contribuyendo al desarrollo de los estudios experimentales en edificaciones con la aplicación de técnicas pasivas de ventilación. La implementación de este tipo de techos contribuiría a:

- ✓ Mejorar el confort térmico en el interior de las edificaciones.
- ✓ Reducir las cargas térmicas en el interior de la edificación.
- ✓ Disminuir el consumo de energía eléctrica por el uso de sistemas de enfriamiento.
- ✓ Contribuir con las medidas que se requieren para minimizar los efectos del cambio climático.

REFERENCIAS

Al-Kayiem, H.H., Sreejaya, K. V, Chikere, A.O., 2018. Experimental and numerical analysis of the influence of inlet configuration on the performance of a roof top solar chimney. *Energy Build.* 159, 89–98.

Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Gilbert, H., Xamán, J., Chávez, Y., Shah, B., 2014a. Thermal Performance of a Concrete Cool Roof under Different Climatic Conditions of Mexico. *Energy Procedia* 57, 1753–1762.

Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Xamán, J., Zavala-Guillén, I., Arce, J., Simá, E., 2014b. Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components - A review. *Energy Build.* 80, 81–105.

Hernández-pérez, I., Xamán, J., Macías-melo, E. V, Aguilar-castro, K.M., 2018. Experimental thermal evaluation of building roofs with conventional and reflective coatings. *Energy Build.* 158, 569–579.

Hu, Z., Luo, B., He, W., Hu, D., Ji, J., Ma, J., 2018. Performance study of a dual-function roof solar collector for Chinese traditional buildings application. *Appl. Therm. Eng.* 128, 179–188.

Ibrahim, S.H., Azhari, N.A., Nawi, M.N.M., Baharun, A., Affandi, R., 2015. Study on the Effect of the Roof Opening on the Temperature. *Int. J. Appl. Eng. Res.* 9, 20099–20110.

IPCC, 2014. *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* IPCC, Ginebra, Suiza.

Juanicó, L., 2008. A new design of roof-integrated water solar collector for domestic heating and cooling. *Sol. Energy* 82, 481–492.

Leo Samuel, D.G., Nagendra, S.M.S., Maiya, M.P., 2018. Parametric analysis on the thermal comfort of a cooling tower based thermally activated building system in tropical climate – An experimental study. *Appl. Therm. Eng.* 138, 325–335.

Minke, G., 2004. Techos verdes: Planificación, ejecución, consejos prácticos.

Rabani, Mehran, Kalantar, V., Rabani, Mehrdad, 2017. Heat transfer analysis of a Trombe wall with a projecting channel design. *Energy* 134, 943–950.

Román, K.Y., 2017. Evaluación Térmica de Techos Compuestos de Concreto con Tubos de Calor. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

Romaní, J., Cabeza, L.F., de Gracia, A., 2018a. Development and experimental validation of a transient 2D numeric model for radiant walls. *Renew. Energy* 115, 859–870.

Romaní, J., Cabeza, L.F., Pérez, G., Pisello, A.L., de Gracia, A., 2018b. Experimental testing of cooling internal loads with a radiant wall. *Renew. Energy* 116, 1–8.

Tong, S., Li, H., 2014. An efficient model development and experimental study for the heat transfer in naturally

ventilated inclined roofs. *Build. Environ.* 81, 296–308.

Yew, M.C., Ramli Sulong, N.H., Chong, W.T., Poh, S.C., Ang, B.C., Tan, K.H., 2013. Integration of thermal insulation coating and moving-air-cavity in a cool roof system for attic temperature reduction. *Energy Convers. Manag.* 75, 241–248.

Yu, G., Du, C., Chen, H., Xiong, L., 2019. A dynamic model based on response factor method and seasonal performance analysis for integration of flat plate solar collector with building envelope. *Appl. Therm. Eng.* 150, 316–328.

Kinematic and Dynamic Modelling of an Exoskeleton for Upper Limb Rehabilitation

L. Vázquez-Sánchez*, A. Blanco-Ortega**, M. Adam-Medina***, A. Abúndez-Pliego****, J. Colín-Ocampo*****

Tecnológico Nacional de México-CENIDET, Morelos, C.P. 62490

México (Tel. 01(777) 362-7770)

**leviathan11910e@cenidet.edu.mx*

, ***andres.blanco@cenidet.edu.mx*,

****adam@cenidet.edu.mx*,

*****arturo.abundez@cenidet.edu.mx*,

******colin@cenidet.edu.mx*,

Resumen: Este trabajo presenta un exoesqueleto para la rehabilitación de extremidades superiores, se incluye: 1) un modelo cinemático de un exoesqueleto de 3 grados de libertad; los movimientos modelados representan la flexión-extensión del codo, abducción-aducción del hombro y flexión-extensión del hombro. 2) Se evalúan los modelos resultantes por medio de Solidworks y Adams View. Los resultados de las simulaciones nos muestran las trayectorias naturales que se generan al realizar los movimientos de abducción-aducción, flexión-extensión de la articulación gleno-humeral y la flexión-extensión del codo. 3) También se muestran resultados de los pares requeridos para lograr un movimiento combinado. Estos resultados van a permitir realizar el diseño de un exoesqueleto de 3 grados de libertad.

Palabras clave: Exoesqueleto, modelo cinemático, modelo dinámico, extremidad superior, simulación

1. INTRODUCCIÓN

Parte de la biomecánica es el modelo cinemático que describe los movimientos, sitúa espacialmente los cuerpos mediante coordenadas y ángulos. Y la dinámica que también es parte de la biomecánica que describe las fuerzas que generan el movimiento (Soriano and Belloch, 2015).

Para el caso de estudio, es de vital importancia conocer la cinemática y la cinética del brazo humano durante actividades comunes para determinar las especificaciones técnicas para el diseño del exoesqueleto (Garrido, Yu and Soria, 2014). Debe tomarse en cuenta la cinemática directa, el modelo dinámico, saber los movimientos pasivos y activos, análisis de materiales, actuadores a usar, portabilidad del exoesqueleto, etc.

El brazo humano posee una estructura mecánica extremadamente complicada. Está compuesto por un sistema esquelético con varios huesos, tendones y músculos. Forman diferentes combinaciones de cadenas cinemáticas en serie y paralelas y cada unión en el sistema puede poseer más de un grado de libertad. Los movimientos de las juntas están interrelacionados mecánicamente a través de la operación de muchos actuadores que accionan la misma articulación y los actuadores que impulsan más juntas simultáneamente (Klopčar and Lenarčič, 2005).

La extremidad superior se considera un mecanismo robot en serie, esto porque tiene articulaciones una después de otra, no por los tipos de movimientos, estos pueden ser aleatorios casi en su totalidad (Noveanu *et al.*, 2013). Las articulaciones anatómicas (ver Figura 1a) se pueden modelar mediante el uso de símbolos como revoluta, articulación universal y

articulaciones esféricas (ver Figura 1b), las cuales se pueden modelar como una articulación esférica para la articulación glenohumeral, una articulación de giro para la húmero-cubital, una articulación cilíndrica para la radio-cubital, y una junta universal para el carpo.

Para conocer cómo aplicar fuerza/carga sobre el brazo, el exoR debe diseñarse a partir de consideraciones biomecánicas y fisiológicas del miembro superior (Olaya, 2008):

La representación clásica del movimiento de la extremidad superior es muy adecuada para describir movimientos individuales que se realizan en planos, pero presenta algunas incoherencias cuando se intentan describir movimientos tridimensionales relativamente complejos (Rodríguez, Quintero and Aschner, 2005).

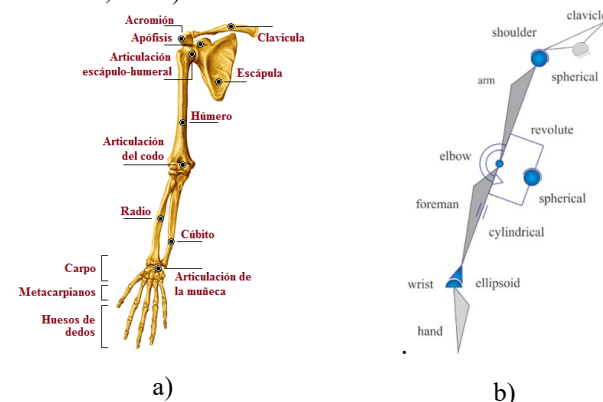


Figura 1. Articulaciones, y huesos de la extremidad superior (Noveanu *et al.*, 2013) y su modelo.

II. MODELADO CINEMÁTICO DEL EXOESQUELETO

El modelado del movimiento de la muñeca y el codo es relativamente simple, ya que ambos se pueden representar como articulaciones de dos grados de libertad. Sin embargo, el complejo de la articulación del hombro es una articulación que desafía la descripción cinemática simple. Consiste en dos articulaciones separadas, con componentes escapulo-torácicos y gleno-humerales. La determinación precisa de la posición escapular es difícil. La falta de una forma simple y no invasiva de localizar la escápula sugiere que la medición de la posición del brazo con respecto al tronco es un objetivo más práctico que la medición individual precisa del movimiento gleno-humeral y escapulo-torácico en la mayoría de los entornos experimentales [16](Knudson, 2007).

En el espacio operacional Figura 2, la mano se caracteriza por tener una posición y un ángulo α que describe la orientación, por lo que se tienen dos variables que describen las coordenadas x y y de la mano. Para este caso, $\alpha = 0$.

$$\mathcal{X} = (x, y, \alpha) \quad (1)$$

Como las dimensiones del espacio articular y operacional es de 2, esto indica que el sistema del brazo para estos gdl es un sistema no redundante.

Para el problema de la cinemática directa, que se basa en el desarrollo que se ha presentado en los artículos (Klopčar and Lenarčič, 2005) (Jung and Bae, 2015) considerando los gdl mostrados en la Figura 2. Identificar los ejes de giro o rotación los cuales son dos Z_0 y Z_1 , que son perpendiculares a la dirección del húmero, ulna-radio y falanges de la mano en la posición neutral. El sistema de referencias se debe definir de tal forma para minimizar los parámetros Denavit-Hartenberg (D-H), se coloca el origen O_0 en la articulación gleno-humeral, en el eje Y_0 y con esto se consigue que uno de los parámetros de D-H sea nulo.

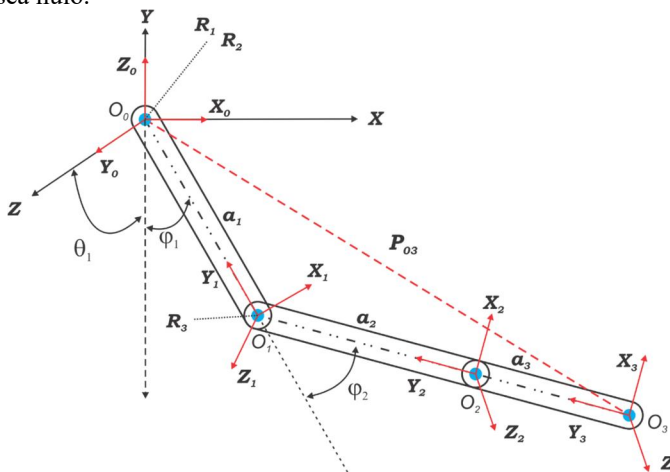


Figura 2. Identificación de espacio articular y espacio operacional.

La cinemática propuesta de 3 gdl del exoR es analizada en dos partes, en uno de 2 gdl y otro de 1 gdl, una vez se tiene

determinado su sistema de referencia y las matrices de transformación (T_{01}, T_{123}). Se incluye el término de subíndice 3, ya que se está incluyendo la longitud de la mano, aunque no se cuente la articulación del carpo, no se puede eliminar la distancia de la mano para el análisis cinemático.

Cuando se obtiene la matriz de D-H, se procede a identificar las matrices de transformación. Las matrices de transformación tienen definiciones como $C_1 = \cos(\varphi_1)$, $S_1 = \sin(\varphi_1)$ y ${}^0R_1(\varphi_1)$ = matriz de cambio de orientación del sistema de referencia 1 con respecto a 0 que depende de φ_1 y, ${}^0\vec{r}_{0001}$ = vector de posición entre el origen O_0 y O_1 expresado en la base vectorial, y se expresa como la ecuación (2). Las longitudes de los eslabones son a_1 , a_2 y a_3 , ver Figura 2.

$${}^0H_1(\varphi_1) = \begin{bmatrix} -C_1 & -S_1 & 0 & a_1C_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & a_1S_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} {}^0R_1(\varphi_1) & {}^0\vec{r}_{0001} \\ 000 & 1 \end{bmatrix}$$

Una vez que se analizó el sistema de la extremidad en el eje rotacional X_0 , se extrapolan los resultados, para determinar el modelo cinemático que se requiere de 3 gdl, se habilita el cálculo para la posición deseada del punto P_{03} , que se encuentra en el extremo de los dedos, específicamente en la falange distal del dedo medio.

Asociando los grados de libertad que fueron descritos con anterioridad con los movimientos anatómicos del brazo se tiene: R_1 que representa la flexión-extensión del húmero, R_2 la abducción- aducción del húmero, R_3 es la flexión-extensión del codo.

Las matrices de transformación de D-H son ${}^0H_1, {}^0H_1Y, {}^1H_2$ y las coordenadas generalizadas de la articulación son $\varphi_1, \theta_1, \varphi_2$, respectivamente; en el caso de θ_2 es cero ya que, solo existe un movimiento en la articulación del codo, por lo que se define de la siguiente forma:

$${}^{i-1}H_i(q_i) = \begin{bmatrix} {}^{i-1}R_i(q_i) & {}^{i-1}r & {}^{i-1}\vec{r}_{0_{i-1}0_i} \\ 000 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

En consecuencia, la posición del punto P_{03} con respecto a las coordenadas del marco de referencia, puede ser obtenido por:

$$P_{03}(\varphi_1, \varphi_2, \theta_1) = {}^0H_1(\varphi_1) \cdot {}^0H_1(\theta_1) \cdot {}^1H_2(\varphi_2) \quad (4)$$

Se desarrolla la matriz de posición P_{03} de la forma que se muestra en la ecuación (5).

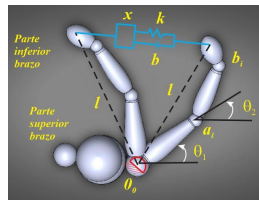
$$P_{03}(\varphi_1, \varphi_2, \theta_1) = \begin{bmatrix} p_{11}(\varphi_1, \varphi_2) & p_{12}(\varphi_1, \varphi_2, \theta_1) & p_{12}(\varphi_1, \varphi_2, \theta_1) & p_{14}({}^1a_3, \varphi_1, \varphi_2, \theta_1) \\ p_{21}(\varphi_1, \varphi_2) & p_{22}(\varphi_1, \varphi_2, \theta_1) & p_{23}(\varphi_1, \varphi_2, \theta_1) & p_{24}({}^1a_3, \varphi_1, \varphi_2, \theta_1) \\ 0 & p_{32}(\theta_1) & p_{33}(\theta_1) & p_{34}({}^1a_3, \theta_1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

III. MODELO DINÁMICO DEL EXOESQUELETO

Para obtener el diagrama de cuerpo libre, analizarlo y obtener el modelo dinámico de tres gdl en las coordenadas 0_0XYZ , se requiere siempre el modelo real de la extremidad superior (ver Figura 3a) para el diagrama de cuerpo libre. De acuerdo con (Choudhury *et al.*, 2013) el brazo puede considerarse un sistema de masa-resorte-amortiguador (ver Figura 3b). Existen algunas propiedades ergonómicas de las diferentes partes del cuerpo que se aplican para el desarrollo de un modelo matemático de la forma de Euler-Lagrange (Andrikopoulos, Nikolakopoulos and Manesis, 2015); el diagrama de cuerpo libre se dibuja de acuerdo a la trayectoria del movimiento de la mano. El gdl se considera de tres, ya que tres partes del brazo se están moviendo activamente viéndolo desde un punto perpendicular al plano. El Lagrangiano se calcula a partir de la energía potencial y cinética. Sin embargo, si se supone que el sistema de huesos y músculos actúa como un sistema masa-resorte-amortiguador, es necesario introducir un término para el amortiguador.



a) Sistema masa-resorte-amortiguador.



b) Esquema para el movimiento del brazo.

Figura 3. Imagen demostrativa del sistema a) modelo del brazo, b) diagrama del brazo.

Entonces; realizando un análisis de ángulo se obtienen las componente en x y en y .

$$\begin{aligned} \alpha &= \theta_1 & \theta_1 &= \alpha \\ \beta &= \theta_2 - \theta_1 & \theta_2 &= \beta + \theta_1 \\ \gamma &= \theta_3 - \theta_2 & \theta_3 &= \gamma + \beta + \theta_1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x_1 &= d_1 \sin \theta_1 \\ y_1 &= d_1 \cos \theta_1 \\ x_2 &= l_1 \sin \theta_1 + d_2 \sin \theta_2 \\ y_2 &= l_1 \cos \theta_1 + d_2 \cos \theta_2 \\ x_3 &= l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + d_3 \sin \theta_3 \\ y_3 &= l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + d_3 \cos \theta_3 \end{aligned} \quad (7)$$

Con estos datos podemos obtener todos los datos de:
 $M(\theta_i)\ddot{\theta}_i + C(\theta_i, \dot{\theta}_i)\dot{\theta}_i + g(\theta) + f_f(\dot{\theta}_i, d_i) = \tau_i$

Considerando que:

$$\begin{aligned} c_{11} &= b_1 \\ c_{12} &= m_2 d_2 l_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_3 l_1 l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ c_{13} &= m_3 d_3 l_1 \sin(\theta_1 - \theta_3) \\ c_{21} &= m_2 d_2 l_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_3 l_1 l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ c_{22} &= b_2 \\ c_{23} &= m_3 d_3 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_3) \\ c_{31} &= m_3 d_3 l_1 \sin(\theta_1 - \theta_3) \\ c_{32} &= m_3 d_3 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_3) \\ c_{33} &= b_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{11} &= (m_1 + m_2 + m_3)gl_1 \sin \theta_1 \\ f_{21} &= (m_2 + m_3)gl_2 \sin(\theta_2 - 1) \\ f_{31} &= gl_3 m_3 \sin(\theta_3 - 1) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{1}{A_1 B_2 C_3 - A_1 B_3 C_2 - A_2 B_1 C_3 + A_2 B_3 C_1 + A_3 B_1 C_2 - A_3 B_2 C_1}$$

$$\begin{aligned} g_1 &= f_{11} + c_{11}\dot{\theta}_1 + c_{12}\dot{\theta}_2^2 + c_{13}\dot{\theta}_3^2 \\ g_2 &= f_{21} - c_{21}\dot{\theta}_1^2 - c_{22}\dot{\theta}_2^2 - c_{23}\dot{\theta}_3^2 \\ g_3 &= f_{31} - c_{31}\dot{\theta}_1^2 - c_{32}\dot{\theta}_2^2 + c_{33}\dot{\theta}_3^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nabla_{11} &= B_2 C_3 - B_3 C_2 \\ \nabla_{12} &= -B_1 C_3 + B_3 C_1 \\ \nabla_{13} &= B^1 C^2 - B^2 C^1 \\ \nabla_{21} &= -A_2 C_3 + A_3 C_2 \\ \nabla_{22} &= A_1 C_3 - A_3 C_1 \\ \nabla_{23} &= -B_1 C_2 + B_2 C_1 \\ \nabla_{31} &= A_2 B_3 - A_3 B_2 \\ \nabla_{32} &= -A_1 B_3 + A_3 B_1 \\ \nabla_{33} &= A_1 B_2 - A_2 B_1 \end{aligned}$$

El modelo matemático del exoR de 3 gdl queda de la forma siguiente:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \nabla_{11} & \nabla_{12} & \nabla_{13} \\ \nabla_{21} & \nabla_{22} & \nabla_{23} \\ \nabla_{31} & \nabla_{32} & \nabla_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 - g_1 \\ \tau_2 - g_2 \\ \tau_3 - g_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

IV. RESULTADOS DE SIMULACION

En la Figura 4 se muestran los resultados analíticos que se obtienen en Adams View, que nos permite ver el gdl relacionado con el codo, y los resultados matemáticos, de forma constructiva en Solidworks y la trayectoria que se genera para alcanzar el ángulo deseado.

$$P_{03} \left(\begin{matrix} \varphi_1 = 0, \varphi_2 = 90 \\ , \theta_1 = 0 \end{matrix} \right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 48 \\ 0 & 1 & 0 & 27 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

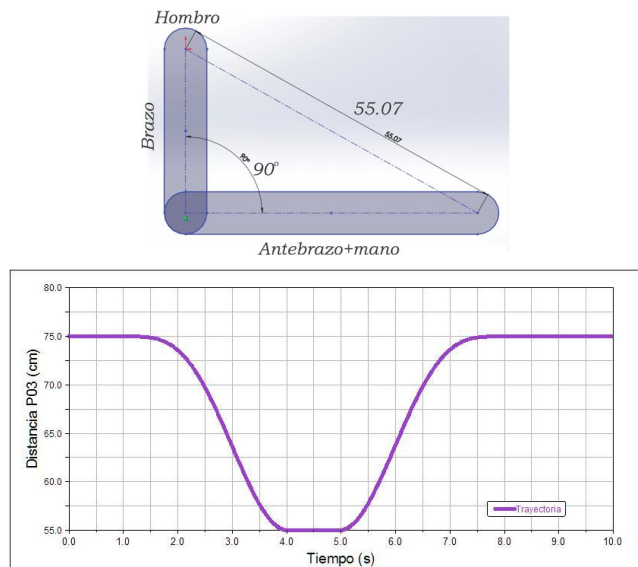


Figura 4. Resultados de la flexión-extensión del codo a 90°, en Adams View, Solid Works.

Para los datos de 30°, en la Figura 5 se pueden ver los cambios que se esperan.

$$P_{03} \left(\begin{matrix} \varphi_1 = 0, \varphi_2 = 30 \\ , \theta_1 = 0 \end{matrix} \right) = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.866 & 0 & 24 \\ 0.866 & 0.5 & 0 & 68.569 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

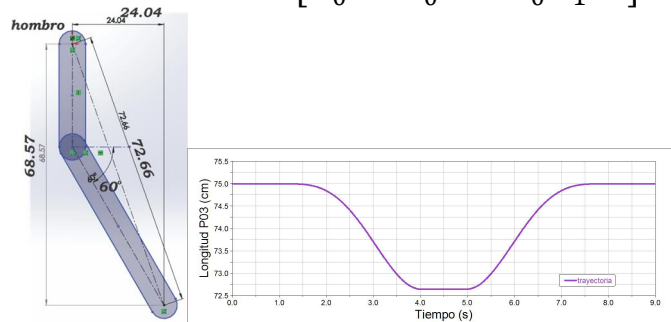


Figura 5. Resultados de la flexión-extensión del codo a 30°, en Adams View, Scientific WorkPlace, Solid Works.

La extensión y la aducción como son los movimientos contrarios correspondientes, solo cambian en la dirección de movimiento, no en los valores nominales entregados por la matriz P_{03}

$$P_{03} \left(\begin{matrix} \varphi_1 = 0, \varphi_2 = 90 \\ , \theta_1 = 0 \end{matrix} \right) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 27 \\ 1 & 0 & 0 & 48 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

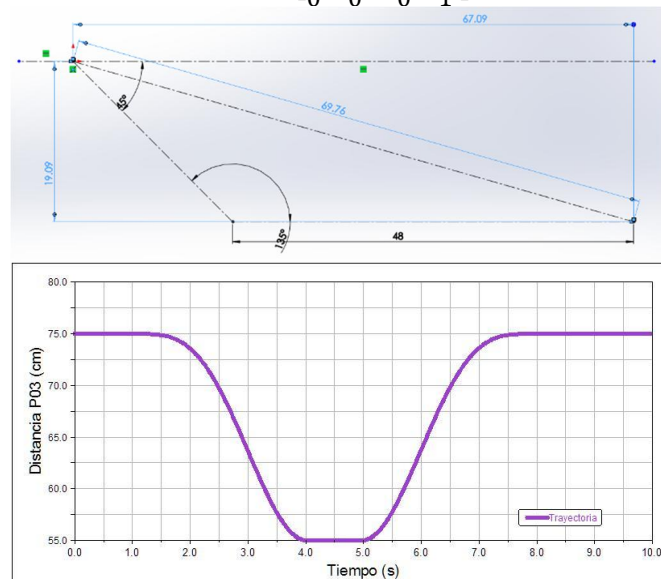


Figura 6. Resultados de la flexión-extensión del codo, en Adams View, Solid Works.

Para las simulaciones se consideran las dimensiones antropométricas del usuario en el exoesqueleto, así como las fuerzas que representan el peso de cada segmento de la extremidad. En estas simulaciones se considera el peso de un paciente promedio de 80 kg. En la tabla I se muestran la longitud y la masa de cada uno de los segmentos del brazo del paciente. En la figura 7 se muestran las longitudes al centro de masa de cada uno de los segmentos considerados en el exoesqueleto. En este centro de masa se considera que actúa el peso del paciente, como una perturbación no conocida para el controlador y que siempre permanece en la dirección de la gravedad.

Tabla I. Longitud y masa de los segmentos de las extremidades superiores.

