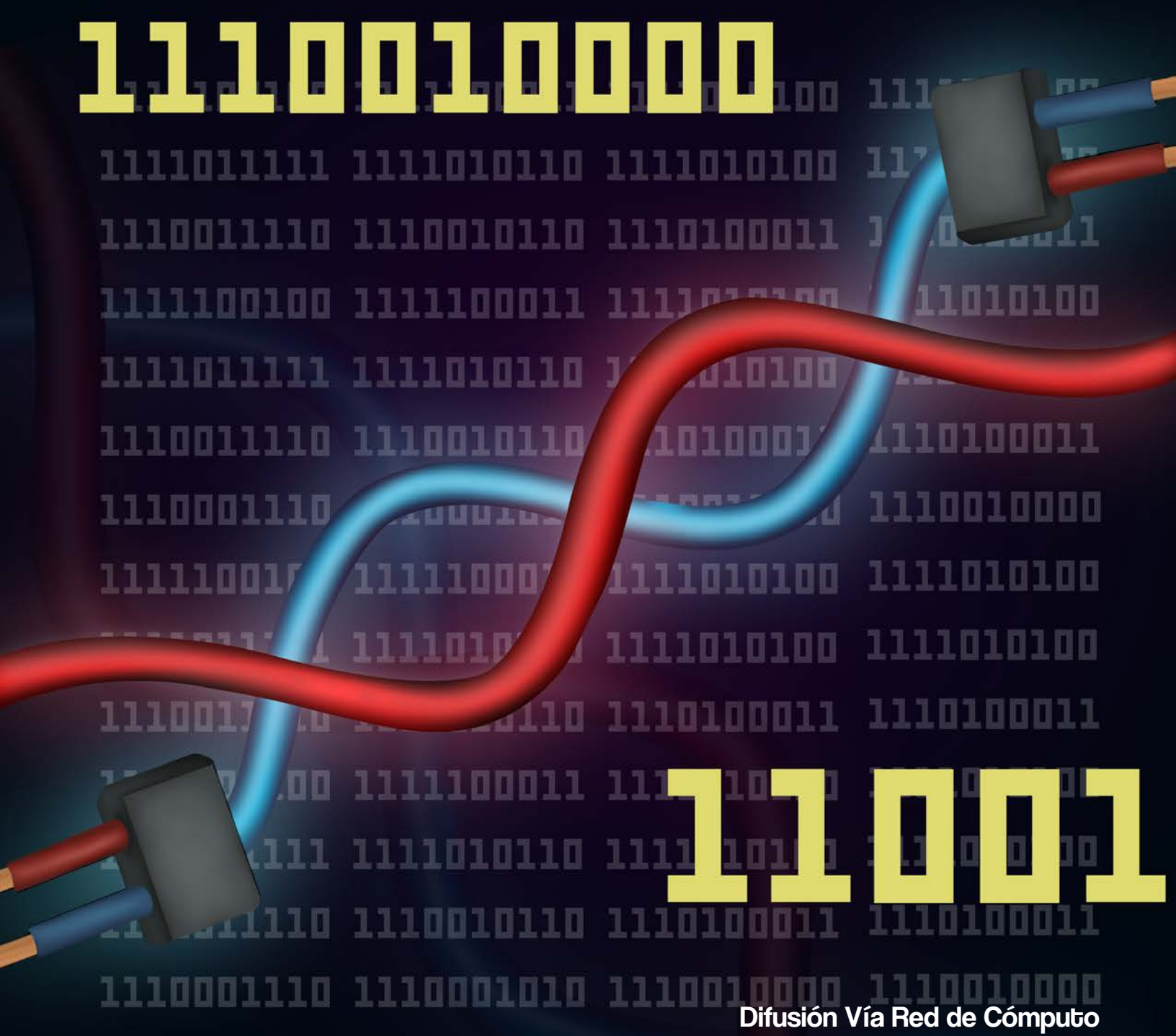
TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Enero - Junio 2020 Vol 3 / Núm. 1 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 3, NÚMERO 1, Enero - Junio 2020. 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 3, Núm. 1, Enero - Junio 2020, es una publicación semestral, publicada y editada por el Tecnológico Nacional de México dependiente de la Secretaría de Educación Pública, a través del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Avenida Universidad No. 1200, 5to. Piso, Colonia Xoco, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, Ciudad de México, México, Tel. + (52) 5536002500. Ext. 65064, d_vinculacion05@tecnm.mx, Editora