Segmento	Masa (kg)	Longitud (cm)
Brazo	2.2	10.5
Antebrazo	1.3	35.2
Mano	0.5	55

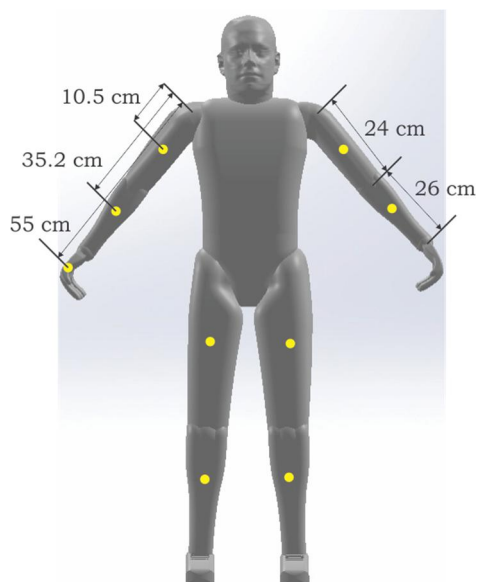


Figura 7. Longitud y ubicación del centro de masa de los segmentos de las extremidades superiores.

La combinación de movimientos permite verificar que el ExoR (ver Figura 8) es capaz de realizar movimientos suaves, y sin singularidades en dichas trayectorias.

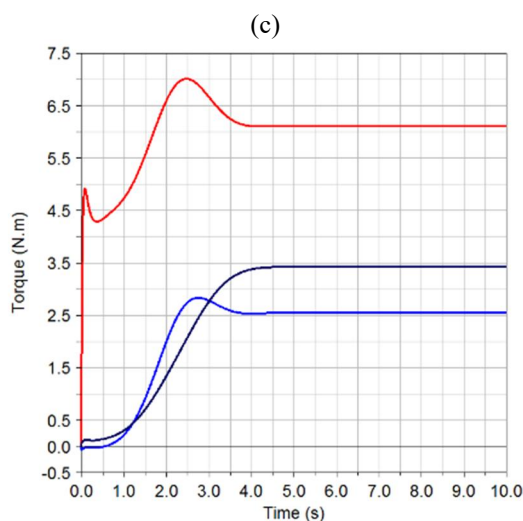
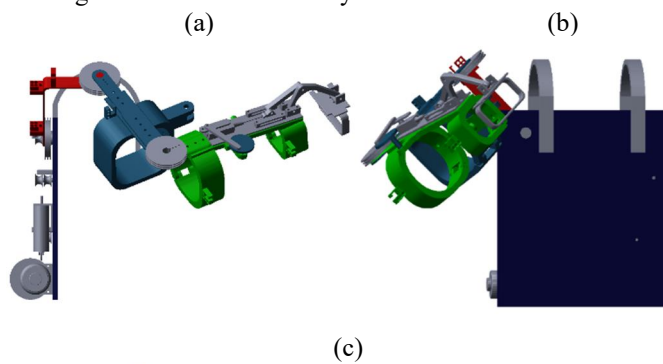


Figura 8. Torques para la flexión de 45 aducción 30 codo 90 del exoR.

VI. CONCLUSIONES

La medición de la cinemática tridimensional de la extremidad superior generalmente no ha recibido tanta atención científica como la de la extremidad inferior. El movimiento de la extremidad superior puede ser rápido y espacialmente complejo, particularmente en el hombro. Esto hace que el uso de marcadores unidos a varillas, que se han utilizado para la medición rotacional en modelos de extremidades inferiores, sea engorroso, propenso a la interferencia con otros segmentos de extremidades y esté sujeto a imprecisiones debidas a oscilaciones de tejidos blandos y efectos inerciales. Una filosofía de medición que tenga en cuenta estas restricciones debe equilibrar la practicidad con la precisión.

Las siguientes son algunas recomendaciones que deben tenerse en cuenta al definir la cinemática de un ExoR, la cual debe hacerse en consideración de la dinámica que imponen las dimensiones de los eslabones que lo forman:

- El espacio de trabajo del ExoR debe ser cuidadosamente estudiado para definir el volumen justo de trabajo.
- En un ExoR de n gdl, se debe considerar que, los primeros dos o tres eslabones son las que aportan la mayor dinámica debido a su peso.
- En un ExoR de n gdl, las primeras articulaciones deben dar las condiciones de posición y la última articulación en el extremo del ExoR debe concentrarse en un punto de la mano, son los gdl de orientación.
- Uno de los problemas que existen en el modelado, consiste en determinar la posición y orientación del extremo final de la cadena cinemática del ExoR con los valores de las coordenadas y las características geométricas del ExoR, y es conocido como problema cinemático directo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- Andrikopoulos, G., Nikolakopoulos, G. and Manesis, S. (2015) 'Design and development of an exoskeletal wrist prototype via pneumatic artificial muscles', *Meccanica*, 50(11), pp. 2709-2730 doi:10.1007/s11012-015-0199-8.
- Choudhury, T. T. *et al.* (2013) 'Modeling of Human Arm Movement: A Study on Daily Movement', in *Fifth International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation*. IJUM, MY: IEEE, pp. 63-68. doi: 10.1109/CIMSIm.2013.19.
- Garrido, J., Yu, W. and Soria, A. (2014) 'Modular Design and Modeling of an Upper Limb Exoskeleton', in *5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*. Sao Paulo, BR, pp. 508-513. doi: 10.1109/BIOROB.2014.6913828.
- Jung, Y. and Bae, J. (2015) 'Kinematic analysis of a 5-DOF upper-limb exoskeleton with a tilted and vertically translating shoulder joint', *IEEE/ASME Transactions on*

- Mechatronics*, 20(3), pp. 1428–1439. doi: 10.1109/TMECH.2014.2346767.
- Klopčar, N. and Lenarčič, J. (2005) ‘Kinematic model for determination of human arm reachable workspace’, *Meccanica*, 40(2), pp. 203–219. doi: 10.1007/s11012-005-3067-0.
- Knudson, D. (2007) *Fundamentals of Biomechanics*. Springer. Second Edition. Chico, EUA.
- Moore, K. L., Dailey, A. F. and Agur, A. M. R. (2013) *MOORE Anatomía con orientación clínica*, Wolters Kluwer Lippincott Williams & Wilkins. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Noveanu, S. *et al.* (2013) ‘Structural synthesis of the upper limb modular wearable exercisers’, *2013 17th International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2013; Joint Conference of SINTES 2013, SACCS 2013, SIMSIS 2013 - Proceedings*, pp. 693–698. doi: 10.1109/ICSTCC.2013.6689041.
- Olaya, A. R. (2008) *Sistema robótico multimodal para análisis y estudios en biomecánica, movimiento humano y control neuromotor*.
- Rodríguez, C. F., Quintero, H. and Aschner, H. (2005) ‘Movimiento del brazo humano: de los tres planos a las tres dimensiones’, *Revista de ingeniería*, pp. 36–42.
- Soriano, P. P. and Belloch, S. L. (2015) *Biomecánica Básica aplicada a la actividad física y el deporte*. Primera. Edited by Paidotribo. Valencia.

Calidad aplicada en el diseño de piezas mecánicas, mediante la manufactura aditiva

Ing. Gabriel Jiménez Sánchez *.

Ojeda Barroso José A. *

Saldivar Diaz Miguel A. *

*Instituto Tecnológico Superior de Salvatierra, Guanajuato, México

(Tel:4616102309); e-mail: gajimenez@itess.edu.mx

(Tel: 4661253329); e-mail: chaneke.teed@gmail.com

(Tel: 4661470051); e-mail: in16110347@itess.edu.mx

Resumen: En la presente investigación se realizaron diseños experimentales, con la finalidad de estandarizar parámetros para los procesos de manufactura aditiva, determinando la configuración óptima para asegurar la calidad de las piezas. Esto se logró a partir de un análisis estadístico “Taguchi”, en donde se realizó la evaluación de piezas manufacturadas en la impresora MakerBot Replicator + con escalas estandarizadas de rendimiento Bastian. En base a los estudios realizados, se alcanzaron los estándares óptimos de calidad propuestos en la manufactura de piezas por el método de Fused Deposition Modeling.

Palabras clave: Manufactura aditiva, calidad, diseño experimental.

1. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D, también conocida como manufactura por adición, es un proceso por el cual se crean objetos físicos colocando un material por capas en base a un modelo digital, el cual requiere un software y el hardware que trabajen en conjunto. Puede utilizarse para crear todo tipo de cosas, desde prototipos y piezas simples hasta productos finales altamente técnicos, como piezas para aeronaves, edificios ecológicos, implantes médicos que pueden salvar vidas e incluso órganos artificiales que se producen con capas de células humanas. (Autodesk Inc, 2019)

La manufactura aditiva es uno de los principales pilares de la industria 4.0, ya que esta ofrece a los desarrolladores de los productos, la capacidad para imprimir partes y montajes hechos de diferentes materiales con diferentes propiedades físicas y mecánicas, a menudo con un simple proceso de ensamble. Añade dificultad geométrica a la pieza, sin que esta presente el incremento del costo, por otra parte, facilita la diferenciación y personalización de los productos. Genera una fabricación competitiva que rompe con los esquemas de los tradicionales y lentos sistemas de producción en cadena. Pudiendo desarrollar pocas unidades sin estar atado a una alta inversión inicial, para poder comenzar a producir el producto como es el uso de los tradicionales moldes. (Grupo Garatu, 2019)

En la figura 1, se muestra el proceso de manufactura por adición.

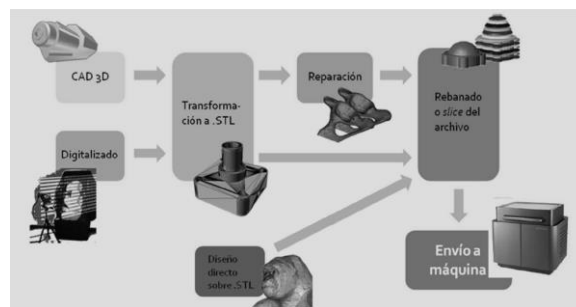


Figura 1 Proceso de manufactura por adición

1.1 Pruebas de rendimiento Bastian

Para evaluar el rendimiento general del sistema (máquina, software y materiales) fue necesario generar piezas estandarizadas que permitieran medir aspectos fundamentales como; el acabado, relleno y estructura. Para lograr este objetivo se utilizaron diseños Bastian, siendo estos, medibles bajo escalas cualitativas que permitieron valorar características específicas de las piezas manufacturadas.

Las tipologías relevantes de estas piezas son: exactitud dimensional, rendimiento del puente, Overhang performance, tolerancias negativas en el espacio, características del espacio finito positivo, resonancia mecánica en XY, resonancia mecánica en Z. (Bastian, 2015)

En la figura 2, se muestran los modelos para pruebas de rendimiento de Bastian.



Figura 2. Modelos de pruebas de rendimiento Bastian

1.2 Diseños experimentales Taguchi

Taguchi Establece que la *calidad de un producto* debe ser medida en términos de abatir al mínimo las pérdidas que ese producto le trae a la sociedad, desde que inicia su fabricación hasta que concluye su ciclo de vida. Los arreglos ortogonales son diseños propuestos por Taguchi que, como su nombre lo indica, tienen la propiedad de ortogonalidad, misma que también poseen los diseños factoriales clásicos. Estos arreglos son diseños factoriales completos, fraccionados o mixtos, dependiendo del número de factores a estudiar en un caso particular. (Gutierrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008)

1.3 Materia prima y equipo de trabajo

Cabe mencionar que para este proyecto el único material utilizado fue el PLA, (Acido Poli-Láctico) por otra parte es necesario señalar que esto fue resultado de la iniciativa de utilizar materiales amigables con el medio ambiente, tal es el caso del Ácido Poli-láctico que se trata de un polímero biodegradable derivado del ácido láctico, hecho por medio de recursos renovables al 100% entre ellos están: trigo, remolacha, maíz y más que son ricos en almidón.

En la cuestión de manufactura e impresión, el equipo utilizado es la impresora 3D Makerboot Replicator +. Su nuevo software "MakerBot Print" permite al usuario importar archivos CAD desde su programa original para poder trabajar con él, puedes trabajar con ensamblajes completos o con sus partes por separado. Aunado con la funcionalidad del manejo remoto de diversos equipos desde la nube. (Intelligy, 2019)

En la figura 3, se muestra el equipo de impresión 3D Makerboot Replicator +.



Figura 3. Impresora 3D Makerboot Replicator +.

2. METODOLOGÍA

Los diseños de Taguchi utilizan arreglos ortogonales, los cuales estiman los efectos de los factores en la media de respuesta y en la variación. Un arreglo ortogonal significa que el diseño está balanceado, de manera que los niveles de los factores se ponderan equitativamente. Debido a eso, cada factor se puede evaluar sin considerar todos los demás factores, de manera que el efecto de un factor no afecta la estimación de otro factor. (López Garcia, 2014)

Para el análisis de los parámetros más influyentes en las propiedades mecánicas del objeto será necesario crear un diseño de experimentos (DOE) de Taguchi. Para ello es deben seleccionar los parámetros que compondrán el estudio y los niveles para cada factor, así como el modelo de Taguchi a utilizarse en los modelos de las pruebas de rendimiento. (Minitab, 2019)

2.1 Factores y niveles del diseño experimental

En la Tabla 1, se muestran los factores de señal y los niveles utilizados para la configuración de los parámetros.

Tabla 1 Parámetros y niveles.

FACTORES QUE PUEDEN AFECTAR LA IMPRESIÓN	NVEL1	NVEL2	NVEL3
A- Printing Temperature	190°	205°	220°
B- Modo de impresión	Balance	Draft	MiniFill
C- Print Speed	40 mm/s	70 mm/s	100 mm/s
D- Tolerance	0.02mm	0.12mm	0.2mm

Se ha decidido utilizar tres niveles de estudio para cada factor, para ver claramente la influencia de cada uno de ellos.

El arreglo ortogonal que permite esta combinación de parámetros es la configuración L9. La cual permite estudiar hasta 13 factores a 3 niveles. Lo cual significa que se realizaran 9 corridas la misma pieza, pero combinando los factores que se establecieron en la tabla 1.

El modelo L9 de diseños experimentales Taguchi, se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 Configuración L9

No	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Se realizaron 7 modelos con configuración L9, es decir, un arreglo por cada prueba de rendimiento de Bastian. Cabe mencionar que cada prueba cuenta con algunas características diferentes, por ello la importancia de evaluarlas por separado. Después de imprimir todas las corridas de las pruebas de rendimiento se procede al llenado de datos para su posterior análisis en el software Minitab 18.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

Se realizaron las corridas de las siete pruebas de rendimiento. La figura 4, muestra las piezas impresas.



Figura 4 Piezas manufacturadas

Después de haber manufacturado los prototipos estandarizados, se procedió a la medición de los mismos mediante dos variables de respuesta. Para poder realizar la medición de calidad se determinó un método cualitativo, ya que las características físicas de los prototipos estandarizados reflejaban objetivamente el desempeño del proceso de manufactura aditiva. En la tabla 3, se muestra la escala de valoración cualitativa que representa el índice de aceptación de las piezas manufacturadas.

Tabla 3 Configuración Escala de valoración cualitativa

Asignación	Descripción
1	Pieza Muy Mala, no tiene forma la pieza
2	Pieza Mala, tiene 3 características de calidad malas.
3	Pieza Regular, tiene 2 características de calidad malas.
4	Pieza Buena, tiene 1 característica de calidad malas.
5	Pieza Excelente, no tiene ninguna característica mala de calidad.

Característica	Descripción
Acabado	Que la unión de capaz y textura este completa.
Relleno	Que no tenga porosidad la pieza y tenga resistencia táctil.
Estructura	Que la pieza no tenga deformaciones a simple vista.

3.1 Escala de pruebas de rendimiento Bastian

Esta escala maneja parámetros de medición basándose en un rango numérico generalmente ascendente, que va del 1 al 5. Escala Bastian.

- Asigne a la impresión un “1” si las desviaciones promedio en X o Y son mayores de 0.4mm.
- Asigne a la impresión un “2” si las desviaciones promedio en X o Y están entre 0.4 y 0.3 mm.
- Asigne a la impresión un “3” si las desviaciones promedio en X o Y están entre 0.2 y 0.3 mm.
- Asigne a la impresión un “4” si las desviaciones promedio en X o Y están entre 0.1 y 0.2mm.
- Asigne a la impresión un “5” si las desviaciones promedio en X o Y están entre 0 y 0.1 mm (Bastian, 2015)

3.2 Resultados obtenidos

Después de hacer las valoraciones mediante las escalas de calidad ya mencionadas, se obtuvieron los siguientes resultados.

La tabla 4, muestra los resultados después de las valoraciones.

Tabla 4 Resultados

No	A	B	C	D	Bastian	Escala de calidad
1	1	1	1	1	2	3
2	1	2	2	2	2	4
3	1	3	3	3	3	5
4	2	1	2	3	4	4
5	2	2	3	1	2	2
6	2	3	1	2	3	4
7	3	1	3	2	3	4
8	3	2	1	3	4	4
9	3	3	2	1	2	3

Con estos datos, se determinaron cuales fueron aquellos factores que están influyendo en la impresión de piezas de prueba, es decir, aquellos que están afectando directamente este proceso. La figura 5, muestra la gráfica obtenida a partir de los datos que se ingresaron a Minitab. En la gráfica se aprecia una correlación entre la dispersión de las medidas, esto indica que entre mayor sea la dimensión entre las pruebas, demuestra que el factor es más significativo.

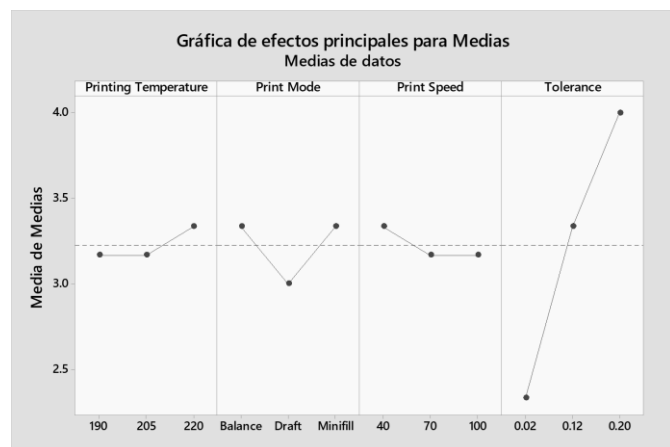


Figura 5 Gráfica de efectos principales para medias

En las respuestas para Bastian y la escala de calidad, se pueden observar que las tolerancias entre capas son el factor más influyente del proceso, ya que estas presentan alteraciones en las gráficas muy notables. Los otros 3 factores tienen menor influencia en el proceso ya que las variaciones en las gráficas son muy mínimas.

En la tabla 5, se muestran los datos obtenidos de manera numérica en donde la clasificación muestra el factor más influyente; tolerancias de capa.

Tabla 5 Resultados numéricos

Factores que influyen más en el proceso

Nivel	Printing Temperature	Print Mode	Print Speed	Print Tolerance
1	3.167	3.333	3.333	2.333
2	3.167	3.000	3.167	3.333
3	3.333	3.333	3.167	4.000
Delta	0.167	0.333	0.167	1.667
Clasificar	3.5	2	3.5	1

En la gráfica se observa la clasificación y arroja los mismos resultados obtenidos en la forma gráfica.

El siguiente paso después de determinar el factor más influyente en el proceso de la manufactura aditiva fue determinar los niveles óptimos, es decir, los parámetros de impresión más eficientes para obtener piezas de mayor calidad.

La tabla 6, muestra la configuración de parámetros óptima para operar la Impresora 3D Makerboot Replicator +.

Tabla 6 Configuración de parámetros

Configuración ideal para obtener piezas con mayor calidad

Printing Temperature	Print Mode	Print Speed	Print Tolerance
220	Minifill	70	0.2

En este diseño de experimentos de Taguchi realizado, se determinó que las tolerancias de capa son el factor más influyente en el proceso de manufactura aditiva o impresión 3D. Se debe tener una estandarización con este factor y tratar de mantenerlo en las condiciones óptimas, por otro lado, al estudiar los factores no influyentes, se deben utilizar los niveles más económicos.

4. CONCLUSIONES

En la tabla 7, se enuncian las conclusiones finales deducidas en el análisis experimental de las siete pruebas de rendimiento de Bastian, se tienen las siguientes configuraciones de parámetros y deducciones.

Tabla 7 Tabla de parámetros finales

Prueba de rendimiento	Bastian y escala de calidad			
	Printing Temperature	Print Mode	Print Speed	Tolerance
Exactitud dimensional	220°	Balance	100mm/s	0.2mm
Rendimiento del puente	220°	Minifill	70mm/s	0.2mm
Overhang performance	220°	Minifill	70mm/s	0.2mm
Tolerancias negativas	205°	Minifill	100mm/s	0.2mm
Espacio Fino Positivo	205°	Balance	100mm/s	0.2mm
Resonancia mecánica x-y	220°	Minifill	70mm/s	0.2mm
Resonancia mecánica Z	205°	Balance	100mm/s	0.2mm

Para las respuestas de calidad, se pudo deducir que el factor más influyente en el proceso de impresión fue “tolerancias de capa”, ya que en todas las gráficas se pudo observar mayor variación en los diferentes niveles de dicho factor; así mismo, se obtuvieron los parámetros óptimos, los cuales, permitieron tener una impresión de mayor calidad.

Al analizar los parámetros óptimos, se observó que la tolerancia debía estar a 0.2mm por capa para que las piezas no tuvieran defectos o estos fueran mínimos, y así las piezas mostraran un nivel menor de variabilidad en cuanto a las características de calidad; acabado, relleno y estructura.

Gracias a los resultados obtenidos, se sustenta que la importancia de generar estándares de calidad en el proceso de manufactura aditiva, con equipos de código abierto, es sumamente significativo ya que el impacto de la misma es tan amplio que se integran en campos como la medicina, diseño de equipos ergonómicos, sector industrial y de alimentos, por mencionar solo algunos. La importancia de la calidad en una pieza elaborada mediante la fabricación aditiva, radica en la durabilidad, estética, multifuncionalidad, diseño personalizable, uso de la reingeniería e ingeniería inversa. Así como en aspectos propios del sector.

Mas, sin embargo, el uso del Ácido Poliláctico (PLA), como materia prima fundamental, abre paso al hecho rotundo de preservación de los recursos naturales, siendo este un polímero biodegradable derivado de recursos renovables, implicando la conservación del medio ambiente.

4 REFERENCIAS

Autodesk Inc, 2019. *AUTODESK*. [Online] Available at: <https://www.autodesk.mx/solutions/3d-printing> [Accessed 01 Octubre 2019].

Bastian, A., 2015. 3DP pruebas geometrías. *Thingiverse*, pp. 1-8.

Grupo Garatu, 2019. *Grupo Garatu*. [Online] Available at: <https://grupogaratu.com/la-fabricacion-aditiva-la-industria-4-0-puedes-sonarlo-puedes-imprimirlo-3d/> [Accessed 06 Noviembre 2019].

Gutierrez Pulido, H. & De la Vara Salazar, R., 2008. *Análisis y diseños de experimentos*. Segunda Edición ed. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana.

Intelligy, 2019. *Intelligy*. [Online] Available at: <https://intelligy.com/impresoras-3d/makerbot/makerbot-replicator-plus/> [Accessed 01 Octubre 2019].

López Garcia, V., 2014. *Impresión 3D: Conceptos*. 2 ed. S.L: Power Controls Iberica.

Minitab, 2109. *Soporte Minitab*. [Online] Available at: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/taguchi-designs/> [Accessed 01 Octubre 2019].

Outsourcing Automation Systems, 2016. *Zemsania Golbal Group*. [Online] Available at: <https://oasys-sw.com/aplicaciones-mas-utiles-impresores-3d/> [Accessed 01 Octubre 2019].

Identificación de los Coeficientes Rotodinámicos en un sistema Rotor-cojinetes Utilizando Algoritmos Genéticos.

Saulo J. Landa Damas*, Jorge Colín Ocampo*, Andrés Blanco Ortega*, Julio Cesar Vergara Vazquez*

*Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, 62490, México.

Autor de contacto. (saulojesuslanda@cenidet.edu.mx).

Resumen: En esta investigación se presenta una metodología para identificar los coeficientes rotodinámicos en un sistema rotor-cojinetes a partir de datos experimentales. Sin duda la identificación de parámetros basada en la respuesta al desbalance del sistema rotodinámico se implementa de manera más fácil que otras metodologías experimentales debido a su independencia de dispositivos externos. Para el desarrollo del identificador de los parámetros mencionados se utilizan algoritmos genéticos que generalmente son usados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros.

Palabras clave: Coeficientes rotodinámicos, desbalances, algoritmos genéticos, rotodinámica.

1. INTRODUCCION

Las vibraciones mecánicas siempre están presentes en los sistemas rotodinámicos, su comportamiento dinámico se debe en gran medida al desbalance del sistema y a los parámetros de rigidez y amortiguamiento de los soportes, conocidos como coeficientes rotodinámicos (cuatro de rigidez y cuatro de amortiguamiento). Si se conocen estos parámetros se pueden predecir y controlar las vibraciones mecánicas alargando la vida útil de las máquinas rotatorias. Existe una vasta literatura sobre metodologías de identificación [1]. En particular determinar las características dinámicas de las chumaceras presurizadas es una tarea compleja debido al comportamiento del fluido en el interior del cojinete. Los métodos desarrollados hasta ahora para identificar estos parámetros pueden ser clasificados en tres categorías, analíticos, numéricos y experimentales [2]. Los métodos analíticos están limitados por los modelos teóricos; además que para poder resolverlos se tienen que tomar en cuenta varias consideraciones, como es el caso de la solución de Ocvirk para chumaceras cortas [3] o la solución de Sommerfeld para chumaceras largas [4]. Por otra parte, para identificar los coeficientes de forma numérica por lo general es necesario utilizar algún software que tenga la capacidad de resolución de problemas CFD (Computational Fluid Dynamics) [5]. Por último identificar los coeficientes a partir de datos experimentales es el método más investigado ya que los resultados experimentales son más reales que los teóricos y numéricos [6]. En esta investigación se propone utilizar la respuesta al desbalance como única fuerza de excitación del sistema rotodinámico para estimar los coeficientes rotodinámicos directos y el desbalance mediante el uso de algoritmos genéticos.

2. DESARROLLO

2.1 Algoritmos Genéticos

Los Algoritmos Genéticos son métodos adaptativos, generalmente usados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros, basados en la reproducción sexual y en el principio de supervivencia del más apto. Para alcanzar la solución a un problema se parte de un conjunto inicial de individuos, llamado población, generado de manera aleatoria. Cada uno de estos individuos representa una posible solución al problema. Estos individuos evolucionarán tomando como base los esquemas propuestos por Darwin sobre la selección natural, y se adaptarán en mayor medida tras el paso de cada generación a la solución requerida. Todo individuo tiene asociado un ajuste de acuerdo a la bondad con respecto al problema de la solución que representa (en la naturaleza el equivalente sería una medida de la eficiencia del individuo en la lucha por los recursos).

```
Inicializar población actual aleatoriamente
MIENTRAS no se cumpla el criterio de terminación
    crear población temporal vacía
    SI elitismo: copiar en población temporal mejores individuos
    MIENTRAS población temporal no llena
        seleccionar padres
        cruzar padres con probabilidad  $P_c$ 
        SI se ha producido el cruce
            mutar uno de los descendientes (prob.  $P_m$ )
            evaluar descendientes
            añadir descendientes a la población temporal
    SINO
        añadir padres a la población temporal
    FIN SI
    FIN MIENTRAS
    aumentar contador generaciones
    establecer como nueva población actual la población temporal
FIN MIENTRAS
```

Fig. 1. Funcionamiento de un Algoritmo Genético.

2.2 Modelo matemático de un sistema rotor-cojinetes de múltiples grados de libertad

Para identificar los parámetros de los soportes utilizando Algoritmos Genéticos se utiliza el procedimiento mostrado en la Fig. 1 el cual consiste en utilizar un modelo analítico de un sistema rotor-cojinetes de múltiples grados de libertad discretizado mediante la técnica de elemento finito. El eje se modela con el elemento finito tipo viga, considerando cuatro grados de libertad por nodo, dos desplazamientos laterales y dos rotaciones (flexiones de la viga), tal y como se muestra en la Fig. 2.

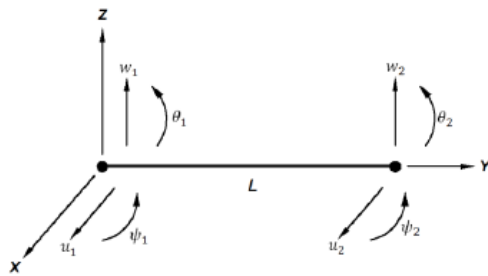


Fig. 2. Elemento finito tipo viga para el modelado del eje.

Mientras que el vector de desplazamiento nodal se define como:

$$\delta = [u_1, w_1, \psi_1, \theta_1, u_2, w_2, \psi_2, \theta_2]^T \quad (1)$$

Donde el superíndice “T” denota transpuesta y δ el vector de desplazamientos. Los desplazamientos correspondientes a los movimientos en las direcciones X y Z son:

$$\begin{aligned} \delta_u &= [u_1, \psi_1, u_2, \psi_2]^T \\ \delta_w &= [w_1, \theta_1, w_2, \theta_2]^T \end{aligned} \quad (2)$$

Siguiendo la metodología propuesta por Lalanne y Ferraris [7] para el modelado de los discos, cojinetes y desbalance, se tiene que el modelo matemático para un sistema rotor-cojinetes de múltiples grados de libertad considerando desbalance como fuerza de excitación, está dado como:

$$[M_{GS}]\{\ddot{\delta}\} + [[C_{1GS}] + \dot{\phi}[C_{2GS}]]\{\dot{\delta}\} + [[K_{GS}] + [K_{GP}]]\{\delta\} = \sum_{n=1}^{nm_u} \{F_{u(2n-1)}\} \sin \dot{\phi} t + \sum_{n=1}^{nm_u} \{F_{u(2n)}\} \cos \dot{\phi} t \quad (3)$$

Con

$$\begin{aligned} F_{u(2n-1)} &= m_u d_n \dot{\phi}^2 \begin{bmatrix} \cos \alpha_n \\ -\sin \alpha_n \end{bmatrix} \\ F_{u(2n)} &= m_u d_n \dot{\phi}^2 \begin{bmatrix} \sin \alpha_n \\ \cos \alpha_n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

Donde nm_u es el número de masas de desbalance presentes en el sistema. Asimismo, $\{\delta\}$ es el vector que contiene todos los desplazamientos nodales; $[MGs]$ es la matriz de masa global del sistema y está formada por $[[MTGs]+[MRGs]]$ global, $[[C1Gs]+\phi[C2Gs]]$ es la matriz de amortiguamiento global, que incluye los efectos giroscópicos en función de la velocidad de rotación ($\phi[C2Gs]$), y $[C1Gs]$ que contiene el amortiguamiento atribuible a los soportes. $[KGs]$, es la matriz de rigidez global del sistema, mientras que $[KGP]$ es la matriz global de rigidez de los soportes. Asimismo, $\{Fu(2n-1)\}$ y $\{Fu(2n)\}$ son los vectores de fuerza causados por las masas de desbalance. En la ec. 1, m_u denota la masa del desbalance del sistema y d_n la excentricidad de dicha masa, mientras que α_n es la posición angular donde se encuentra la masa de desbalance.

2.3 Metodología de identificación utilizando Algoritmos Genéticos

En el primer paso se crea una población inicial de manera aleatoria los cuales son introducidos al modelo analítico la respuesta al desbalance en estado estable se obtiene al solucionar la ecuación de movimiento del modelo. De igual manera la respuesta al desbalance se obtiene del modelo experimental, ambas respuestas son comparadas y se establece un criterio de parada el cual está determinado por la función de rendimiento del algoritmo, si no se cumple el criterio, un nuevo conjunto de parámetros se propone y el ciclo empieza de nuevo.

3. SIMULACIÓN

Con el objetivo de verificar la metodología propuesta se realizan dos configuraciones, para la primera se utiliza un sistema rotor-chumacera con un disco inercial en el centro, las características mecánicas y geométricas son tomadas del banco de prueba experimental de la marca Bently Nevada modelo RK4 (ver Tabla 1 y 2). Los valores de referencia de los cojinetes se tomaron de la literatura [8]. Para la segunda configuración se toma en cuenta un sistema rotor cojinete con tres discos inerciales soportados sobre dos chumaceras así como todos sus parámetros [7]. Esta primera etapa consiste en evaluar el Algoritmo Genético por lo cual se realizan únicamente simulaciones numéricas.

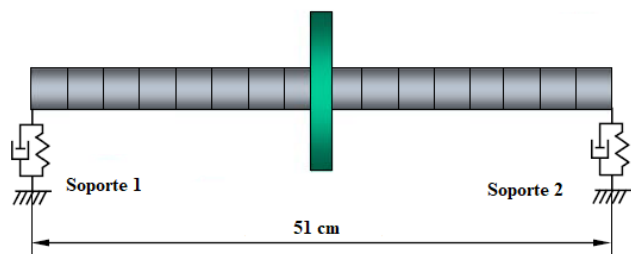


Fig. 3. Modelo del rotor, Configuración 1.

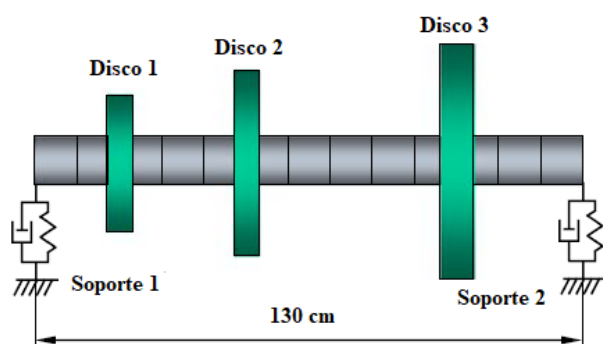


Fig. 4. Modelo del rotor, Configuración 2 (Lalanne y Ferraris, 1998).

Tabla 1. Propiedades mecánicas y geométricas del eje, configuración 1.

Mecánicas	Geométricas
$E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$	Radio externo (r_e) = 0.005 m
$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$	$L_{total} = 0.51 \text{ m}$
$\nu = 0.30$	$L_{elemento} = 0.031875 \text{ m}$

Tabla 2. Propiedades mecánicas y geométricas del disco, configuración 1.

Mecánicas	Geometricas
$E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$	e_D 0.025
$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$	r_{iD} 0.005
$\nu = 0.30$	r_{eD} 0.0375

Tabla 3. Propiedades mecánicas y geométricas del eje, configuración 2.

Mecánicas	Geométricas
$E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$	Radio externo (r_e) = 0.05 m
$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$	$L_1 = 0.2 \text{ m}; L_2 = 0.3 \text{ m}$
$\nu = 0.30$	$L_3 = 0.5 \text{ m}; L_4 = 0.3 \text{ m}$

Tabla 4. Propiedades mecánicas y geométricas de los discos config. 2.

Mecánicas	Geométricas			
$E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$	Disco	D_1	D_2	D_3
$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$	e_D	0.05	0.05	0.06
$\nu = 0.30$	r_{iD}	0.05	0.05	0.05
	r_{eD}	0.12	0.20	0.20

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se puede observar en la Tabla 5 y 6 los resultados de la identificación de los coeficientes rotodinámicos directos a diferentes velocidades de rotación utilizando Algoritmos Genéticos, los valores son muy cercanos a los parámetros buscados en ambas configuraciones.

Tabla 5. Resultados de la identificación utilizando la respuesta al desbalance, configuración 1

Variables	Referencia	Parámetros identificados a diferentes velocidades (rpm)		
		800	2000	3600
$k_{xx}(\text{N/m})$	9.42E4	9.32E4	9.52E4	9.21E4
$k_{yy}(\text{N/m})$	5.75E5	5.74E5	5.75E5	5.74E5
$c_{xx}(\text{N} \cdot \text{s/m})$	17.51	17	17	18
$c_{yy}(\text{N} \cdot \text{s/m})$	17.51	19	18	18

Tabla 6. Resultados de la identificación utilizando la respuesta al desbalance, configuración 2

Variables	Referencia	Parámetros identificados a diferentes velocidades (rpm)		
		800	2000	3600
$k_{xx}(\text{N/m})$	5E7	5.01E7	5.01E7	5.01E7
$k_{yy}(\text{N/m})$	7E7	7.00E7	7.00E7	7.00E7
$c_{xx}(\text{N} \cdot \text{s/m})$	5E2	3.98E2	4.92E2	4.54E2
$c_{yy}(\text{N} \cdot \text{s/m})$	7E2	6.87E2	7.01E2	6.98E2

6. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación se concluye que el utilizar algoritmos genéticos para identificar los parámetros de los soportes en un sistema rotodinámico es factible, sin embargo se necesita realizar un estudio más a fondo ya que el utilizar estas técnicas para identificar requieren de equipo con un alto rendimiento. Debido a que son metodos iterativos.

REFERENCIAS

- [1] L. Ljung, "Ljung L System Identification Theory for User," PTR Prentice Hall Upper Saddle River NJ, vol. 25. pp. 475–476, 1987.

- [2] R. Tiwari, a. W. Lees, and M. I. Friswell, "Identification of Dynamic Bearing Parameters: A Review," *Shock Vib. Dig.*, vol. 36, no. 2, pp. 99–124, 2004.
- [3] G. B. Dubois and F. W. Ocvirk, "Analytical derivation and experimental evaluation of short-bearing approximation for full journal bearings," *Natl. Advis. Comm. Aeronaut.*, vol. Reporte 11, 1955.
- [4] A. Sommerfeld, "Zur hydrodynamischen Theorie der Schmiermittelreibung. In: Zeitschrift für Mathematik und Physik," pp. 97–155, 1904.
- [5] V. Meruane and R. Pascual, "Identification of nonlinear dynamic coefficients in plain journal bearings," *Tribol. Int.*, vol. 41, no. 8, pp. 743–754, 2008.
- [6] C. Chen, J. Jing, and J. Cong, "Identification of dynamic coefficients in circular journal bearings from unbalance response and complementary equations," vol. 0, no. 0, pp. 1–13, 2018.
- [7] G. F. Michel Lalanne, *Rotordynamics Prediction in Engineering*. 1998.
- [8] José Gabriel Mendoza Larios, "Identificador Algebraico en Línea del Desbalance para un Sistema Rotodinámico," Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México., 2016.

Análisis cinemático de una máquina de rehabilitación de cadera

Uziel Reynosa-Vargas*, Andrés Blanco-Ortega*, Cesar H. Guzmán-Valdivia**
Wilberth M. Alcocer-Rosado* y Arturo Abúndez-Pliego*

**Instituto Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490
(Tel: 777-362-7770; e-mail: andres.blanco@cenidet.edu.mx).*

***Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México, C. P. 20131
(e-mail: cesar.gzm@hotmail.com)*

Resumen: El uso de la robótica en la rehabilitación ha captado gran interés en instituciones y empresas alrededor de todo el mundo. Los robots de rehabilitación son una herramienta para los especialistas como los fisioterapeutas, para proporcionar movimientos suaves y controlados, así como atender una mayor cantidad de usuarios que requieren un proceso de rehabilitación. En este artículo se propone un nuevo robot para rehabilitación de cadera de 3 grados de libertad basado en el uso de sistemas de guías lineales. Se presenta el análisis cinemático para dimensionar los eslabones, así como para que el robot proporcione el rango de movimiento que se requiere para la rehabilitación de cadera. Este robot proporciona los movimientos de flexión-extensión, abducción-aducción y rotación interna-externa.

Keywords: Rehabilitador de cadera, máquina de rehabilitación, robótica de rehabilitación.

1. INTRODUCCIÓN

La mecatrónica en la rehabilitación de cadera es un campo de investigación relativamente nuevo. Los robots o máquinas de rehabilitación, o rehabilitadores son herramientas para fines de rehabilitación que permiten a los pacientes realizar movimientos básicos y combinados como parte de su programa de rehabilitación.

El objetivo que busca la rehabilitación, es recuperar las aptitudes físicas perdidas a causa de un incidente traumático mediante terapia física y, en estos tiempos, que la recuperación del paciente sea cada vez más rápida.

Debido al constante incremento de pacientes con lesiones y la falta de personal fisioterapeuta para brindar una correcta atención, surgen los robots de rehabilitación. Es importante señalar que estos dispositivos mecánicos no sustituyen al terapeuta, le sirven como apoyo durante el proceso de terapia.

En (Guzmán et al., 2013) presenta un análisis de la biomecánica de la cadera mediante el uso del software de kinovea, para medir las posiciones angulares de la extremidad inferior, con el fin de analizar los movimientos en un proceso de rehabilitación, así como determinar las posiciones y velocidades que una máquina de rehabilitación debe proporcionar. Posteriormente, en (Guzmán, 2014) presenta una revisión de la robótica en la rehabilitación de cadera, donde clasifica los tipos de robots para rehabilitación de cadera basados en: mecanismos externos, en ortesis, en el andar, mecanismos en los pies, en ortesis y caminadora.

Sakaki (1999) propone un rehabilitador de miembros inferiores, para movilizar la rodilla y la cadera en pacientes espásticos. El dispositivo es capaz de imitar el movimiento de la pierna realizado por el terapeuta, y posteriormente realizarlo con la misma fuerza y velocidad.

Sun (2009) propone un mecanismo paralelo como rehabilitador de miembros inferiores de 3 GDL, utiliza correderas lineales que permiten deslizar la base del reposa-pie. En 2009 S. Komada desarrollo un rehabilitador de 3 GDL con una interfaz que ayuda al paciente a informarle como va su rehabilitación y explicarle el movimiento que está realizando; realiza la rehabilitación en el plano sagital de rodilla y cadera.

Akdogan y Adli (2011) presentan un robot terapéutico de 3-GDL para rehabilitación en extremidades inferiores, llamado, Physiotherabot. El rehabilitador realiza movimientos de flexión/extensión y abducción/aducción.

Guzmán et al. (2015), propone un robot de rehabilitación de cadera llamado HipBot, de 5 GDL para realizar movimientos combinados de abducción/aducción y flexión/extensión, ver Fig. 1. Posteriormente, en (Guzmán et al., 2017) propone un controlador robusto para Hipbot con seguimiento de trayectorias.

Gómez et al. (2016) desarrolló el prototipo físico de un rehabilitador de 3 GDL basado en un mecanismo paralelo que proporciona movimientos de flexión-extensión, abducción-aducción y movimientos combinados, ver Fig. 2.

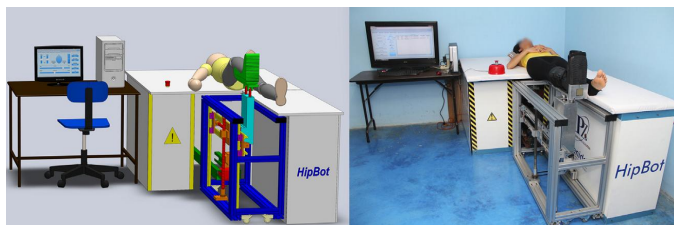


Fig. 1 Rehabilitador de cadera HipBot.

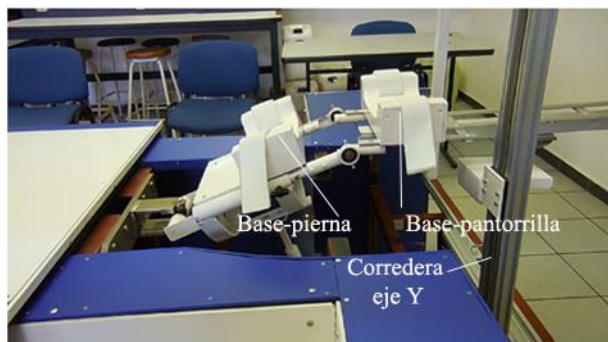


Fig. 2 Robot paralelo rehabilitador de cadera.

De la revisión del estado del arte, se puede encontrar que se han propuesto diversas máquinas para la rehabilitación de cadera, en su mayoría proporcionan solo dos movimientos, siendo sistemas sobreactuados; considerando que la cadera presenta tres rotaciones (3 GDL) (Sakaki, 1999) (Akdogan y Adli, 2011) (Sun, 2009) (Guzmán et al., 2017) (Gómez et al., 2016).

En este trabajo se presenta el diseño de un robot para rehabilitación de cadera de 3 GDL. El dispositivo proporciona los movimientos necesarios para realizar una correcta rehabilitación de cadera, los cuales son: flexión, extensión, abducción, aducción, rotación interna y rotación externa.

En la tabla I se muestran los valores máximos para los diversos movimientos de cadera (Guzmán et al., 2015). Para una mayor comprensión, en la Fig. 3 se muestran los movimientos indicados en la Tabla I.

Tabla I. Valores máximos de movimiento de la cadera

Tipo de movimiento	Valor máximo
Flexión	120°
Extensión	20°
Abducción	45°
Aducción	30°
Rotación Interna	45°
Rotación Externa	45°

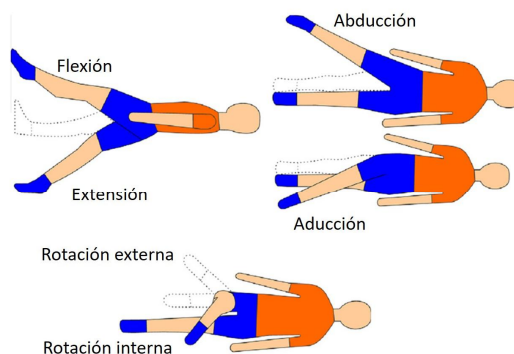


Fig. 3 Movimientos básicos de la cadera.

2. ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL ROBOT DE REHABILITACIÓN

2.1 Descripción de la máquina

El rehabilitador que se propone, está basado en la configuración de un sistema cartesiano, ver Fig. 4. Por lo que las entradas para los movimientos se realizan mediante 3 guías lineales. El uso de un tornillo para transmitir las fuerzas ayuda a que las fuerzas para proporcionar los movimientos sean pequeñas. En cualquier posición que se tenga en el rehabilitador, considerando el peso de la pierna del paciente, se mantiene estable, es decir, no se requiere aplicar fuerza para mantenerlo en una cierta posición.

Para que la máquina proporcione los movimientos de Flexión-extensión, abducción-aducción y rotación interna y externa, se procede a realizar un análisis cinemático de la máquina. Se consideran diferentes cadenas cinemáticas como se muestra a continuación.

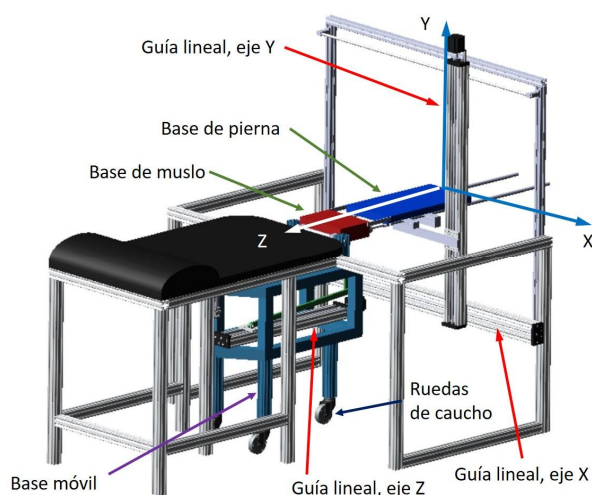


Fig. 4 Rehabilitador de cadera con 3 guías lineales.

2.2 Movimiento de flexión-extensión

Para que la máquina de rehabilitación de cadera proporcione el movimiento de flexión, ver Fig. 5, se requiere habilitar el movimiento del eje Y, en conjunto con el eje Z. Para el movimiento de extensión, solo se requiere mover la base móvil del eje Y.



Fig. 5 Rehabilitación en movimiento de flexión.

Para determinar los desplazamientos que se requieren en las guías lineales del eje Y y Z, se utiliza la ecuación de cierre de circuito mostrado en la Fig. 6.

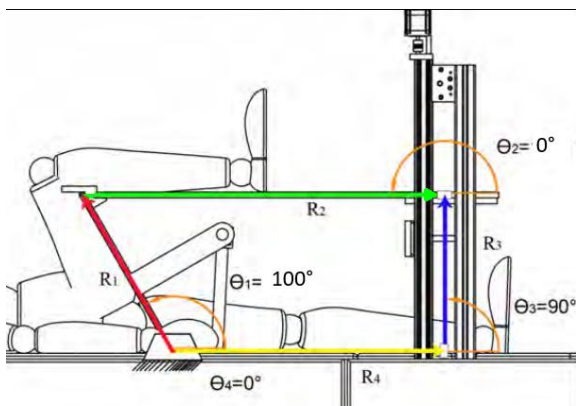


Fig. 6 Ecuación de cierre de circuito para movimiento de flexión.

Tomando en cuenta la Fig. 6, la ecuación de lazo vectorial del mecanismo de cuatro barras queda como:

$$R_1 + R_2 = R_3 + R_4 \quad (1)$$

Los vectores R_1 , R_2 , R_3 y R_4 de la ecuación (1), se sustituyen por sus equivalentes en números complejos de la siguiente forma:

$$r_1 e^{j\theta_1} + r_2 e^{j\theta_2} = r_3 e^{j\theta_3} + r_4 e^{j\theta_4} \quad (2)$$

Representando en forma cartesiana, separando en sus componentes real e imaginario, y sustituyendo los parámetros conocidos: $\theta_2=0^\circ$, $\theta_4=0^\circ$ y $\theta_3=90^\circ$.

Se obtienen las ecuaciones (3) y (4).

$$r_2 = r_4 - r_1 \cos \theta_1 \quad (3)$$

$$r_3 = r_1 \sin \theta_1 \quad (4)$$

Al determinar los desplazamientos de (3) y (4), se determina la distancia requerida para definir la longitud de los ejes para la base de la pierna (r_2) y la distancia (r_3) para mantener en posición horizontal la pierna. En la Fig. 7 se grafica (3) y (4) para diferentes valores de θ_1 , manteniendo la base de la pierna en posición horizontal, hasta llegar a un ángulo de flexión de 90° . Sin embargo, el diseño del mecanismo permite que se pueda llegar al valor máximo de flexión, 120° .

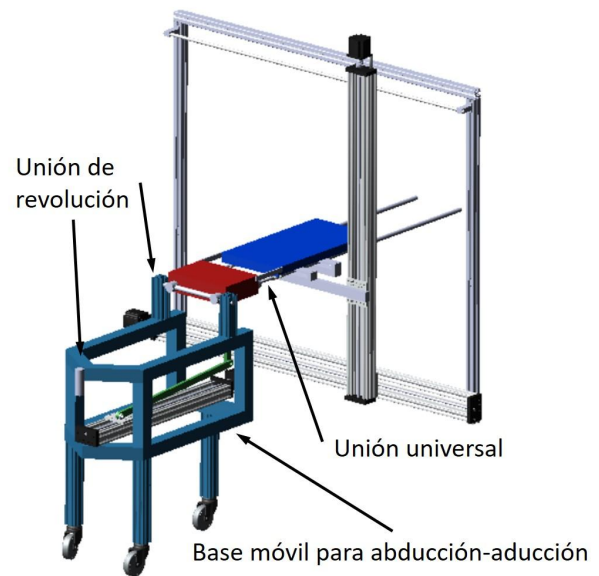


Fig. 7 Posición de muslo y pierna para diferentes ángulos de θ_1 .

Tomando en cuenta la Fig. 8, para determinar el desplazamiento que se debe tener en la guía lineal del eje Z, se utiliza la siguiente ecuación de lazo vectorial del mecanismo de cuatro barras, dada por:

$$R_1 + R_2 = R_3 + R_4 + R_5 \quad (5)$$

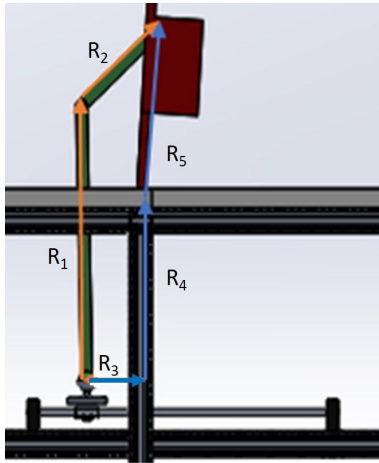


Fig. 8 Ecuación de cierre de circuito para el eje Z.

Los vectores R_1 , R_2 , R_3 , R_4 y R_5 de la ecuación (5), se sustituyen por sus equivalentes en números complejos, separando la parte real e imaginaria para determinar r_3 y r_4 :

$$r_3 = r_2 \cos \theta_2 - r_5 \cos \theta_5 \quad (6)$$

$$r_4 = r_1 + r_2 \sin \theta_2 - r_5 \sin \theta_5 \quad (7)$$

Las relaciones (6) y (7) son utilizadas solo para dimensionar el mecanismo, de tal manera que la máquina pueda proporcionar un ángulo de flexión máximo de 120° .

Para determinar la longitud de desplazamiento que se debe tener en la guía lineal en función del ángulo de flexión θ_3 , se utiliza la siguiente ecuación de cierre de circuito mostrado en la Fig. 9.

Tomando en cuenta la Fig. 9, la ecuación de lazo vectorial del mecanismo de cinco barras queda como:

$$R_1 + R_2 = R_3 + R_4 + R_5 \quad (8)$$

Los vectores R_1 , R_2 , R_3 , R_4 y R_5 de la ecuación (8), se sustituyen por sus equivalentes en números complejos, separando en su parte real e imaginaria, se obtienen las relaciones, y sustituyendo los parámetros conocidos $\theta_2 = \theta_3 + 45^\circ$, $\theta_4 = 90^\circ$ y $\theta_5 = 0^\circ$.

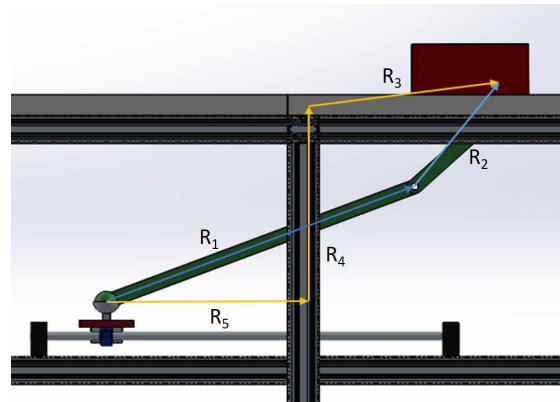


Fig. 9 Ecuación de cierre de circuito para relacionar el movimiento del eje Z en función del ángulo de flexión θ_3 .

$$r_5 = r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos (\theta_3 + 45^\circ) - r_3 \cos \theta_3 \quad (9)$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{r_4 + r_3 \sin \theta_3 - r_2 \sin (\theta_3 + 45^\circ)}{r_1} \right) \quad (10)$$

Con las relaciones (4), (9) y (10) se puede determinar la posición que las guías lineales Y y Z, deben desplazarse para proporcionar un movimiento de flexión como se muestra en la Fig. 5.

Para el movimiento de extensión se utiliza la ecuación de cierre de circuito, mostrado en la Fig. 10. Las relaciones que se obtienen, para el desplazamiento en el eje Y, están dadas por:

$$r_3 = r_2 \cos \theta_2 - r_5 \cos \theta_5 \quad (11)$$

$$r_4 = r_1 + r_2 \sin \theta_2 - r_5 \sin \theta_5 \quad (12)$$

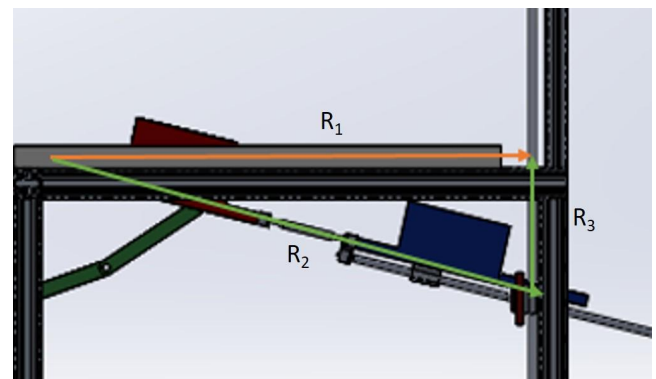


Fig. 10 Ecuación de cierre de circuito para movimiento de flexión.

2.3 Movimiento de abducción-aducción

El movimiento de abducción-aducción se proporciona al mover una base móvil, con el uso de ruedas, que soportará toda la pierna del paciente, ver Fig. 4. El movimiento será controlado al desplazar la base móvil de la guía del eje X.

Para determinar los desplazamientos de la base móvil de la guía del eje X, se considera la ecuación de cierre de circuito mostrado en la Fig. 11.

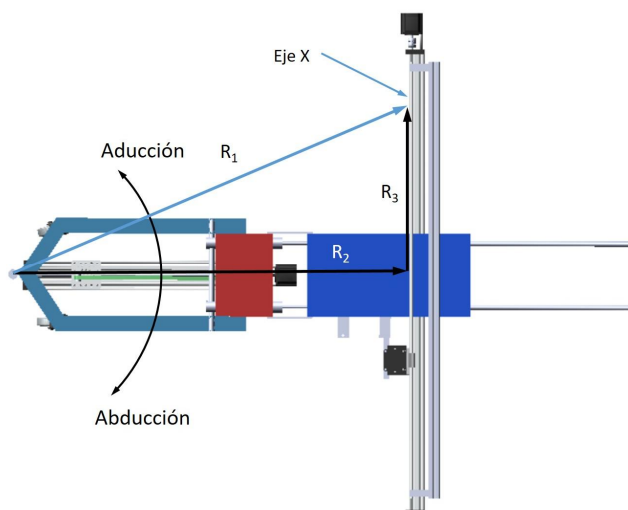


Fig. 11 Ecuación de cierre de circuito para el movimiento de abducción-aducción.

Tomando en cuenta la Fig. 11, la ecuación de lazo vectorial del mecanismo de tres barras queda como:

$$R_1 = R_2 + R_3 \quad (13)$$

Los vectores R_1 , R_2 y R_3 de la ecuación 13, se sustituyen por sus equivalentes en números complejos, separando en su parte real e imaginaria, se obtienen las relaciones, y sustituyendo los parámetros conocidos $\theta_2=0^\circ$ y $\theta_3=90^\circ$:

$$r_1 = \frac{r_2}{\cos \theta_1} \quad (14)$$

$$r_3 = r_1 \sin \theta_1 \quad (15)$$

2.4 Movimiento de rotación interna y externa

Para que la máquina proporcione los movimientos de rotación interna y externa, se debe primero llevar a una posición de flexión de $\theta_1=90^\circ$, ver Fig. 6. Posteriormente, al mantener el muslo y la pierna de manera perpendicular, se debe de mover la base móvil de la guía lineal del eje X. Este movimiento se

obtiene por la unión universal que se coloca para unir la base del muslo y la base de la pierna.

Para analizar la cinemática, se considera la ecuación de cierre de circuito mostrado en la Fig. 12. Como se observa, en este caso solo se considera la base de la pierna (pantorrilla), que se gira cuando la base móvil del eje X se desplaza en ambas direcciones (positiva y negativa), ver Fig. 4.

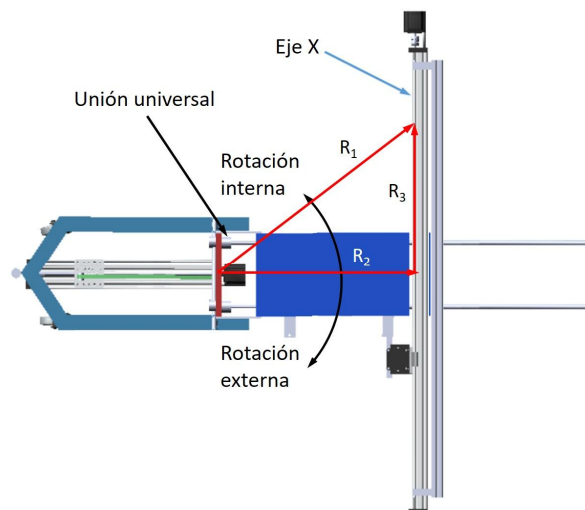


Fig. 12 Posición de muslo y pierna para diferentes ángulos de θ_1 .

Considerando la Fig. 12, la ecuación de lazo vectorial del mecanismo de tres barras queda como:

$$R_1 = R_2 + R_3 \quad (16)$$

Los vectores R_1 , R_2 y R_3 de la ecuación 16, se sustituyen por sus equivalentes en números complejos, separando en su parte real e imaginaria, se obtienen las relaciones, y sustituyendo los parámetros conocidos $\theta_2=0^\circ$, $\theta_4=0^\circ$ y $\theta_3=90^\circ$:

$$r_1 = \frac{r_2}{\cos \theta_1} \quad (17)$$

$$r_3 = r_1 \sin \theta_1 \quad (18)$$

3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

A continuación, se presentan algunos resultados de simulación para las relaciones obtenidas del análisis cinemático.

Para el movimiento de flexión, dada por las relaciones (3) y (4) se determina que los valores mínimos para proporcionar dicho movimiento son: $r_2 = 808\text{mm}$, $r_3 = 470\text{mm}$. En la Fig. 13 se grafica para diferentes posiciones del ángulo de flexión: $0 \leq \theta_1 \leq 120^\circ$.

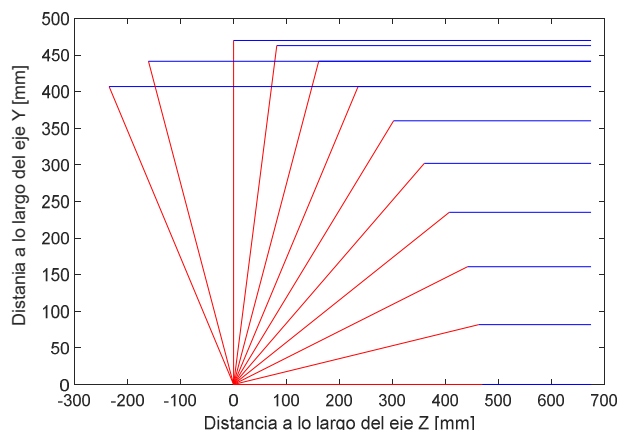


Fig. 13 Simulación cinemática para el movimiento de flexión.

Para el movimiento de abducción-aducción, dada por las relaciones (14) y (15) se determina que los valores mínimos para proporcionar dicho movimiento son: $r_1 = 780\text{mm}$, $r_3 = 390\text{mm}$. En la Fig. 13 se grafica para diferentes posiciones del ángulo de abducción-aducción: $-30 \leq \theta_1 \leq 30^\circ$.

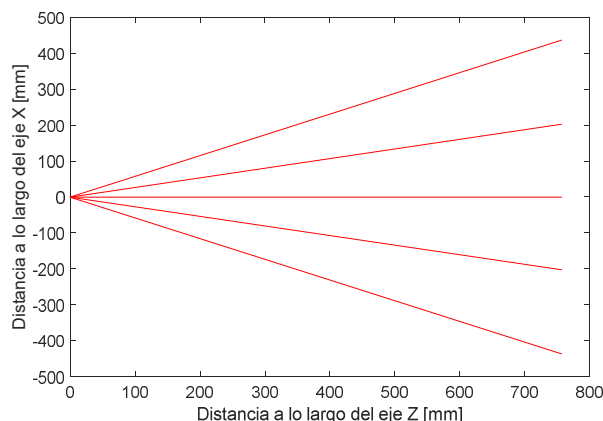


Fig. 14 Simulación cinemática para el movimiento de abducción-aducción.

La respuesta para la rotación interna-externa, es similar a la mostrada en la Fig. 14, solo que la base de la pierna es la única que gira, como se muestra en la Fig. 12.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el diseño de una máquina para rehabilitación de cadera de 3 GDL. Por el tipo de uniones y mecanismos que se utilizan, ésta puede proporcionar los movimientos de la cadera de flexión-extensión, abducción-aducción y rotación interna-externa.

Se analiza la cinemática para dimensionar los eslabones de la máquina, así como para determinar los desplazamientos que se deben de programar con un sistema de control para proporcionar los movimientos requeridos. Debido al uso de

guías lineales, es posible implementar el control numérico para proporcionar los movimientos básicos, así como movimientos combinados, utilizando la cinemática reportada en este artículo

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo brindado por el Tecnológico Nacional de México/CENIDET en el desarrollo del proyecto titulado: "Diseño y construcción de un rehabilitador de cadera con sistema de control numérico", con clave 5206.19-P, y patente en trámite.

REFERENCIAS

- Akdogan E, Adli M. A. (2011). The design and control of a therapeutic exercise robot for lower limb rehabilitation: physiotherabot. *Mechatronics*; 21: 509–522.
- Gómez Becerra, F. A., Blanco Ortega, a., García Beltrán, C. D., Guzmán Valdivia, C. H. and Delgado Arcega, R. O., (2018) "Design and control of a new parallel robot for the rehabilitation of the hip-knee.," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 5, pp. 1314-1319.
- Guzmán-Valdivia, C.H., Blanco-Ortega, A., Oliver-Salazar, M. A., Gómez-Becerra, F. A., Carrera-Escobedo, J. L., (2013) Design and analysis of a new robotic mechanism for lower limbs rehabilitation, *IEEE International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering*. Morelos, México. pp. 15-20.
- Guzmán-Valdivia, C.H., Blanco-Ortega, A., Oliver-Salazar, M. A., Carrera-Escobedo, J. L., Azcaray-Rivera, H. R., (2014) La robótica en la rehabilitación de cadera, *Dyna* 9 (3) 281–286.
- Guzmán-Valdivia, C.H., Blanco-Ortega, A., Oliver-Salazar, M. A., Gómez-Becerra, F. A., Carrera-Escobedo, J. L. (2015), HipBot – The design, development and control of a therapeutic robot for hip rehabilitation, *Mechatronics*, 30 (1) 55–64.
- Guzmán C. H., Blanco, A., Brizuela, J. A., Gómez, F. A. (2017). Robust control of a hip-joint rehabilitation robot. *Biomedical Signal Processing & Control*, 35: 100-109.
- Komada S, Hashimoto Y, Okuyama N, Hisada T, Hirai J. (2009) Development of a biofeedback therapeutic-exercise-supporting manipulator. *Trans Ind Electron*; 56(10): 3914–3920.
- Sakaki, T., Okada, S., and Okajima, Y. (2000) "TEM: Therapeutic exercise machine for hip and knee joints of spastic patients", *Advanced Robotics*, vol. 14, No. 7, pp. 597-606.
- Sakaki, t., (1999), TEM: therapeutic exercise machine for recovering walking functions of stroke patients, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 26 Iss 6 pp. 446 - 450
- Sun, H., Zhang, L. and Li, C., (2009). Dynamic analysis of horizontal lower limbs rehabilitative robot, *2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, Shanghai, pp. 656-660.

Improving Heat Transfer in a Liquid-Metal Duct Flow [★]

V. Solano-Olivares ^{*} S. Cuevas ^{*} A. Figueroa ^{**}

^{*} *Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, A.P. 34, Temixco, Morelos 62580, México (e-mail: vso@ier.unam.mx, scg@ier.unam.mx).*

^{**} *CONACYT-Centro de Investigación en Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos 62209, México (e-mail: alfil@uaem.mx)*

Abstract: In this work, we present a two-dimensional numerical study of the dynamics and heat transfer of a non-magnetizable liquid metal flow under a non-homogeneous magnetic field in a duct with rectangular cross section. It is found that the stirring produced by placing a permanent magnet external to the duct but near to the hot wall, can enhance the heat transfer. It is shown that heat transfer can be enhanced by increasing the Hartmann number (related with the strength of the magnetic field) in the range explored $0 \leq Ha \leq 800$ for a fixed Péclet number $Pe=53$ and Reynolds number $Re=1000$. Moreover, by calculating the global Nusselt number it is found that there exists a critical value for which an optimum heat transfer is obtained.

Keywords: Heat transfer enhancement, liquid metal MHD, localized magnetic field, stirring

1. INTRODUCTION

It has been widely studied that heat transfer can be enhanced by locating solid obstacles (e.g. fins) in the flow region, what is the base of many heat exchanger designs. In this context, magnetohydrodynamic (MHD) flows offer an alternative to the usual hydrodynamic flows in many technological applications, particularly, for cooling and heat transfer enhancement purposes. Flows of this kind are difficult to simulate numerically because the equations which describe these phenomena are strongly coupled. In some cases, a simplified two-dimensional model can reproduce with a good approximation, the main physical features of the real flow, for instance, in a high aspect-ratio duct flow where we deal with a very thin fluid layer.

It has been proved that the interaction of an electrically conducting fluid with a localized magnetic field induces a EMF (Electromotive Force) that gives rise to an induced electrical current which in turn interacts with the applied magnetic field producing an electromagnetic body force (named Lorentz force), acting in the opposite direction to the flow. This phenomenon produces an effect similar to solid obstacles but in a non-intrusive way. The effect of the force brakes the flow in the region of the magnetic field, acting as a *magnetic obstacle* [Cuevas et al. (2006), Votyakov et al. (2008)], and producing vorticity downstream. The vorticity produced in this way can be

used to enhance the heat transfer. In fact, electromagnetic interactions have been used to control the transport of heat through magnetic forces that strongly affect the flow velocity [Modestov et al. (2017)]. The possibility of heat transfer enhancement in a duct where MHD flow convection is intensified by the presence of non-uniform magnetic fields has been previously explored [Gallo et al. (2015)]. Also, numerical studies in a duct flow have shown that the cross-stream mixing originated by a row of magnetic obstacle wakes can enhance the wall-heat transfer [Zhang et al. (2015)]. There is a considerable amount of research focused on the analysis of heat transfer in MHD flows in ducts with electrically insulating walls under uniform magnetic fields. In this work instead, the attention is focused on the heat transfer occurring in MHD flows under a non-uniform, localized magnetic field in a rectangular duct with one perfectly conducting wall.

2. FORMULATION OF THE PROBLEM

In this investigation, a two-dimensional study of the flow of a viscous, incompressible, electrically conducting fluid, with constant thermophysical properties in the presence of a non-uniform magnetic field is carried out. The fluid is liquid metal Galinstan, an eutectic alloy of gallium, indium and tin (68.5% Ga, 21.5% In, 10% Sn) which is liquid at room temperature and its Prandtl number is $Pr=0.053$ [Li et al. (2017)].

[★] Financial support from CONACYT, through projects 258623 and 240785 is acknowledged.

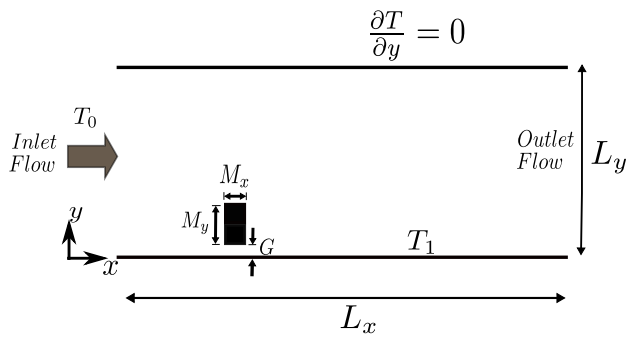


Fig. 1. Configuration of the problem.

The fluid flows through a uniform rectangular cross-section duct of dimensionless units $L_x=50$, $L_y=15$, see Fig. 1. The lower wall is set at a uniform temperature that is higher than the fluid inlet temperature. This wall, located at $x = 0$, is assumed to be of perfect electrical conductivity while the opposing wall is assumed to be electrically insulating and adiabatic. The magnetic field is produced by a rectangular permanent magnet whose geometric center is located at the $(x - y)$ coordinates (12,1.5). The separation distance between the magnet and the hot wall is $G=0.5$. The permanent magnet is placed in a non-intrusive way, externally to the duct and its magnetization axis lies in the z -direction (coming out of the sheet of paper). The side length of the magnet M_x is taken as the characteristic length of the problem L_c and therefore $M_y=2$. The constraint factor defined as $k = M_y/L_y$, and the gap ratio $h = G/M_y$ are $k = 0.13$, $h = 0.25$, respectively. For the modeling of the magnetic field distribution, analytical expressions provided by Furlani (2001) are used. Since this is a 2D study, the effect of friction produced between the upper and lower walls in z -direction in the wall-fluid interface is not included.

2.1 Governing Equations and parameters

This study is carried out by applying a formulation based on the induced magnetic field (Formulation B) to describe the fundamental MHD equations under the low magnetic Reynolds number approximation [Davison (2001)]. Equations which govern dynamics and heat transfer of a liquid metal flow under a magnetic field, are continuity equation, momentum balance, energy conservation (which considers the presence of heat sources within the fluid due to Joule and viscous dissipations), induction equation, Ampère's law and Gauss's law for the magnetic field. In dimensionless form the governing equations are, respectively,

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla P + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{N}(\mathbf{J} \times \mathbf{B}_0), \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \text{Pe}(\mathbf{u} \cdot \nabla) T = \nabla^2 T + \text{Ha}^2 \text{Pr} \text{Ec} \mathbf{J}^2 + \text{Pr} \text{Ec} \Phi, \quad (3)$$

$$\nabla^2 \mathbf{b} = (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{B}_0, \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{b} = \mathbf{J}, \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{b} = 0. \quad (6)$$

The applied magnetic field $\mathbf{B}_0$, must satisfy the magnetostatic equations, which guarantees its solenoidal and irrotational character

$$\nabla \cdot \mathbf{B}_0 = 0, \quad \nabla \times \mathbf{B}_0 = 0. \quad (7)$$

The dependent variables, that is, velocity $\mathbf{u}$, pressure P , electrical current density $\mathbf{J}$, magnetic field $\mathbf{B}$, temperature T , and induced magnetic field $\mathbf{b}$ have been normalized by U , ρU^2 , $\sigma U B_{max}$, B_{max} , T_0 and $R_m B_{max}$ respectively, where U is the entrance velocity of the flow, B_{max} is the maximum magnetic field strength of the permanent magnet and T_0 is the inlet fluid temperature, while ρ and σ are the mass density and electrical conductivity of the liquid. The term Φ stands for the viscous dissipation function [Currie (2007)]. Coordinates x - y and time t , are normalized by L_c , time t is normalized by inertial time L_c/U in the Navier-Stokes equation (2) and by diffusive time L_c^2/α , where α is the thermal diffusivity, in the heat transfer equation (3). The dimensionless control parameters of the model are: the Reynolds number $\text{Re} = UL_c/\nu$, the interaction parameter $\mathbf{N} = \sigma B_{max}^2 L_c / \rho U$ (which also can be written as $N = \text{Ha}^2 / \text{Re}$), the Hartmann number $\text{Ha} = B_{max} L_c (\sigma / \rho \nu)^{1/2}$, the Prandtl number $\text{Pr} = \nu / \alpha$, the Péclet number $\text{Pe} = UL_c / \alpha$ (which can also be written as $\text{Pe} = \text{Pr} \cdot \text{Re}$) and the Eckert number $\text{Ec} = U^2 / C \Delta T$, where ν is the kinematic viscosity.

For the heat transfer analysis, local Nusselt number is calculated along the high temperature wall, defined as

$$\text{Nu}_x(x, t) = \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_w \frac{L_y}{T_b - T_w}, \quad (8)$$

where T_w is the wall temperature and T_b is the bulk temperature of the fluid defined as

$$T_b(x, t) = \frac{\int_0^{L_y} u T dy}{\int_0^{L_y} u dy}. \quad (9)$$

Moreover, the global Nusselt number is calculated by integrating along the lower wall, that is,

$$\text{Nu} = \frac{1}{L_x} \int_0^{L_x} \overline{\text{Nu}}_x(x) dx, \quad (10)$$

where $\overline{\text{Nu}}_x(x)$ is the local Nusselt Number averaged over time.

2.2 Numerical solution.

The governing equations are solved numerically using the finite volume method to discretize the partial differential equations spatially. The Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations - Corrected (SIMPLEC) algorithm

is used to handle the pressure-velocity coupling. The Euler method is used to discretize the temporal term. Finite difference approximation is used to discretize derivatives. To calculate the convective term is utilized the upwind differencing approach since the flow is strongly convective. A staggered grid system is used because this prevents checkerboard phenomena of the computed pressure, which would occur with a regular one.

Initial and boundary conditions for the fluid variables are the following: at the duct walls, non-slip condition is applied for the velocity. At the entrance of the duct a uniform flow, $u = 1$, and temperature, $T = 0$, are imposed. At the outlet of the duct, the streamwise gradient of velocity and temperature are set to zero to satisfy fully developed conditions. The upper lateral wall has a zero normal temperature gradient at the surface (thermally insulating walls)

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad (11)$$

whereas the lower side wall (near the permanent magnet) remains at a constant temperature $T = 1$.

The upper wall is electrically insulating and the lower is perfectly conducting. Mathematically, the condition for the magnetic field at the fluid-wall interface in a thin conducting wall, according to Müller and Bühler (2001) is written as

$$\frac{\partial b}{\partial n} - \frac{1}{c}b = 0, \quad (12)$$

where c is the wall conductance ratio defined as $c = \sigma_w t_w / (\sigma L_c)$ where σ_w and σ are the electric conductivity of the wall and fluid, respectively, t_w is the thickness of the wall and L_c is the characteristic length of the flow. For a perfectly conducting wall $\sigma_w = \infty$, and this condition becomes

$$\frac{\partial b}{\partial n} = 0, \quad (13)$$

whereas for an insulating wall $\sigma_w = 0$, and condition (12) becomes $b = 0$.

A the study of mesh independence was performed through the calculation of the frequency of the vortex shedding. The simulations were computed with a uniform mesh of 712×301 nodes.

The validation of the code, written for the solution of the MHD flow and heat transfer problem, was performed by comparing obtained numerical results against published results under a localized magnetic field and against analytical solutions [Solano-Olivares (2018)].

3. NUMERICAL RESULTS

In this study, the Péclet number and interaction parameter remain fixed at $Pe=53$ and $N=10$. This means that convective heat transport is more important than

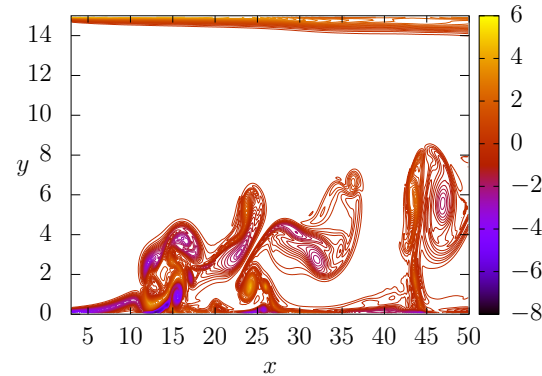


Fig. 2. Vorticity isolines for $Ha=100$, $Re=1000$.

diffusion heat transport and magnetic forces are more important than inertial forces. As it was mentioned before, the presence of the braking Lorentz force when convective transport is important, creates a flow pattern that may promote heat transfer enhancement. In this sense, it is likely that intensive stirring promoted by localized-magnetic-fields may lead to enhanced heat transfer.

3.1 Effect of a localized magnetic field in the flow dynamics

It has been shown in a variety of works that, in some aspects, a magnetic obstacle acts in a similar way as a solid obstacle but in a non-intrusive way. A localized magnetic field strongly modifies the velocity field velocity field that would otherwise remain constant without any perturbation of the flow. For a better understanding of the effect of placing a localized magnetic field near to the lower wall, vorticity (ω_z) isolines on the x - y plane at time $t=400$ are shown in Fig. 2. There are two sources of vorticity, first owing to the presence of the walls and second, due to the presence of the magnetic obstacle. The effect of the magnetic field can clearly be observed since a wake is produced downstream of the obstacle and there is vortex detachment. Given that in the region near the lower wall the flow is strongly stirred by the presence of the magnetic obstacle, it is expected that the heat transfer is intensified in this region.

3.2 Effect of the flow pattern in the heat transfer

In order to have an idea of the behavior of the heat transfer produced by this flow pattern, in Fig. 3 is shown the temperature field on the x - y plane. It can be clearly seen that heat transfer is strongly influenced by fluid flow. To quantify the effect of the heat transfer, first, the local Nusselt number (Nu_x) is calculated for the MHD case, and second, it is calculated for the case when there is absence of an external localized magnetic field (purely hydrodynamic case).

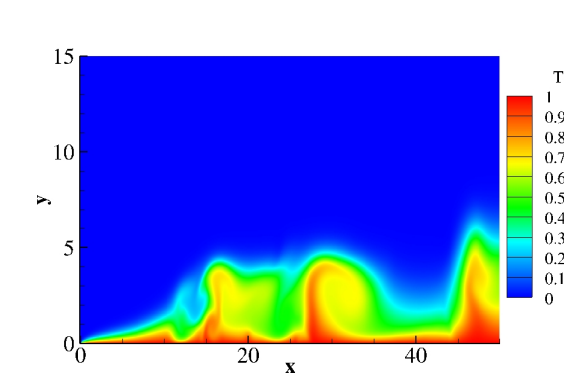


Fig. 3. Temperature field for $Pe=53$, $Ha=100$ ($N=10$).

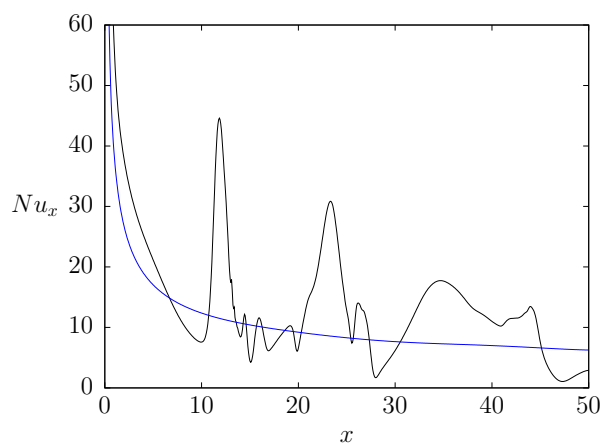


Fig. 4. Local Nusselt number along the hot wall.

In Fig. 4 Nu_x can be observed as a function of the x coordinate along the hot wall ($y = 0$) at time $t = 400$. The black line corresponds to the case with localized magnetic field and the blue line is the local Nusselt number for the purely hydrodynamic case. In the MHD case, a peculiar behavior is observed characterized by various peaks that indicate a greater heat transfer at certain locations, manifesting the influence of the flow pattern. If the local Nusselt number is compared with the temperature field shown in Fig 3, it can be appreciated that the positions where the fluid is strongly stirred in such a way that a good mixing is obtained correspond to locations where the temperature gradient in the normal direction to the wall increases. Compared with the hydrodynamic case, a higher heat transfer is obtained when the magnetic obstacle is present. However, to quantify the total heat transfer, the global Nusselt number (Nu) has to be computed.

To investigate the possibility of heat transfer enhancement, tests were performed by taking the Reynolds number constant, $Re=1000$, and varying the Hartmann number. These tests were performed in the range $0 \leq Ha \leq 800$ which corresponds to the interaction parameter range $0 < N < 640$.

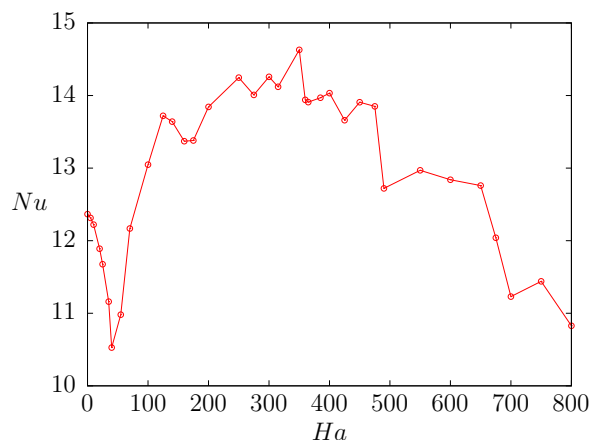


Fig. 5. Global Nusselt number as a function of Ha number.

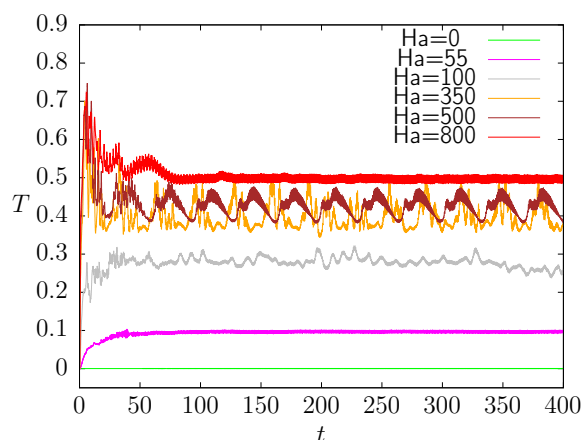


Fig. 6. Temperature as a function of time.

Results in Fig. 5 show that when the magnetic force strength is low compared with inertial forces, the magnetic obstacle does not have a positive effect on the heat transfer and the global Nusselt number decreases.

Nevertheless, when the external magnetic field strength is increased to a certain point, in such a way that $Ha > 40$ ($N > 3$), a strong increasing trend of the global Nusselt number is observed as the Hartmann number increases. When Ha increases, the magnetic effects on the flow are more pronounced, leading to the intensification of recirculations that help to improve heat transfer. There exist a critic value of Ha ($Ha=350$) for which a maximum heat transfer rate is obtained. For higher values of Ha , a decrease in the global Nusselt number is observed, which occurs because the flow is slowed down when the magnetic forces become much stronger than inertial forces as the Hartmann number continues to increase. In these conditions, the diffusion heat transfer mechanism is manifested more strongly, which allows to have a more homogenized temperature in the region near the hot wall, thereby the temperature gradients get small and

the global Nusselt number is reduced, as is observed in figure 5.

This explanation is supported by Fig. 6 where the temperature calculated at the point (12,2.5) just above the magnet, is shown as a function of time. In this figure, temperature profiles corresponding to different values of Ha , specifically $Ha=0, 55, 100, 350, 500, 800$, show that temperature rises as Ha increases. Further, it can be noticed that temperature profiles present an oscillating behavior but note that the oscillation amplitude is higher for $Ha=350$, the value at which the global Nusselt number is maximum. Therefore, we observe that the behavior of the global Nusselt number is strongly related to the oscillation of the flow due to cross-stream agitation produced by the localized magnetic field. As Ha increases, the flow starts to oscillate, increasing the oscillation amplitude until a maximum is reached at $Ha=350$ ($N=122.5$), where the stronger stirring is reached. For larger values, the oscillation amplitude decreases and the global Nusselt number also decreases.

4. CONCLUSION

We have shown that the stirring produced by the braking magnetic force created by a localized magnetic field interacting with an electrically conducting fluid is able to enhance heat transfer in a liquid metal duct flow. We found that for a fixed Reynolds and Péclet numbers, as the Hartmann was varied in the range $0 \leq Ha \leq 800$, the global Nusselt number has a non-monotonous behavior, presenting a maximum value for $Ha=350$, indicating that these conditions are optimum for heat transfer enhancement.

Results show that the use of localized magnetic fields is a non-intrusive strategy to improve heat transfer in liquid metal duct flows. This can be of relevance for several technological applications.

ACKNOWLEDGEMENTS

A. Figueroa acknowledges Cátedras CONACYT.

REFERENCES

- Cuevas, S., Smolentsev, S., and Abdou, M. A. (2006). On the flow past a magnetic obstacle. *J. Fluid Mech.*, 553, 227-252.
- Votyakov, E. V., Zienicke, E., and Kolesnikov, Y. B. (2008). Constrained flow around a magnetic obstacle. *J. Fluid Mech.*, 610, 131-156.
- Modestov, M., Kolemen, E., Fisher, A. E., and Hvasta, M. G. (2017). Electromagnetic control of heat transport within a rectangular channel filled with flowing liquid metal. *Nuclear Fusion*, 58(1), 016009.
- Gallo, M., Nemati, H., Boersma, B. J., Pecnik, R., At-trotto, P., and Colonna, P. (2015). "Magnetic-ribs" in fully developed laminar liquid-metal channel flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 56, 198-208.
- Zhang, X. D., and Huang, H. L. (2015). Heat transfer enhancement of MHD flow by a row of magnetic obstacles. *Heat Transfer Res*, 46(12), 1101-1121.
- Li, Z., Li, J., Li, X., and Ni, M. J. (2017). Free surface flow and heat transfer characteristics of liquid metal Galinstan at low flow velocity. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82, 240-248.
- Furlani, E. P. (2001). *Permanent Magnet and Electromechanical Devices*. Academic Press. California.
- Davidson, P. A. (2001). *An introduction to magnetohydrodynamics*. Cambridge.
- Currie, I. G. (2007). *Fundamental mechanics of fluids*. Marcel Dekker, Inc. Third edition.
- Müller, U., and Bühler, L. (2001). *Magnetohydrodynamics in Channels and Containers*. Springer.
- Solano-Olivares V. (2018). Estudio numérico de flujos magnetohidrodinámicos de metal líquido en ductos para el mejoramiento de la transferencia de calor. Tesis de maestría, Instituto de Energías Renovables, UNAM. (<http://oreon.dgbiblio.unam.mx>)

Caracterización de soldadura por fricción rotativa en Aluminio 6063-T4.

J. E. Escobar-Flores*.
V. M. Sauce-Rangel**.
A. Urriolagoitia-Luna*.

* Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Edificio 5 segundo piso; Del. Gustavo A. Madero; Col. Lindavista; C.P. 07738, México. (e-mail: jobesc21@gmail.com). (e-mail: alex_ul56@hotmail.com).

** Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Laboratorio de Ingeniería de Materiales, Unidad Profesional Ticomán, Calzada Ticomán 600, Del. Gustavo A. Madero; Col. San José Ticomán; C.P. 07340, México. (e-mail: saucevictor@yahoo.com.mx).

Resumen: La soldadura por fricción rotativa es un proceso de unión en estado sólido, donde la energía necesaria se genera mediante el roce continuo de dos elementos. Las aleaciones de Aluminio se consideraban como no soldables en aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales debido a las pobres propiedades mecánicas en la zona de fusión. Hasta hace unas décadas el concepto del proceso de soldadura por fricción, fue incorporado en la fabricación de componentes aeronáuticos, por medio del método experimental se comprobó que la aleación de Aluminio 6063 T4 es soldable mediante el proceso de soldadura por fricción rotativa. Se realizó la comparación de las propiedades mecánicas de una probeta soldada mediante este método, con respecto a las propiedades mecánicas establecidas en el estado del arte para esa aleación. Se complementó observando el cambio en la microestructura debido al proceso de soldadura por fricción rotativa. En las conclusiones se muestra que la aleación de Aluminio 6063 T4 es considerablemente soldable mediante el proceso de soldadura por fricción rotativa.

Palabras claves: soldadura, fricción, Aluminio, unión, probeta, roce.

1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio se consideraban como no soldables en aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales debido a las pobres propiedades mecánicas en la zona de fusión. Hasta hace unas décadas el concepto del proceso de soldadura por fricción, fue incorporado en la fabricación de componentes aeronáuticos, y hoy en día se siguen estudiando las diferentes variantes de este proceso.

La soldadura de aluminio y sus aleaciones por procesos de aporte de material presenta diversas dificultades operativas: porosidad, susceptibilidad a la fisuración en caliente, perforaciones, falta de unión con el material de aporte. Por esta razón se ha estudiado las soldaduras en estado sólido.

La soldadura por fricción es un proceso de fase total de penetración sólida, el cual puede ser implementado en la unión de componentes de metal sin llegar a su punto de fusión.

Algunas aplicaciones y patentes se remontan al siglo XII. Sin embargo, el estudio no se inició hasta 1956 después de que el científico Chudikov hubiera revivido el viejo concepto y con éxito demostró la posibilidad de obtener soldaduras de alta calidad entre varillas metálicas (J. Searle, 1971).

Desde entonces la investigación intensiva se puso en marcha por el científico Vill y otros científicos de la extinta U.S.S.R. con el fin de comprenderla, desde puntos de vista científico.

El proceso continuo en E.E.U.U. en 1960. En la American Machine Y Fundición Co., Hollander y Cheng con algunos trabajos pioneros sobre el parámetro, análisis y los aspectos térmicos de Soldadura por fricción.

En 1962, Caterpillar Tractor Company desarrolló la llamada inercia de soldadura que es una fricción modificada en proceso de soldadura, con un volante que almacena la energía necesaria para la soldadura (K.K. Wang, 1974).

Actualmente existen empresas del sector automotriz, petrolero y de maquinaria pesada, que tienen incorporado el proceso de soldadura por fricción rotativa en sus procesos de manufactura, normalmente aplicado y desarrollado para aleaciones de acero, por esta razón este trabajo se basa en caracterizar la soldadura por fricción rotativa en una aleación de aluminio disponible en el mercado.

2. PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTATIVA

El proceso de soldadura por fricción rotativa se describe en tres etapas. Figura 1.

Etapa uno, se monta una pieza 'a' en un mandril que se mantendrá girando a un determinado número de rpm, la segunda pieza 'b' se monta en un contrapunto que ejercerá una determinada presión.

Etapa dos, la velocidad de giro de la pieza 'a' se mantiene constante mientras la pieza 'b' ejerce una presión durante cierto tiempo, denominada presión de fricción, (figura 2) tal que una gran parte de la energía cinética almacenada es descargada abruptamente en la interfaz, la superficie de contacto altera las capas y provoca el ablandamiento del material sobre las superficies.

Etapa tres, la pieza 'a' se detiene, la pieza 'b' ejerce una presión tres veces mayor a la de fricción, durante cierto tiempo, esta se denomina presión de forja.

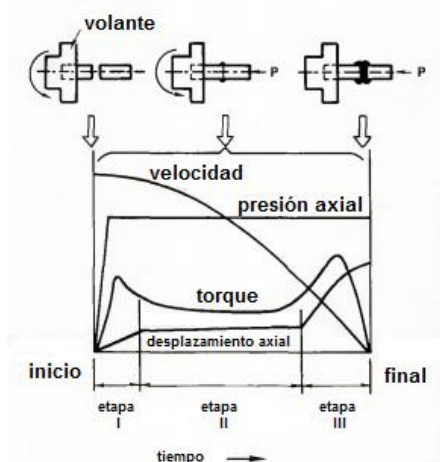


Fig. 1. Características de los parámetros del proceso de soldadura por fricción (K. K. Wang, 1982).

Durante el proceso de soldadura por fricción rotativa existen tres parámetros controlables que dictaran la calidad de la soldadura, los cuales son; la velocidad de giro, la presión y el tiempo.

2.1 Preparación de las muestras

La soldadura por fricción rotativa se realizó en un torno adaptado con un contrapunto hidráulico, se cortaron 14 piezas de barra redonda de media pulgada por 145 mm de longitud, de Aluminio 6063 T4, cuyas propiedades mecánicas se enlistan en la Tabla 1.

Las probetas se sometieron al proceso de soldadura por fricción rotativa (figura 2), con los siguientes parámetros (tabla 2), tomando como referencia los siguientes valores; presión de forja 300 psi, presión de fricción 100 psi y velocidad de giro 2800 rpm utilizados para pruebas en una aleación 6061 T6 (Angel Juárez Santiago, 2014), debido a que la velocidad del

torno está gobernada por una caja de velocidades de engranes, no es posible tener una velocidad de 2800 rpm, por lo tanto se seleccionan velocidades cercanas.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del Aluminio 6063 T4 (J.R. Davis)

Esfuerzo de cedencia (MPa)	90
Resistencia a la tensión (MPa)	170
Módulo de elasticidad (GPa)	69
Esfuerzo de ruptura (MPa)	172
% de elongación en 50mm, 1.6mm de diámetro	20

Tabla 2. Parámetros de soldadura

Probet a No.	Velocidad (rpm)	Temperatur a (°C)	Presión de fricción (psi)	Presión de forja (psi)
1	2480	166	100	400
2	1330	98	100	500
3	2480	150	200	500
4	4690	132	100	300
5	2480	160	100	350
6	2480	134	300	400
7	2480	117	60	350

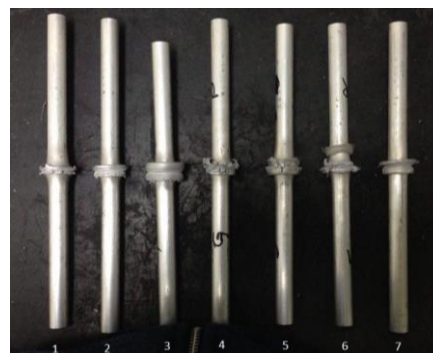


Fig. 2. Probetas soldadas mediante fricción rotativa a diferentes valores de presión y velocidad.

3. ENSAYO DE TENSIÓN

3.1 Preparación de las probetas para el ensayo de tensión

Previo al ensayo de tensión se maquinan las probetas basándose en la norma ASTM-E8. Figura 3.

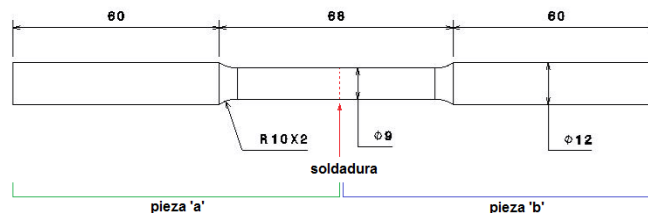


Fig. 3. Probeta normalizada (ASTM-E8, 2000)

Se toman medidas que requiere la máquina para realizar el ensayo de tensión Tabla 3.

Tabla 3. Datos para la máquina de ensayos universales.

Probeta	Diámetro de la zona de ensayo (A_0) (mm)	Longitud de la zona de ensayo (l_0) (mm)
1	8.980	50
2	8.890	50
3	8.830	50
4	8.825	50
5	8.912	50
6	9.005	50
7	8.930	50

3.2 Ensayo de tensión

Las probetas se someten a un ensayo de tensión en una máquina de ensayos universales marca Instron modelo 8502 serie c0285, la cual nos arroja datos de carga (F), periódicamente cada segundo, un extensómetro nos dará datos de alargamiento (l), de igual manera periódicamente, cada segundo.

3.3 Resultados del ensayo de tensión.

Los resultados de un solo ensayo son aplicables a todo tamaño y formas de muestras, si se convierte la carga en esfuerzo y la distancia entre marcas calibradas en deformación. El esfuerzo y la deformación de ingeniería se definen mediante las Ecuaciones 1 y 2 respectivamente (Donald R. Askeland, 1998).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2)$$

Se generó una gráfica conocida como curva esfuerzo-deformación de ingeniería (figura 4), donde se grafican los umbrales de esfuerzo y las deformaciones correspondientes a las mismas, con base en estas variables se identifican las propiedades mecánicas del material tales como el esfuerzo de cedencia, módulo de elasticidad, resistencia a la tensión, y esfuerzo a la ruptura, generando así un registro de los resultados del ensayo de tensión tabla 4.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de cada probeta

Probeta	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Esfuerzo de ruptura (MPa)	% de elongación
1	94.60	166.38	65.35	164.19	5.85
2	82.80	158.08	56.20	120.62	3.4
3	95.59	201.47	67.55	128.80	10.16
4	83.99	156.55	26.08	106.73	13.33
5	88.64	174.56	17.23	122.24	10.08
6	75.61	166.34	28.00	164.57	4.94
7	61.93	138.68	14.44	115.97	4.88

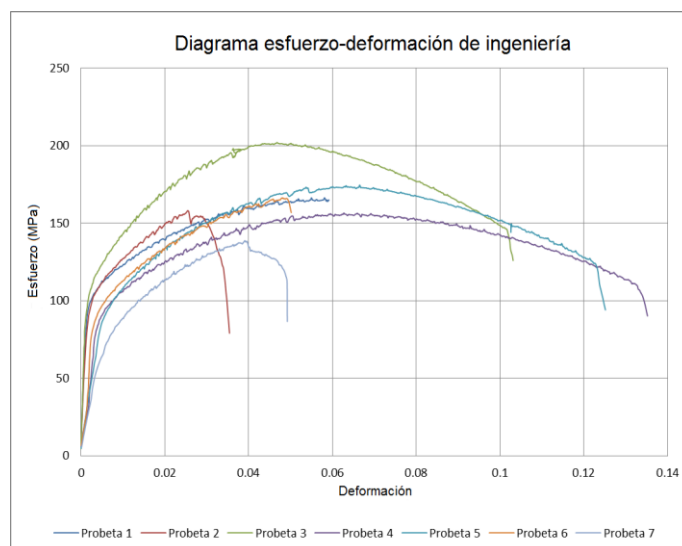


Fig. 4. Diagrama esfuerzo-deformación de ingeniería de las probetas ensayadas.

Las probetas 1, 3, 4, 5, tuvieron una fractura dúctil, alejada de la zona de soldadura, se comienza con la formación de un cuello y de cavidades dentro de la zona de estrangulamiento. Luego las cavidades se fusionan en una grieta en el centro de la muestra y se propaga hacia la superficie en dirección perpendicular a la tensión aplicada. Cuando se acerca a la superficie, la grieta cambia su dirección a 45° con respecto al eje de tensión y resulta una fractura de cono y embudo. Figura 5

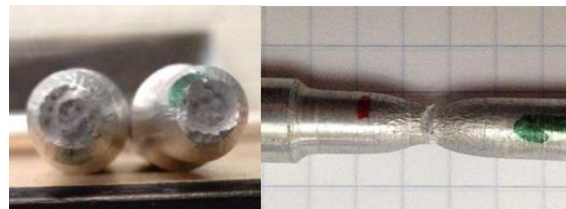


Fig. 5. Zona de fractura de la probeta número uno.

Las probetas 2, 6, y 7, no tuvieron una correcta adición entre las partes por lo tanto la fractura se produjo en el área de soldadura. Figura 6.



Fig. 6. Zona de fractura de la probeta número seis.

3.4 Comparación de resultados con la bibliografía (J.R. Davis).

A continuación se presenta el porcentaje de variación que se obtuvo en cada probeta, con respecto a la bibliografía, en los valores de esfuerzo de cedencia, resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad Tabla 5.

Tabla 5. Comparación de resultados con respecto a la bibliografía (J.R. Davis).

Probeta	% de variación Esfuerzo de cedencia	% de variación Resistencia a la tensión	% de variación Módulo de elasticidad
1	5.11	2.12	5.28
2	8	7.01	18.55
3	6.21	18.51	2.10
4	6.67	7.91	62.20
5	1.51	2.68	75.02
6	15.98	2.15	59.42
7	31.188	18.42	79.07

4. ANÁLISIS METALOGRAFICO

4.1 preparación de las probetas para el análisis metalográfico

Para realizar el análisis metalográfico, se sueldan dos probetas a las condiciones en las que mejor resultado haya obtenido, en el ensayo de tensión, los cuales son:

- Velocidad: 2480 rpm.
- Temperatura: 160°C-166°C.
- Presión de fricción: 100 psi.
- Presión de forja: 350 psi-400 psi

Se seccionan las probetas de manera longitudinal, con la cortadora de muestras metalográficas, usando un disco abrasivo y enfriando son soluble para evitar que la muestra se caliente.

Se desbastó la superficie revelada posterior al corte, se comienza con una lija de óxido de aluminio grano 150, seguido del número 250, 400, 600 y o 1000. El desbaste se realizó manualmente apoyándose sobre una superficie plana y limpia, la probeta se mueve longitudinalmente de un lado a otro, siempre en la misma dirección. Aplicándole una presión moderada.

Durante la operación se debe dejar que una corriente de agua, limpie los pequeños desprendimientos de material y a su vez lubrique y refrigere la zona desbastada.

El pulido tiene por objeto eliminar las rayas finas producidas en el desbaste final y producir una superficie con características reflejantes semejante a un espejo.

Esta operación por lo general se realiza en forma mecánica y se utiliza un paño impregnado con partículas de algún abrasivo en solución acuosa, en este caso se utilizó óxido de Aluminio.

Si con un aumento de 500x se pueden distinguir porciones lisas entre las rayas, entonces el pulido puede darse por terminado.

4.2 Revelación del grano.

Tiene por objetivo poner en evidencia, las características estructurales de la muestra.

En general aquellas regiones de la estructura donde la energía libre del sistema es mayor, como por ejemplo los límites de fases, bordes de grano, etc., son atacadas más rápidamente.

Los reactivos de ataque por lo general son ácidos orgánicos disueltos en agua, alcohol, glicerina, etc. Para el Aluminio será utilizado el reactivo de Keller; cuya composición es la siguiente: (Rodríguez).

- Agua H₂O 95ml
- Ácido nítrico NO₃ 2.5ml
- Ácido clorhídrico HCl 1.5ml
- Ácido fluorhídrico HF 1ml

Fue Sumergida la muestra de 10-20 segundos en el reactivo, lavando en agua tibia, seguido por una inmersión rápida en HNO₃ y secar con aire caliente. La muestra se manipuló en todo momento con pinzas y guantes, para que el sudor de las manos no oxide el material.

En caso de que los límites de grano no sean revelados repetir el procedimiento para el ataque durante 3-5 segundos.

4.3 Resultados.

Se obtuvo imágenes de los granos en 5 zonas, y se mide el tamaño de grano.

- Zona 1: material base de la pieza que gira. Figura 7.
- Zona 2: transición hacia la soldadura de la pieza que gira.
- Zona 3: soldadura. Figura 8.
- Zona 4: transición hacia la soldadura de la pieza que ejerce presión.
- Zona 5: material base de la pieza que ejerce presión.

Para medir el tamaño de grano se usó el procedimiento de intersección por el método de Hilliard. Ecuación 4 y 5. En base a la norma ASTM E 112 (ASTM-E112, 2000) y los resultados se presentan en la tabla 6.

$$\overline{N_L} = \frac{N_i}{L/M} \quad (4)$$

$$G = (6.643856 \log_{10} \overline{N_L}) - 3.288 \quad (5)$$

Tabla 6. Tamaño de grano en las 5 zonas

Zona	Diámetro de grano promedio muestra 1 (μm)	Diámetro de grano promedio muestra 2 (μm)	Media	Desviación estándar
1	188.1816	336.26864	262.2251	90.2980
2	24.4236	12.60952	18.5165	5.9070
3	-	6.4415	-	-
4	14.6104	25.05948	19.8349	5.2245
5	142.6048	196.192	169.3984	26.7936

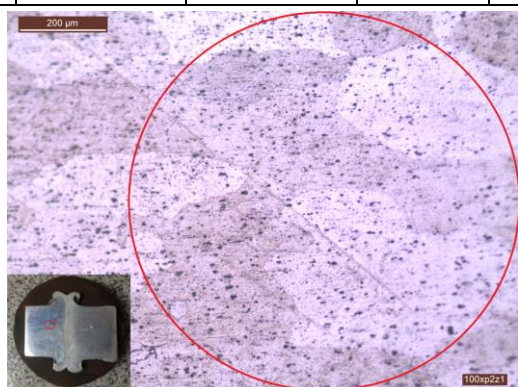


Figura 7. Microestructura de la Probeta 2 zona 1 a 100 aumentos.



Figura 8. Microestructura de la Probeta 2 zona 3 a 100 aumentos.

5. CONCLUSIONES

La aleación de Aluminio 6063 T4, se consideró soldable mediante el proceso de soldadura por fricción rotativa, puesto que en el ensayo de tensión, 4 de las 7 probetas se fracturaron en una zona alejada a la de soldadura, la soldadura defectuosa en las probetas 2, 6 y 7 se debe a los valores de presión y velocidad seleccionados.

Las probetas 1, 3, 4 y 5 tienen un porcentaje de variación relativamente muy grande con respecto a la bibliografía, probablemente esto se deba a que no se toma en consideración la reducción de área que se forma al pasar la zona lineal-elástica del aluminio, el extensómetro utilizado pudo haberse desplazado durante el ensayo, aunado a esto es probable que la máquina de ensayos universales utilizada, tenga una ligera variación.

Mediante las metalografías, se observó un refinamiento de grano en la zona de soldadura, esto ocurre por una cristalización dinámica, característica del proceso de soldadura por fricción, por esta razón la mayoría de las probetas sometidas al ensayo de tensión, se fracturaron en una zona alejada a la zona de soldadura.

REFERENCIAS

Ángel Juárez Santiago, Mauro Emmanuel Tovar Villagra. (2014). *Soldadura por fricción rotativa, rfw, de una aleación de aluminio 6061-t6*. Tesis. Página 34.

ASTM E112 (2000). *Standard Test Methods For Determining Average Grain Size*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

ASTM E8 / E8M - 16^a (2000). *Standard Test Methods For Tension Testing Of Metallic Materials*, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

Donald R. Askeland, Pradeep P. Phulé. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Página 131. Universidad de Missouri Rolla. International Thomson Editores, tercera edición.

J.R. Davis, Davis Associates. *Propiedades mecánicas del Aluminio 6063 T4*. Aluminum and Aluminum Alloys. ASM Specialty Handbook.

J. Searle. (1971). *Friction welding non-circular components using orbital motion*. *Welding & Metal Fabrication*, Vol.39, No. 8, 294–297. Página 28.

K. K. Wang, G. R. Reif, and S. K. OH (1982). In-Process Quality Detection of Friction Welds Using Acoustic Emission. Techniques. *Welding research supplement*. Pagina 313-s, 63rd A WS Annual Convention in Kansas City, Missouri.

K. K. Wang, W. Lin. (1974). Flywheel friction welding research. *Welding Journal*, 233-241. Página 236.

<http://matensayos.webcindario.com/tecnicametalografica/reactivos.pdf> *Reactivos para el Aluminio*

Control PID para un exoesqueleto de 3 gdl, para rehabilitación de personas que han sido afectadas por un accidente cerebro-vascular.

L. Vázquez-Sánchez*, A. Blanco-Ortega**, M. Adam-Medina***, A. Abúndez-Pliego****, J. Colín-Ocampo*****

Tecnológico Nacional de México-CENIDET. Morelos, C.P. 62490

México (Tel. 01(777) 362-7770)

**leviathan11910e@cenidet.edu.mx,*

***andres.blanco@cenidet.edu.mx,*

****adam@cenidet.edu.mx,*

*****arturo.abundez@cenidet.edu.mx,*

******colin@cenidet.edu.mx,*

Resumen: Este trabajo presenta un control PID para un exoesqueleto para la rehabilitación de extremidades superiores, el exoesqueleto es de 3 grados de libertad. Se muestra el prototipo que se diseñó. El comportamiento del exoesqueleto en la simulación es aceptable, a pesar de no contar con sensores para estimar fuerzas. El modelo dinámico del exoesqueleto y de los actuadores acoplados por medio del método de perturbaciones singulares, el diseño de un control basado en la suma de fuerzas generadas por el humano y el exoesqueleto, el diseño y fabricación del prototipo experimental y sus actuadores, el control fue aplicado en simulación. Se realizan la flexión-extensión del codo, la flexión-extensión del hombro y la abducción-aducción del mismo.

Palabras clave: Exoesqueleto, Robótica, modelo dinámico, Control PID

I. INTRODUCCIÓN

Los exoesqueletos mecánicos son robots acoplados a las extremidades del cuerpo humano enfocados en el incremento de su fuerza, velocidad y rendimiento principalmente (López *et al.*, 2014). Las máquinas se diseñan para cumplir con objetivos específicos en el mundo actual. Están compuestas de diversos elementos llamados mecanismos, donde modifican, transmiten, o dirigen fuerzas. Sus componentes transmiten el movimiento y la fuerza de una fuente de potencia a una salida mecánica (Gopura and Kiguchi, 2009). Con el análisis biomecánico se identifican las necesidades y requerimientos básicos de los actuadores, amplitud de movimientos, geometría y ergonomía (Ruiz O. *et al.*, 2013). El análisis cinemático es una parte fundamental para el desarrollo de alguna máquina, ya que estudia el movimiento de los cuerpos, realiza el estudio de la geometría del movimiento, lo cual implica la determinación de la posición, desplazamiento, rotación, rapidez, velocidad y aceleración de un mecanismo. Un modelo cinemático preciso de la extremidad superior debe de poder calcular y visualizar su espacio de trabajo accesible (Klopčar and Lenarčič, 2005).

Gelfand y Latash en 1998 consideran que los gdl (funcionales) es un concepto biológicamente relevante para ayudar en la búsqueda de los principios que gobiernan los movimientos humanos, sin importar que nivel del sistema de

movimiento pueda elegir para estudiar. El sistema de movimiento se presenta como datos dados, un problema dado, y la tarea del investigador consiste en la búsqueda de explicaciones no contradictorias de los mecanismos de funcionamiento de múltiples etapas. Los movimientos humanos aparecerían descoordinados y sin propósito el gdl variara independientemente. De hecho la mayoría de los movimientos se caracterizan por patrones espaciotemporales que son repetidos y estereotipados, lo que aparenta un problema del gdl (Li, 2006).

En los últimos años, se ha presentado un aumento en la investigación para el análisis y diseño de varios exoesqueletos robóticos, para varias regiones del cuerpo humano. Algunos se especializan en miembros superiores, como puede leerse en las siguientes líneas, donde se explican los motivos de cada revisión reciente encontrada:

Se realizó en (Rehmat, Zuo y Meng, 2018). una revisión sistemática del sistema robótico de extremidades superiores basado en robot de exoesqueleto, incluido el diseño de su mecanismo, las estrategias de control y el rendimiento de los ensayos clínicos. Estos exoesqueletos se han utilizado en varios estudios clínicos que midieron su efectividad utilizando diversas pruebas clínicas y no clínicas. Un ensayo clínico de robots de exoesqueleto para extremidades superiores reveló resultados positivos, ya que esta forma de terapia puede

coincidir fácilmente y, en muchos casos, producir un mejor resultado que la terapia convencional (Rehmat, Zuo and Meng, 2018).

Islam, Spiewak y Rahman, 2017, proporcionan las razones que deben resolverse para cerrar la brecha entre los prototipos de investigación y la versión comercial. Hace una breve descripción de los dispositivos existentes, sus limitaciones de hardware y problemas de control. Muestra que hay fallas significativas en el diseño del hardware y en el desarrollo del algoritmo de control de los exoesqueletos que estarán disponibles en el programa de rehabilitación (Islam, Spiewak and Rahman, 2017).

El objetivo Proietti, Crocher y Roby-Brami, 2016 es proporcionar una taxonomía de las estrategias de control disponibles actualmente para exoesqueletos para la neuro-rehabilitación, a fin de formular preguntas apropiadas para el desarrollo de estrategias de control innovadoras y mejoradas (Proietti, Crocher and Roby-Brami, 2016).

II. EXOESQUELETO DE 3 GDL

La plataforma experimental fue diseñada con el propósito de evaluar: la cinemática y dinámica del exoesqueleto robótico (exoR); generar un prototipo inicial para generar un exoesqueleto robótico de cuerpo entero para rehabilitación activa; probar algoritmos de seguimiento de trayectoria y estrategias de control. La plataforma está constituida por un sistema embebido y un mecanismo para emular la extremidad superior derecha. La Figura 1 muestra la plataforma experimental donde se pueden observar los lugares donde están colocadas las poleas que van a generar el movimiento transferido por cables de los pares de cada motor CD.



Figura 1. Plataforma experimental: mecanismo para emular una extremidad superior.

Los mecanismos de brazo y antebrazo tienen eslabones de aluminio y mHMIs (Mechanical Human-Machine Interfaces) de Nylamid. El mecanismo de la abducción-aducción puede presentar algunos problemas en su movimiento por no haber incluido, debido a la complejidad de la articulación, los movimientos de elevación- depresión, retracción-protracción (ver Figura 2) y que el exoR es un modelo básico para rehabilitación. Estos movimientos son importantes ya que se articulan con la clavícula y el húmero, formando parte de los gdl del hombro. Por lo tanto, no se pueden realizar algunos movimientos de hiperflexiones o alcanzar el máximo en los movimientos. Es importante mencionar que la viga L (ver Figura 3), es donde se realiza el mayor esfuerzo de carga: eslabones y brazo del paciente.

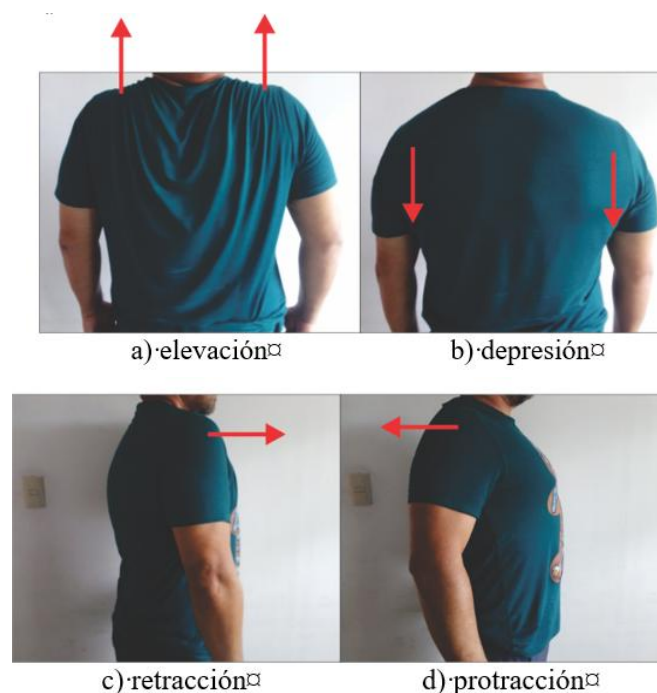


Figura 2 Diversos gdl de la articulación escapula-torácica.

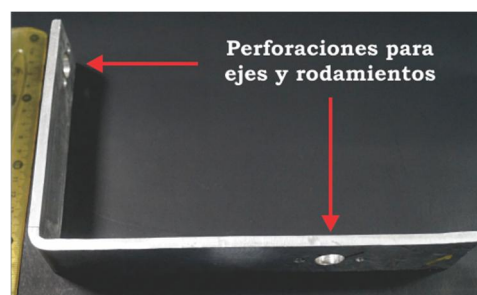


Figura 3. Viga L que realiza la carga de exoR.

En cuanto a la deformación total que se observó se puede ver en la Figura 4. El factor de seguridad que arrojo es de 1.9969, sin embargo, a la pieza Viga L se le van a anexar dos elementos adicionales que van a reducir el esfuerzo cortante y van a impedir que se pueda presentar una deformación plástica. Dichos elementos son: una polea y la fuerza va a ser transmitida por cuerdas y el factor de seguridad aumenta.

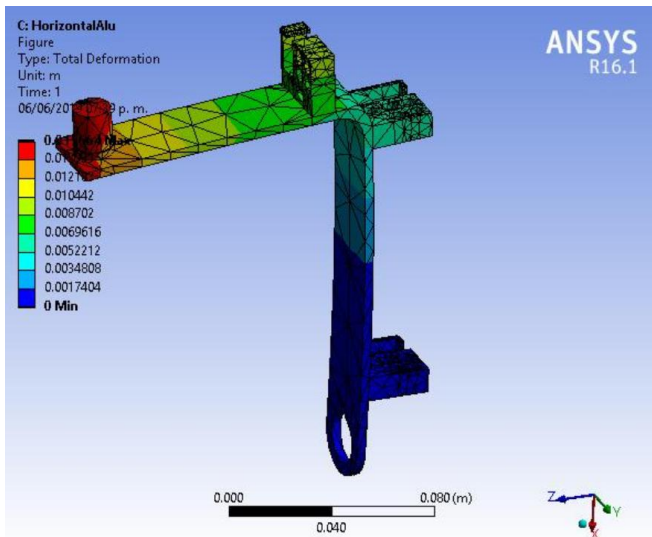


Figura 4 Estructura estática de Viga L. Máximo esfuerzo cortante.

El modelo de la Figura 5 muestra el ensamble del exoR. Se muestran dos ejes de rotación desde esta perspectiva, el del codo y el que realiza la flexión-extensión. Cuenta con rodamientos para disminuir la fricción, y debido a eso, se debe de corregir el diseño para colocarle frenos mecánicos.

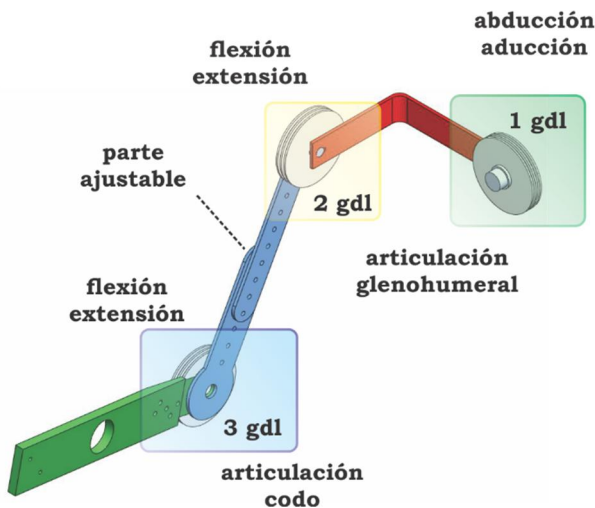


Figura 5. Brazo del exoR IPPEARM-LV01.

La parte mecánica del brazo tiene una masa de 2.01 kg y la base donde están colocados los motores es de 6 kg, lo que hace que el exoR sea ligero en comparación con otros que se investigaron. Aclarando que muchos de los que aparecen a lo largo de la tesis ya están completos o son más robustos.

III. CONTROL PID.

El modelo dinámico del exoR de 3 gdl queda de la forma siguiente:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \nabla_{11} & \nabla_{12} & \nabla_{13} \\ \nabla_{21} & \nabla_{22} & \nabla_{23} \\ \nabla_{31} & \nabla_{32} & \nabla_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 - g_1 \\ \tau_2 + g_2 \\ \tau_3 - g_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Los elementos de la familia de los controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativo (D). Estos elementos son P, I, PI, PD, PID (ver Figura 6).

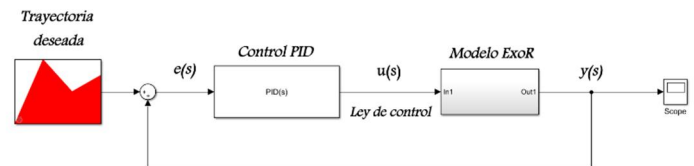


Figura 6 Diagrama a bloques del control PID

Reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales, la ecuación de un controlador con estas características combinadas se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

Donde la función de transferencia del control está definida por la ecuación:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3)$$

IV. RESULTADOS DE SIMULACION

El modelo de control se implementó en el prototipo virtual bajo el ambiente de Matlab-Simulink (ver Figura 7).

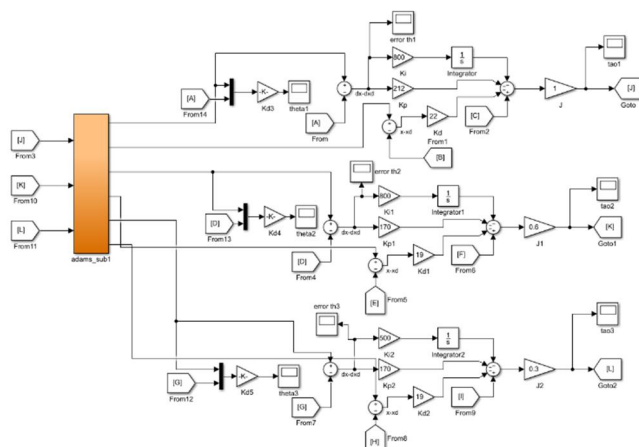


Figura 7 Modelo PID para 3 gdl del ExoR.

A continuación se muestran los resultados del ExoR para 3 gdl, al cual se le aplicó una ley de control PID, los resultados son gráficos, y se muestran las torques para realizar el movimiento deseado.

Con la aplicación del gdl para aducción (ver Figura 8) se puede verificar cual es el torque máximo que se requiere para realizar el movimiento completo; y ver el comportamiento que tiene el ExoR en sus diferentes componentes; se puede ver en a y b que el torque inicialmente tiene un sobretiro, pero es para contrarrestar el movimiento inercial del diseño de la geometría del ExoR, ya que se inicia el movimiento del brazo con un torque en cero. En c, se observa al propio ExoR la realización de movimiento cuando llega a la posición deseada.

En el movimiento de flexión del brazo, a diferencia de la aducción, se ve como los tres torques requieren una cantidad de fuerza necesaria para mantener el brazo del ExoR lo más recto posible, y se puede apreciar que el torque τ_2 es mayor, ya que es el movimiento principal.

Para la flexión del hombro (ver Figura 9), se puede observar el trabajo que realizan los tres torques (τ_1 , τ_2 y τ_3), que a diferencia de la aducción si actúan simultáneamente para mantener todo el brazo alineado, lo cual indica que si el control si es eficiente para mantener el movimiento deseado y así llegar al ángulo propuesto.

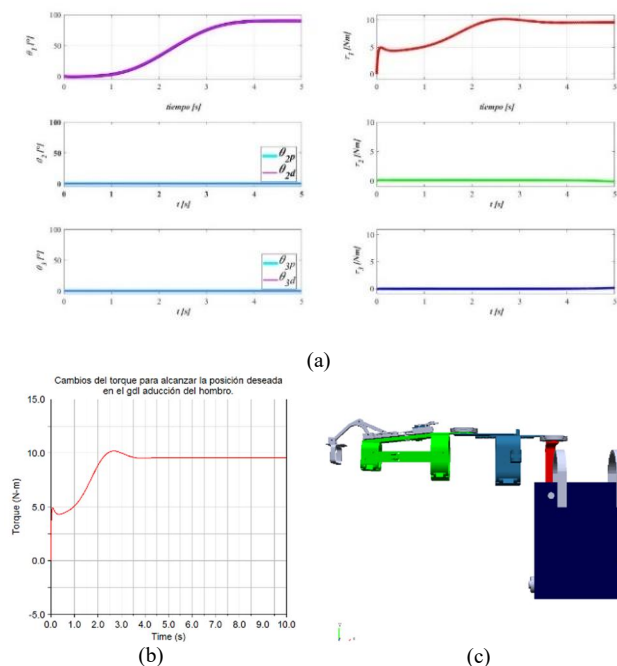


Figura 8 Aducción del ExoR de la articulación del hombro con un ángulo de 90° .

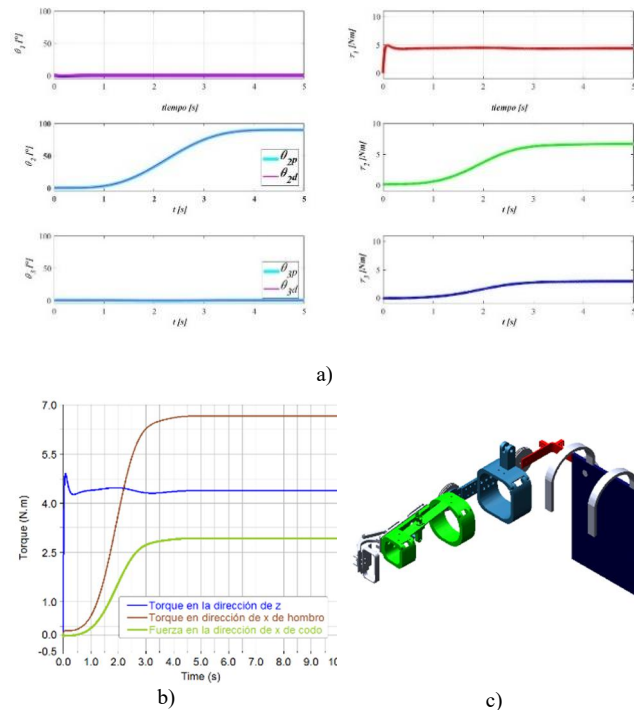


Figura 9. Flexión del ExoR de la articulación del hombro con un ángulo de 90° .

Así como la flexión del hombro el instante inicial para la flexión del codo (ver Figura 10), el torque τ_1 inicia para poder mantener la vertical debido a los momentos de inercia iniciales, esto debido a que solo se tiene el ExoR, ya que, si se encontrara el tronco del paciente, este obstruiría el deslizamiento inicial contrario a la posición estable, este movimiento corregido es por la masa y la geometría de la articulación del hombro.

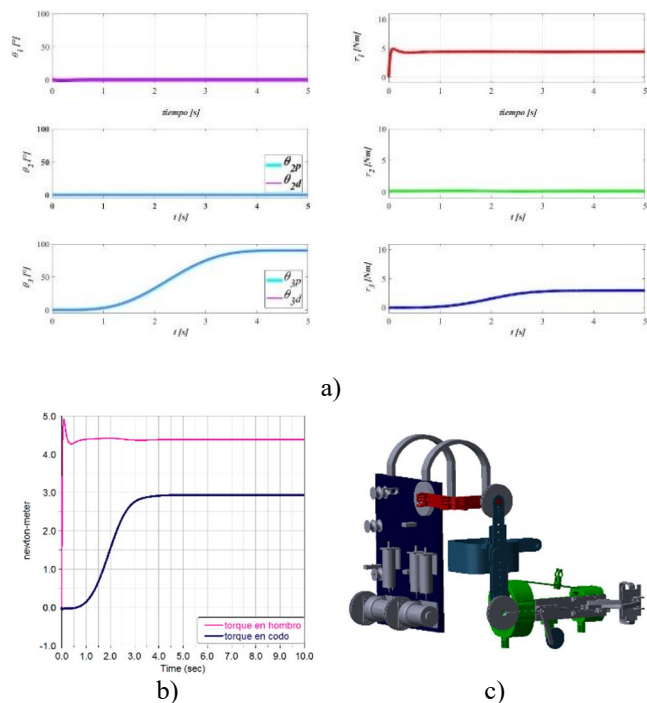


Figura 10 Flexión codo del ExoR de la articulación del antebrazo con un ángulo de 90°.

Al realizarse la flexión del hombro y la flexión del codo (ver Figura 11) la fuerza aplicada para realizar el movimiento del hombro tiene un comportamiento diferente al llegar a la flexión de los 90°, ya que es una de las posiciones donde el actuador vuelve a cero y no existe un gasto energético adicional para mantener la posición deseada.

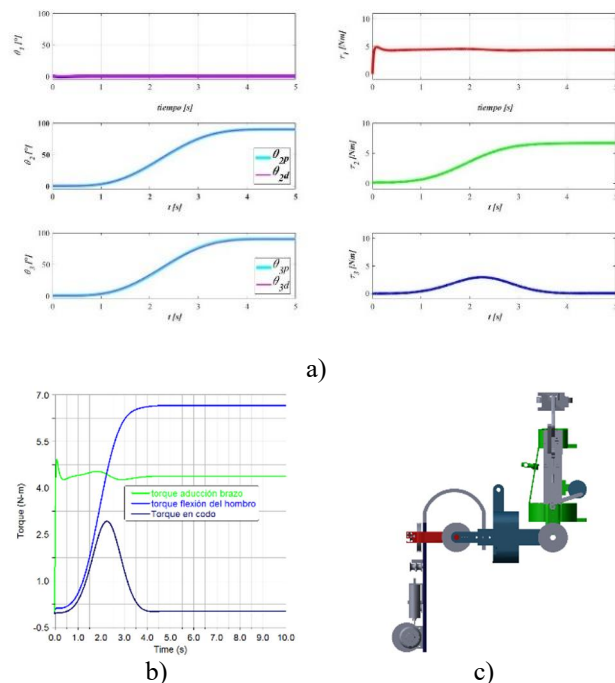


Figura 11 Flexión hombro más flexión codo del ExoR con un ángulo de 90°.

IV. CONCLUSIONES

La importancia de ayudar a las necesidades de una persona en la rehabilitación mantiene, estudio y desarrollo de nuevos exoesqueletos en las líneas de investigación. Se debe de avanzar en prototipos que puedan ser accesibles y portables para que cualquier persona tenga acceso a ellos. Por su parte, se deben de aplicar leyes de control que optimicen estos dispositivos.

Este trabajo amplía la imagen de que los exoesqueletos deben de poseer demasiados sensores para que sean correctamente actuados. Sin embargo, para movimientos básicos en la rehabilitación no se requieren demasiados, sino que el control sea lo más óptimo posible para así sea disminuido el costo. Utilizando 3 gdl se permite una rehabilitación básica, pero necesaria para que la persona restablezca en lo posible el funcionamiento corporal. El prototipo se usa de manera pasiva, y está pensado para que el usuario ejercite el brazo y evitar el uso de fuerza, que es considerada una perturbación.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

Gopura, R. A. R. C. and Kiguchi, K. (2009) 'Mechanical Designs of Active Upper-Limb Exoskeleton Robots', in

- IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics*. Kyoto, JP, pp. 178–187. doi: 10.1109/ICORR.2009.5209630.
- Islam, M. R., Spiewak, C. and Rahman, M. H. (2017) ‘A Brief Review on Robotic Exoskeletons for Upper Extremity Rehabilitation to Find the Gap between Research Porotype and Commercial Type’, *Advances in Robotics & Automation*, 06(03). doi: 10.4172/2168-9695.1000177.
- Klopčar, N. and Lenarčič, J. (2005) ‘Kinematic model for determination of human arm reachable workspace’, *Meccanica*, 40(2), pp. 203–219. doi: 10.1007/s11012-005-3067-0.
- Li, Z.-M. (2006) ‘Functional degrees of freedom.’, *Motor control*, 10(4), pp. 301-310 DOI: 10.1123/mcj.10.4.301. doi: 10.1123/mcj.10.4.301.
- López, R. *et al.* (2014) ‘Modelado y control de un exoesqueleto para la rehabilitación de extremidad inferior con dos grados de libertad’, *Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*. Elsevier Srl, 11(3), pp. 304-314 DOI:10.1016/j.riai.2014.02.008. doi: 10.1016/j.riai.2014.02.008.
- Proietti, T., Crocher, V. and Roby-Brami, A. (2016) ‘Upper-limb robotic exoskeletons for neurorehabilitation: A review on control strategies’, *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 9, pp. 4–14. doi: 10.1109/RBME.2016.2552201.
- Rehmat, N., Zuo, J. and Meng, W. (2018) ‘Upper limb rehabilitation using robotic exoskeleton systems: a systematic review’, *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. Springer Singapore, 2(3), pp. 283–295. doi: 10.1007/s41315-018-0064-8.
- Ruiz O., A. F. *et al.* (2013) ‘Especificaciones de diseño de un exoesqueleto robótico de miembro superior para ser usado en la neurorehabilitación’, in *Pan American Health Care Exchanges*, p. 6257 DOI:10.1109/PAHCE.2013.6568256. doi: 10.1109/PAHCE.2013.6568256.

Análisis de la eficiencia térmica de un concentrador cilindro parabólico utilizando Agua y nanofluido (H_2O/Al_2O_3) como fluidos de trabajo

Jean-Fulbert Ituna-Yudonago*. Y.R. Galindo-Luna**
O. García-Valladares*. R. Best*. V.H. Gómez*

*Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM). Priv. Xochicalco s/n, Col. Centro Temixco, Morelos. CP 62580. México. (Tel:7773620090; e-mail: jfiy@ier.unam.mx, ygalu@ier.unam.mx, ogv@ier.unam.mx, rbb@ier.unam.mx, vhge@ier.unam.mx)

Resumen: En el presente trabajo se analiza la eficiencia térmica de un concentrador cilindro parabólico utilizando nanopartículas (Al_2O_3) en agua con una fracción volumétrica de 0.5, 1, 3 y 5%. La adición de nanopartículas incrementa las propiedades termofísicas del fluido base, mejorando la transferencia de calor entre el tubo receptor y el fluido de trabajo. La validación de los datos experimentales mostró un error máximo de 1.58% con respecto a los datos simulados. Mientras que los resultados del análisis a diferentes fracciones volumétricas de Al_2O_3 muestran un incremento en la eficiencia térmica de hasta 12.14% cuando la fracción volumétrica de Al_2O_3 es del 5%.

Keywords: Concentrador Cilindro Parabólico, Eficiencia térmica, Agua, Nanofluido, Análisis numérico

1. INTRODUCCIÓN

Derivado del crecimiento económico a nivel mundial, la demanda energética experimentara un incremento significativo y se prevé que alcance un 60% para el año 2030 (Pirasteh et al. 2014). Las fuentes energía renovables como la geotérmica, eólica, biomasa y la energía solar presentan soluciones interesantes para hacer frente a estos retos (Kumar and Kumar 2018). Sin embargo, la energía solar es considerada con mayor potencial debido a su disponibilidad. Diversos colectores han sido diseñados, construidos y probados experimentalmente operando a diferentes rangos de temperatura. Los Concentradores Cilindro Parabólicos (CCP) ofrecen alta eficiencia, versatilidad y modularidad como ventajas, además de que algunos de sus componentes pueden ser fabricados localmente (Hafez et al. 2018).

En recientes años, varios autores han reportado la aplicación de los CCP para calor de procesos industriales. El Ghazzani et al. (2017) realizó una simulación utilizando TRNSYS® con el objetivo de conocer el rendimiento de una planta de concentradores cilindro parabólicos comerciales de $28.8m^2$, la cual suministra agua caliente a un proceso industrial existente. Los resultados muestran que el arreglo de concentradores es capaz de alcanzar una temperatura de $290^\circ C$. Marrakchi et al. (2018) analizaron la distribución de temperaturas por efecto del flujo de calor en un CCP utilizando COMSOL multiphysics®. El tubo absorbedor posee las siguientes características: 1m de longitud, diámetro interno y externo $0.0275m$ y $0.03m$ respectivamente. De acuerdo con los resultados la temperatura aumenta de $25^\circ C$ a $45^\circ C$ durante el día, considerando un flujo de calor de $1000W/m^2$, utilizando el modelo RNG k- ϵ .

1.1 Nanofluidos

Los fluidos convencionales usados en el tubo receptor del CCP son aceite sintético térmico, aire a presión, incluso sal fundida, sin embargo, su conductividad térmica es relativamente baja por lo que no es posible alcanzar un alto rendimiento térmico (Kumaresan et al. 2017). Un método efectivo para lograr vencer ese límite es el uso de partículas tamaño nano (1-100nm) suspendidas en el fluido de trabajo con la finalidad de mejorar su conductividad térmica. Los nanofluidos comúnmente utilizados en estas aplicaciones, contienen las siguientes nanopartículas: Al_2O_3 , ZnO, Cu, Au, TiO_2 , Al, Fe_2O_3 , CuO y SiO_2 (Hassani et al. 2015, Bellos et al. 2016). Akbari and Behzadmehr (2006) analizaron la transferencia de calor por convección mixta de un sistema H_2O/Al_2O_3 en un tubo horizontal manteniendo un flujo de calor constante. Sus resultados demuestran que el coeficiente de transferencia de calor por convección aumenta de 9% a 15% utilizando nanopartículas de Al_2O_3 en volumen de 2% y 4%, respectivamente. Bretado de los Rios et al. (2018) evaluó la eficiencia térmica de un CCP comercial con un área total de $3.7m^2$, utilizando una mezcla H_2O/Al_2O_3 con una fracción volumétrica de 1 y 3% y variando el ángulo de incidencia. Sus resultados muestran que la eficiencia máxima alcanzada fue de 52.4% en ángulos de incidencia de 20 a 30° y fracción volumétrica del 3%, mientras que para un ángulo de incidencia de 10° y una fracción volumétrica de 1% la eficiencia incremento 11.2% en comparación con el agua como fluido de trabajo.

Este trabajo presenta el análisis de la eficiencia térmica de un prototipo CCP, utilizando la mezcla H_2O/Al_2O_3 , desarrollada en el software CFD ANSYS FLUENT 19.0. Primero se realizó la validación de la eficiencia térmica experimental y después se analizó la eficiencia térmica utilizando mezclas de 0.5, 1, 3 y 5%

fracción volumétrica de agua/alunima. Finalmente, condiciones óptimas fueron consideradas para predecir el comportamiento de la eficiencia térmica y conocer el potencial de la tecnología solar al utilizar una mezcla de agua/alumina como fluido de trabajo.

2. DESCRIPCION DEL SISTEMA

2.1 Concentrador Cilindro Parabólico

Los CCP son colectores provistos de reflectores concentradores que enfocan la radiación solar directa recibida en el plano de apertura a través de una línea focal (Fig. 1). Un líquido fluye a través del tubo absorbedor instalado en la línea focal y absorbe la energía concentrada de las paredes del tubo aumentando así su entalpía.

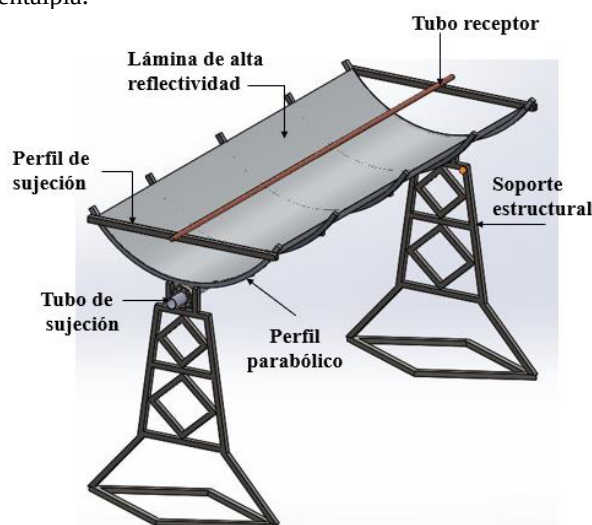


Fig. 1. Elementos del concentrador cilindro parabólico.

La superficie reflectora es una lámina de aluminio de la marca Alanod® con un área total de 2.61 m², el tubo receptor es de cobre recubierto por solkote® como superficie selectiva y orientación Norte-Sur. El concentrador cuenta con un sistema de seguimiento solar de un eje para garantizar que el haz solar llegue paralelo a su eje. Las dimensiones del colector se encuentran listadas en la tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones del CCP

Parámetro	Valor
L (m)	2.44
A (m)	1.05
Aa (m ²)	2.56
De (m)	0.0254
Di (m)	0.0190
θ (°)	90
Lf (m)	0.26

El CCP se encuentra en las instalaciones del Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM), en Temixco, México a 99°14.07' Oeste y 18°50.36' Norte, con una altitud de 1219m sobre el nivel del mar. El prototipo fue evaluado de acuerdo a la norma ISO 9806:2017 (Fig.2), bajo las siguientes condiciones: flujo másico constante de 0.0525 kg/s y temperaturas de entrada de 30°C, 47°C, 67°C y 80°C, la Gb durante el periodo de evaluación varió en un rango de 831.78 a 901.86 W/m² y temperatura ambiente promedio de 29.44°C.



Fig. 2. Concentrador cilindro parabólico.

Las ecuaciones utilizadas fueron las siguientes (Galindo et al. 2018):

$$Qu = mC_p\Delta T \quad (1)$$

$$\eta = \frac{Qu}{Gb * Aa} \quad (2)$$

Las ecuaciones para calcular los errores relativos y la desviación estándar son:

$$error(\%) = \frac{100}{n} * \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(T_{Exp,i} - T_{num,i})^2}{T_{Exp,i}} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (T_{Exp,i} - T_{num,i})^2}{n}} \quad (4)$$

3. MODELADO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA

El análisis numérico se encuentra basado en el comportamiento de los fluidos de trabajo dentro del tubo absorbedor, por tanto, el dominio computacional considerado en este estudio es el volumen del fluido dentro del tubo absorbedor. Debido a que las condiciones de contorno son conocidas experimentalmente.

3.1 Modelo matemático

La transferencia de calor es descrita por las ecuaciones de Navier-Stokes para momento, masa y energía son las siguientes:

Ecuación de conservación de masa

$$\nabla(\rho v) = 0 \quad (5)$$

Ecuación de la conservación de momento

$$\nabla \cdot (\rho v v) = \nabla(\mu \nabla v) - \nabla P + \rho g \quad (6)$$

Ecuación de la conservación de la energía

$$\nabla \cdot (\rho v T) = \nabla \left(\frac{\lambda}{C_p} \nabla T \right) + \Psi \quad (7)$$

El efecto de la turbulencia en el flujo se implementó a través del modelo de realización k-ε, que es un modelo semiempírico basado en ecuaciones de transporte para el TKE y la tasa de disipación turbulenta (TRD). El cual es adecuado para el análisis de flujos turbulentos.

Energía cinética turbulenta

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k v_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (8)$$

Velocidad de disipación turbulenta

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon v_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \right) \\ &+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} P_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (9)$$

En las ecuaciones 4 y 5, x_j es el sistema de coordenadas 3D, P_k representa la generación de TKE debido a los gradientes de velocidad promedio; P_b es la generación de TKE debido a la flotabilidad; Y_M es la dilatación fluctuante en turbulencia compresible y S_k , S_ε son definiciones raíz. Los coeficientes se incluyen en este modelo y se pueden definir como se muestra a continuación:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44; C_2 = 1.9; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.2 \quad (10)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (11)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad (12)$$

$$\text{Dónde } S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (13)$$

En la viscosidad turbulenta se tiene:

$$\mu_t = \rho \mu_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (14)$$

$$C_t = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}} \quad (15)$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (16)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (17)$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (18)$$

Dónde $\bar{\Omega}_{ij}$ es el tensor de la velocidad del centro de rotación en una zona giratoria con velocidad angular ω_k . Posee constantes A_0 y A_s que se describen como sigue:

$$A_0 = 4.04 \quad (19)$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (20)$$

$$\text{Dónde } \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W) \quad (21)$$

$$W = \frac{S_{ij} S_{ik} S_{ki}}{\tilde{S}^3} \quad (22)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}} \quad (23)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (24)$$

3.2 Condiciones de frontera

En la tabla 2 se presentan las condiciones que fueron analizadas en este estudio.

Tabla 2. Condiciones de frontera

Localización	Parámetro	Temperatura (K)			
		303.15	320.15	340.15	353.15
1	ν (kg/min)	3.17	3.12	3.13	3.11
	k (m ² /s ²)	1.55E-04	1.55E-04	1.55E-04	1.55E-04
	ε (m ² /s ³)	2.38E-04	2.38E-04	2.38E-04	2.38E-04
2	P_{man} (kPa)	50	50	50	50
3	q (W/m ²)	11222.21	8467.89	3939.46	3023.40

*1: Entrada del tubo absorbedor, 2: Salida del tubo absorbedor y 3: Pared.

3.3 Modelado geométrico y análisis de independencia de malla

El modelo geométrico del absorbedor fue dibujado en 3D usando DesignModeler (Fig. 3a) de la plataforma ANSYS Workbench. El dominio computacional fue mallado en ANSYS Meshing, usando un modo de mallado hexaédrico estructurado (Fig. 3b). La ortogonalidad promedio fue de 0.99025 por lo que se considera de buena calidad.

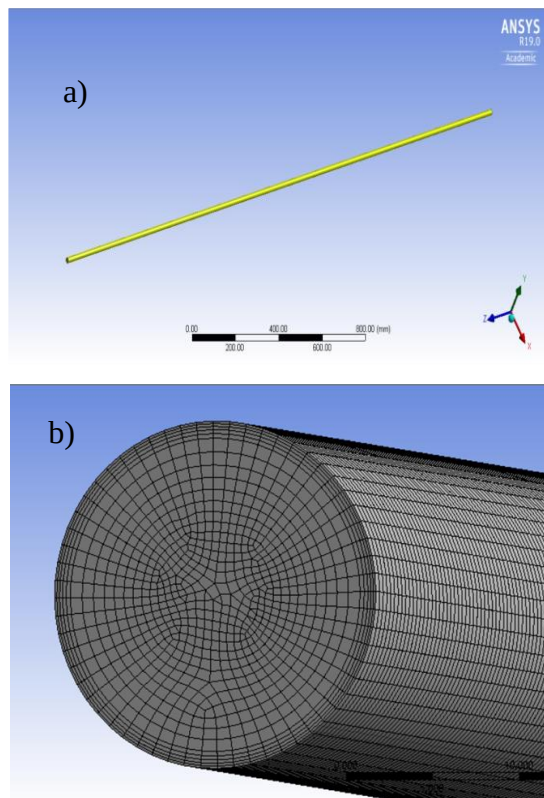


Fig. 3. a) Modelo geométrico y b) Dominio computacional mallado.

Se verificó la independencia de malla de los resultados analizando siete tamaños de malla en un rango de entre 0.5 y 3 millones de elementos. La tasa de transferencia de calor total fue elegida como el parámetro principal en función del cual este análisis se realizó, ya que refleja el comportamiento general de la temperatura dentro del tubo absorbedor.

Los resultados se muestran en la Figura 4, donde la transferencia de calor total y el perfil de velocidad ya no está influenciado por el tamaño de la malla cuando posee entre 2 y 3 millones de elementos. Por tal motivo se decidió utilizar una malla de 2.5 millones.

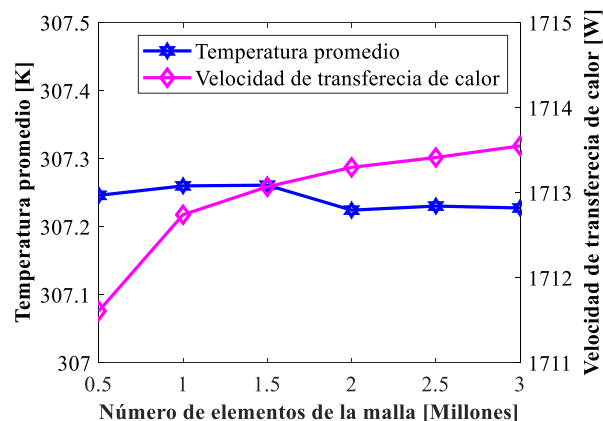


Fig. 4. Independencia de malla.

3.4 Procedimiento de simulación

La simulación numérica fue desarrollada usando el software CFD ANSYS FLUENT 19.0. Debido al régimen de flujo transitorio ($Reynolds=5.33 \times 10^3$), el modelo de turbulencia k- ϵ realizable fue utilizado para la simulación de la energía cinética turbulenta, ya que es el modelo adecuado para la simulación de flujo de fluidos mezclados con nanopartículas y, sobre todo cuando el régimen de flujo es transitorio (Ghasemi et al. 2017). La simulación se llevó a cabo en estado estacionario con propiedades termofísicas de ambos fluidos dependientes de la temperatura. Los polinomios de cada propiedad fueron programados en lenguaje C++ y ligados con ANSYS FLUENT mediante funciones definidas por el usuario (User Defined Function, en inglés).

El algoritmo simple fue usado para el acoplamiento de la velocidad y presión, el esquema Upwind de primer orden fue usado para discretización de los términos convectivos en la ecuación de momento, energía y turbulencia. La inicialización de la simulación fue llevada a cabo en base de las condiciones de frontera a la entrada del tubo absorbedor. El tiempo de simulación fue de aproximadamente 5 horas para cada caso, utilizando procesadores de 64 bits (Intel® Xenon®) CPU E5-2620 v4@ 2.10GHz, núcleos: 16, ram instalado: 32.0 GB.

4. RESULTADOS

Los resultados numéricos fueron validados con los resultados experimentales, como se muestra en la Fig. 5. Esta validación fue hecha para 4 condiciones de temperatura: 30, 47, 67 y 80°C. Se observa que los resultados numéricos se acercan a los experimentales con un error mínimo de 0.13% y máximo de 0.46%, lo que corresponde a una desviación estándar mínima de 0.08 y máxima de 0.29, evaluados por medio de las ecuaciones 3 y 4.

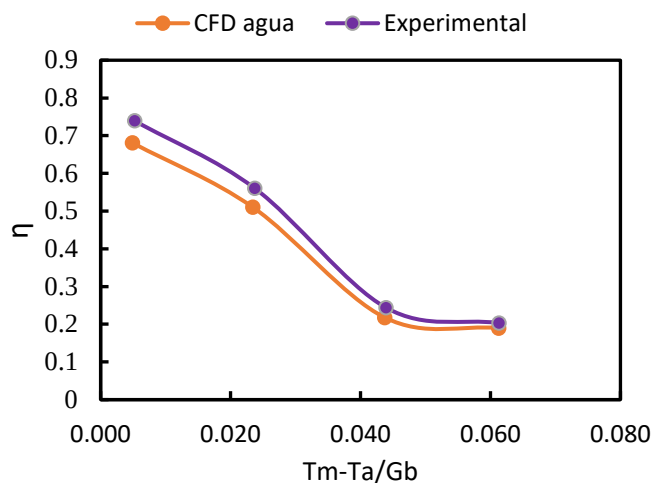


Fig. 5. Validación de la eficiencia térmica con agua como fluido de trabajo.

La Fig. 6 muestra el análisis de la eficiencia térmica bajo condiciones de frontera presentadas en la Tabla 2. En esta se puede apreciar el aumento de eficiencia a medida que aumenta la fracción volumétrica de la alumina en el agua. En relación con $\phi=0\%$ (agua) y $\phi=5\%$ de Al_2O_3 la eficiencia incrementa un 12.14%, mientras que para $\phi=0.5\%$ de Al_2O_3 con respecto al agua, se obtiene un aumento del 2.94%. En promedio al utilizar nanofluidos la η térmica es capaz de lograr un aumento de 6.78%.

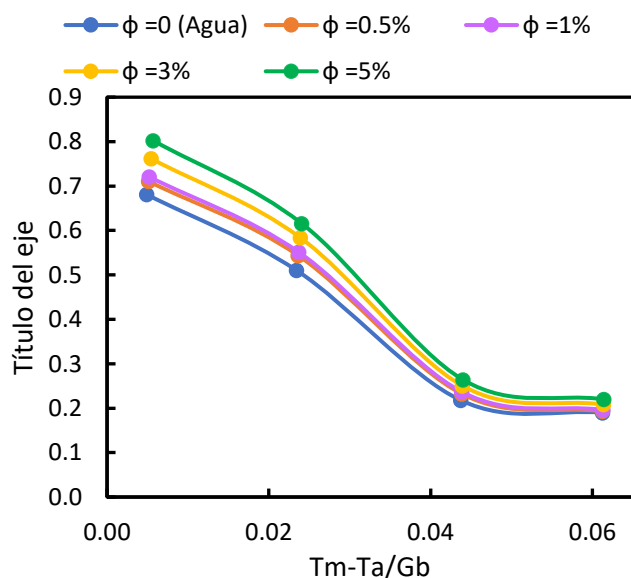


Fig. 6. Comparación de las eficiencias térmicas a diferentes fracciones volumétricas de Al_2O_3 y H_2O .

Finalmente, el análisis numérico de la eficiencia térmica bajo condiciones óptimas, es decir, considerando $G_b=1000\text{W/m}^2$, $v=3.11\text{ kg/min}$ y $q=11769.77\text{ W/m}^2$ fue realizado con la finalidad

de observar el comportamiento que la eficiencia térmica es capaz de alcanzar al usar alumina como nanofluidos y el potencial que posee la tecnología solar si es ubicada en una zona con valores de G_b alrededor de 1000 W/m^2 . La Fig. 7 muestra que la eficiencia aumenta a medida que la fracción volumétrica del Al_2O_3 incrementa también. En relación con $\phi=0\%$ (agua) y $\phi=5\%$ de Al_2O_3 , se observa que el incremento es del 11.26%.

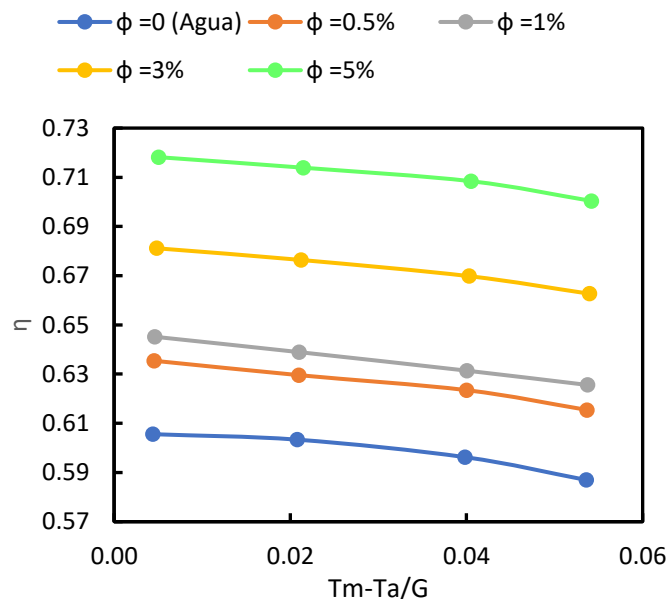


Fig. 7. Eficiencia térmica del CCP a diferentes fracciones volumétricas de Al_2O_3 y H_2O .

5. CONCLUSIONES

La eficiencia térmica del CCP fue analizada mediante el software CFD ANSYS FLUENT. La validación de los resultados experimentales con respecto a los simulados, mostraron un error máximo del 1.58%.

El análisis de la eficiencia térmica para 4 condiciones de fracción volumétrica de Al_2O_3 fueron realizadas bajo condiciones establecidas en la tabla 2. El aumento máximo de la η térmica fue de 12.14%, alcanzada con $\phi=5\%$ de Al_2O_3 .

Se realizó la simulación para las mismas condiciones de fracción volumétricas de Al_2O_3 considerando las condiciones óptimas de G_b , v y q , el aumento promedio fue de 6.44%.

NOMENCLATURA

A	Ancho (m)
Aa	Área (m ²)
D	Diámetro (m)
Gb	Irradiancia directa (W/m ²)
L	Longitud (m)
P	Presión (kPa)
q	Flujo de calor (W/m ²)
Qt	Calor transferido (W)
T	Temperatura (K)
v	Velocidad (kg/s)

Símbolos griegos

ε	Velocidad de disipación turbulenta (m ² /s ³)
θ	Ángulo de incidencia (°)
k	Energía cinética turbulenta (m ² /s ²)
ϕ	Fracción volumétrica (%)

Subíndices

amb	Ambiente
e	Exterior
f	Focal
i	Interior
in	Entrada
man	Manométrica
out	Salida

REFERENCIAS

- Akbari, M., Behzadmehr, A. (2006). Developing mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube with uniform heat flux. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 6(17), 566-586.
- Bellos, E., Tzivanidis, C., Antonopoulos, K.A., Gkinis, G. (2016). Thermal enhancement of solar parabolic trough collectors by using nanofluids and converging-diverging absorber tube. *Renewable Energy*. 94, 213-222.
- Bretado de los Rios, M.S., Rivera-Solorio, C.I., García-Cuellar A.J. (2018). Thermal Performance of a parabolic trough linear collector using Al₂O₃/H₂O nanofluids. *Renewable Energy*. 122, 665-673.
- El Ghazzani, B., Martinez Plaza, D., Ait El Cadi, R., Ihlal, A., Abnay, B., Bouabid, K. (2017). Thermal plant base don parabolci trough collectors for industrial process heat generation in Morocco. *Renewable Energy*. 113, 1261-1275.
- Galindo Luna, Y.R., Rivera Gómez Franco, W., Dehesa Carrasco, U., Romero Domínguez, R., Jiménez García, J.C. (2018). Integration of the experimental results of a parabolic trough collector (PTC) solar plant to an absorption air-conditioning system. *Applied Sciences*. 8,2163.

- Ghasemi, S.E., Ranjbar, A.A. (2017). Effect of using nanofluids on efficiency of parabolic trough collectors in solar thermal electric power plants. *International Journal of Hydrogen Energy*. 42, 21626-21634.
- Hafez, A.Z., Attia, A.M., Eltwab, H.S., ElKousy A.O., Afifi, A.A., Abdelhamid A.G., Abdelqader A.N., Fateen S-E. K., El-Metwally K.A., Soliman A., Ismail I.M. (2018). Design analysis of solar parabolic trough thermal collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82, 1215-1260.
- Hassani, S., Saidur, R., Mekhilef, S., Hepbasli, A. (2015). A new correlation for predicting the thermal conductivity of nanofluids; using dimensional analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 90, 121-130.
- Kumar, D., Kumar, S. (2018). Thermal performance of the solar parabolic trough collector at different flow rates: and experimental study. *International Journal of Ambient Energy*. 39(1), 93-102.
- Kumaresan, G., Sudhakar, P., Santosh, R., Velraj, R. (2017). Experimental and numerical studies of thermal performance enhancement in the receiver part of solar parabolic trough collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 77, 1363-1374.
- Marrakchi, S., Leemrani, Z., Asselman, H., Aoukili, A., Asselman, A. (2018). Temperature distribution analysis of parabolic trough solar collector using CFD. *Procedia Manufacturing*. 22, 773-779.
- Pirasteh, G., Saidur, R., Rahman, S.M.A., Rahim N.A. (2014). A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 133-148.

Análisis estructural del álabe de una turbina eólica horizontal de baja potencia.

Pedro.Arcos^{1,a}. Horacio.Leon^{1,b}
Miguel.Terreros^{1,c}

Universidad politécnica del valle de México.

División de ingeniería industrial.

pedro.arcoshernandez@hotmail.com, edhleon2001@hotmail.com, ing.miguel.perez.upvm@gmail.com.

Resumen:

Las condiciones climáticas actuales en zonas locales de alto riesgo, con escasez de electricidad por apagones, demanda la necesidad de sistemas energéticos de bajo costo, por lo que el mercado de mini turbinas eólicas está comenzando a presentar un crecimiento en las ventas. La captación del viento por mini turbinas depende de 4 factores, diámetro del rotor, perfil aerodinámico de los álabes, altura de la torre, y, condiciones de velocidad de viento. En este documento se evalúan diversos perfiles aerodinámicos para el diseño del álabe, con ángulos de ataque desde 0° a 20°, mediante el software Qblade Design Xfoil, así mismo se realiza un análisis estructural del rotor para conocer los esfuerzos que sufre el sistema a las diferentes velocidades de viento promedio presentadas en la localidad. Los resultados arrojan que a mayor velocidad de funcionamiento del rotor con el porcentaje de relleno sufre más esfuerzos pudiendo causar la rotura del álabe.

Palabras clave: Generador, turbina eólica, sustentación, energía, SWT's

INTRODUCCION

De acuerdo con datos reportados por la secretaria de energía (SENER) al cierre, solo el 75.88% de la energía utilizada en la república mexicana proviene de combustibles fósiles: como el petróleo, carbón y gas natural y la generación por energías limpias del 17.29%, siendo la hidroeléctrica la predominante, y en segundo lugar la energía eólica. esta es una de la tecnología con mayor crecimiento ya que en 2013 se generaban 4185 GWh y en 2018 se terminó con 10620 GWh, teniendo un incremento del 154% para las turbinas convencionales [1].

La cantidad de SWT's (small wind turbines por sus siglas en inglés) operando en el mundo, crece cada año, en el 2012, el total de estos dispositivos fue de 800,000 a nivel mundial, de estos, el 70% están localizados en china, en USA, el segundo mercado más grande, con 155,000 mini turbinas operando, UK, lidera en europa con 23,500 unidades Alemania con 10,000 unidades, y España con 7,020 unidades. En 2015, los únicos que tuvieron un incremento fueron China, y UK, concentrándose, la manufactura de SWT's en 5 países, China, Alemania, UK, USA y Canadá con el 50%.

EN 2017, La WWEA, reportó un crecimiento anual del 14% en la capacidad potencial instalada de mini turbinas, con un crecimiento sostenido hasta el 2020, y un aumento del 16% en la década hasta el 2030 [2].

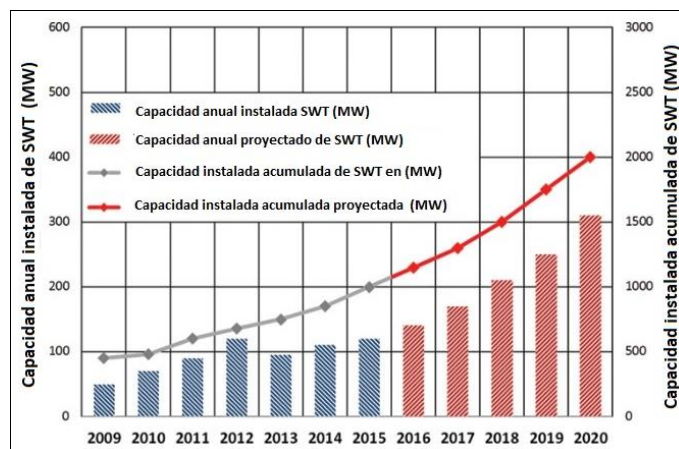


Figura 1. Capacidad instalada de mini turbinas en el mundo.

Uno de los motivantes de este trabajo, es la creciente utilización de tecnología de impresión 3d, orientados a “prosumidores” dentro de la red eléctrica, principalmente en aquellos enfocados a la red inteligente y entender los factores que permiten o restringen el desarrollo de los SWT's, utilizando tecnologías de prototipado rápido. En este caso dichas tecnologías serán aplicados al desarrollo de los álabes.

Para este estudio se toman en cuenta, los siguientes tipos de turbinas.

Modelo.	Material	Diámetro del rotor	Velocidad de corte.
Windmill 1200 W	Polipropileno	1.70 M	2 m/s
Windmill 600 W	Fibra de vidrio	1.30 M	2 m/s
VEVOR 400 W	Fibra de carbono/aleación de aluminio.	1.20 M	2.5 m/s
Windmill 1500 W	Sin datos	1.70 M	2.5 m/s
Missouri Raider 1600 W	Sin datos	1.60 M	Sin datos
Propuesta	PLA + Aluminio	0.90 M	3 m/s

Tabla 1. Las mejores turbinas eólicas domésticas [3].

1.1. Metodología de investigación.

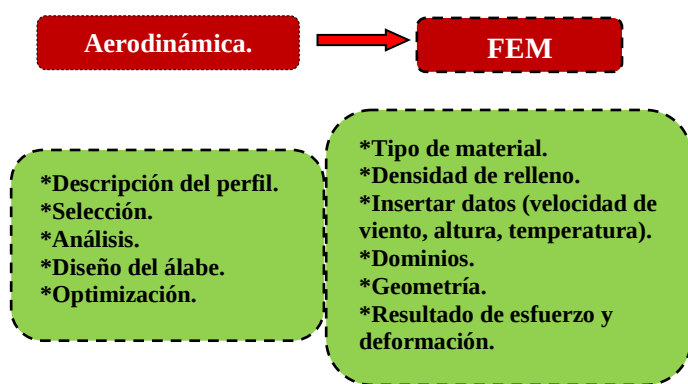


Figura 2. Diagrama de desarrollo del trabajo.

a) Descripción del perfil.

El comité asesor nacional de aeronáutica (NACA), menciona que los perfiles son los diferentes modelos que constan de un cierto diseño el cual otorga la aerodinámica de la turbina la cual es esencial poder conocer los componentes del diseño de los perfiles, un perfil aerodinámico, por lo que todo lo dicho en cuanto a ángulos de ataque, resistencia, sustentación, fuerzas de arrastre, es aplicable para los álabes [4].

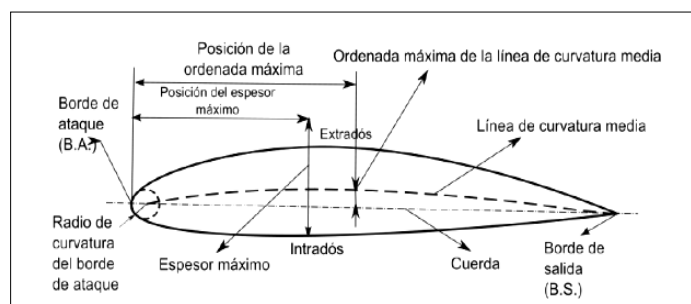


Figura 3. Partes de un perfil alar (NACA, NREL).

b) Selección de perfiles.

Se consideran los perfiles NACA 2414, NACA 4412, NACA 4418, NREL S823, y NREL S1020, todos ellos presentan características similares que son utilizados para los diseños de alas de aviones, aerogeneradores que le permite al diseñador escoger un perfil adecuado para el diseño de la misma esto con la finalidad de tener un mejor aprovechamiento del viento. Debido a que en una turbina se requieren valores elevados del coeficiente de sustentación, pero al mismo tiempo valores bajos del coeficiente de arrastre, es necesario elegir un perfil que tenga cocientes L/D máximos en el mayor intervalo de ángulo de ataque posible.

c) Análisis del perfil.

Los coeficientes de sustentación y arrastre de un perfil se encuentran dados en función del ángulo de ataque (α), y el Número de Reynolds (Re). En una turbina eólica pequeña se tienen números de Reynolds en el rango entre 104 y 106. Para la elección del perfil se encontraron las curvas de los coeficientes de sustentación (CL) y de arrastre (CD), en un intervalo de ángulo de ataque entre 0 y 20° a un Re de 1000 000 unidades para 5 perfiles distintos [6]. Estas curvas se generaron empleando el programa Qblade Design Xfoil. En la gráfica 1 se presentan las curvas del cociente sustentación-arrastre (L/D) de 5 perfiles en función del ángulo de ataque.

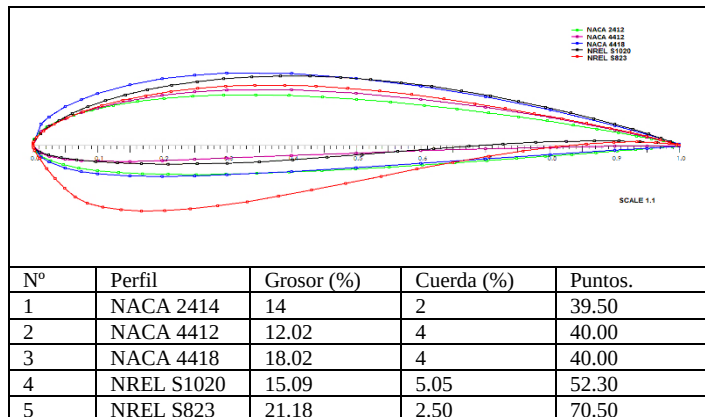


Figura 4. Análisis de los perfiles aerodinámicos.

d) Elección del perfil.

Al realizar el estudio de los cinco perfiles elegidos anteriormente para conocer el comportamiento aerodinámico en los ángulos ya mencionados el resultado es la siguiente.

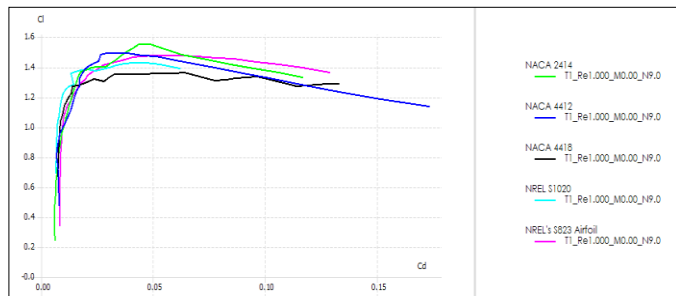


Figura 5. Grafica Cl vs Cd con ángulo de ataque de 0° a 20°.

En la Figura 5 muestra el análisis de los cinco perfiles aerodinámicos mencionados con ángulos de ataque de 0° a 20°. el primer perfil, mantiene un nivel óptimo CL/CD (sustentación/arrastre) a los 5°, el segundo perfil, indica un buen desempeño desde 3° hasta 18°, el perfil 4418, presenta un resultado adecuado en el rango $2 < CL/CD < 14$. el perfil NREL s823, presenta los datos más satisfactorios $3° < CL/CD < 10°$, el ultimo perfil NREL'S1020 no muestra resultado adecuado para los ángulos de ataque.

2. DESARROLLO.

Diseño del álabe en Qblade-Design.

Perfil aerodinámico NACA 4412 Grosor máximo 12% a 30% de cuerda. Comba máx. 4% a 40% de acorde.

La determinación del tamaño del álabe de la turbina, parte de las restricciones del volumen de trabajo, véase la tabla 2 los datos usados para el diseño del modelo.

N°	Posición	Distancia X	Distancia Y	Perfil.
1	0	2.5	0	CIRCULO
2	4	2.5	0	CIRCULO
3	8	7	15	NACA 4412
4	12	5	10	NACA 4412
5	16	4.7	7	NACA 4412
6	20	4	5	NACA 4412
7	24	3.4	3	NACA 4412
8	28	3	2	NACA 4412
9	35	2.5	0.5	NACA 4412

Tabla 2. Datos para el diseño del alabe.

Modelado del álabe del rotor.

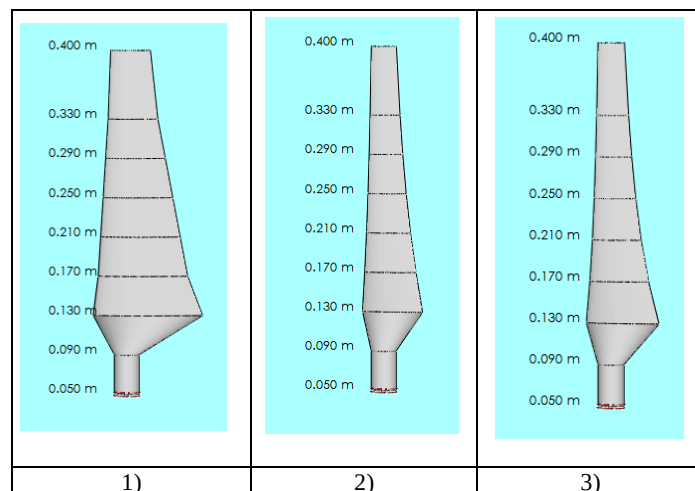


Figura 6. Modelo CAD.

Figura 6. 1) Modelado inicial del álabe; 2) El Segundo diseño se hace de optimización de geometría del álabe por Schimtz. 3) El tercer diseño se hace de optimización de geometría del álabe por Betz.

Mini turbina.	Datos.
Diámetro	94 cm
Velocidad de corte.	4m/s
Velocidad de rotación.	200 rad/s
Longitud del alabe.	40 cm
Longitud de Hub	14 cm

Tabla 3. Características del rotor.

3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL ROTOR

Para el estudio estructural del rotor se ocupa el programa Qblade Design Xfoil, lo primero que se realiza es determinar la geometría, las condiciones de frontera, propiedades del material, así obtener el análisis de resultados.

A continuación, se realiza el análisis del rotor teniendo los siguientes datos.

Datos significativos para el análisis.					
	Porcentaje de relleno exterior (%)	Porcentaje de relleno interno (%)	Tipo de material.	Peso del álabe.	Elasticidad (Pa)
N°1	15	15	PLA	0.0940 kg	2.3e+10

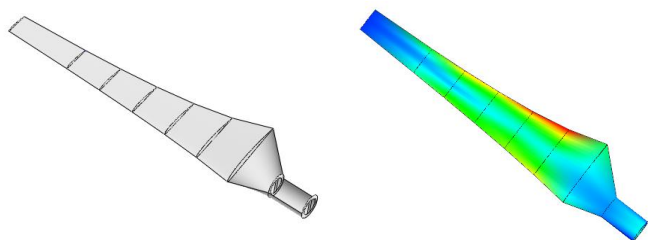


Figura 7. Densidad de relleno de los álabes

La figura 7 muestra el estudio estructural estático del álabes de la turbina con una densidad de relleno del 15%.

4. RESULTADO

Para analizar el comportamiento del rotor con el porcentaje de relleno especificado, se hace pruebas en diferentes velocidades de viento que puede tener el sistema durante su funcionamiento, el estudio se lleva a cabo en una altura de la turbina de 8 metros, con un viento de 4,8,12 m/s dando como resultado la siguiente.

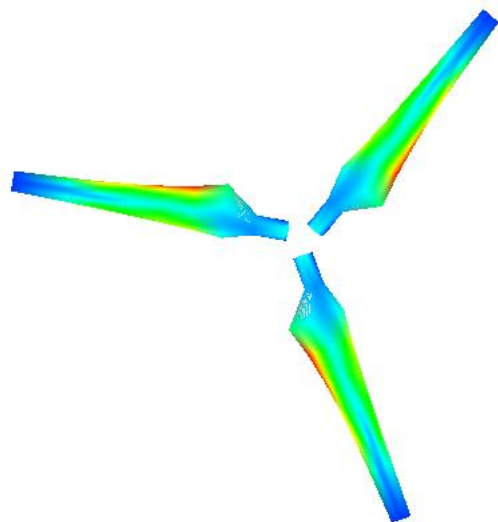


Figura 8. Rotor funcionando a 4 m/s.

La figura 8. Representa el funcionamiento del rotor a una velocidad de corte de 4 m/s, es posible notar que el álabes sufre el mínimo esfuerzo.

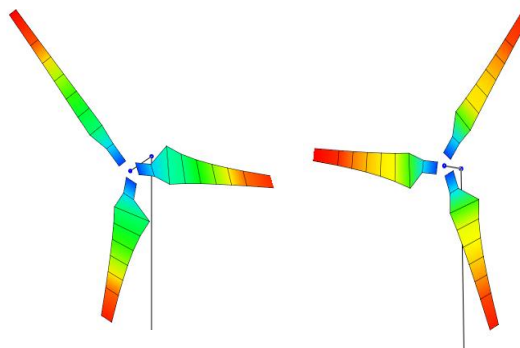


Figura 9. Rotor funcionando a 8-12 m/s

La figura 9. Muestra el comportamiento del rotor a las velocidades de 8 y 12 m/s indicando que a mayor velocidad de viento con este porcentaje de relleno del 15%, y al comparar ambas ya mencionadas se determina que mayor velocidad se tiene mayor esfuerzo en la estructura del álabes.

5. CONCLUSIÓN.

Se obtuvieron datos de las cargas y momentos aerodinámicos sobre el álabes de una mini-turbina eólica de eje horizontal. Los datos recogidos son de gran utilidad para posterior uso ayudando definir criterios de diseño estructural. Los cambios de presiones que experimentan los álabes pueden ser causantes de fatiga en el uso de los perfiles alares.

Obtener un perfil aerodinámico correcto para el diseño del álabes de los aerogeneradores es de suma importancia para la generación de energía eléctrica ya que con ello se aprovecha al máximo el viento.

Es necesario conocer los fenómenos propios de la operación de las turbinas eólicas de eje horizontal, los métodos numéricos son una herramienta potente y muy útil, pero pueden conducir a sobredimensionamiento de magnitudes o a mala predicción de variables si no se configuran los parámetros o no se manejan los resultados de manera adecuada.

REFERENCIAS

- [1] SENER< reporte de avance de energía limpias primer trimestre 2018>México 2018.
- [2] Jakub Bukala, Krzysztof Damaziak, Small wind turbines: specification, design, and economic evaluation, Intechopen, 27 de julio del 2016.
- [3] Tiny House, Huge Ideas, 7 top home wind turbines, diario digital; fecha de consulta 23 de septiembre del 2019, disponible en: <https://tinyhousehugeideas.com/best-wind-turbine-reviews/>.

- [4] Herramientas aerodinámicas, portal electrónico, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) diario digital, disponible en: <http://airfoiltools.com/>
- [5] Inter solar, small wind world report, revista oficial WWEA, Bonn Munich/o2 de junio 2017.
- [6] M. en C. María Georgina Ortiz Gallardo. Responsable del reporte M. en A. César Andrés de la Fuente, reporte de inteligencia tecnológica (energía eólica en la tierra) libro oficial SENER, año 2017.
- [7] Portal electrónico (wind finder) diario digital: <https://es.windfinder.com/#14/19.6495/-99.1504>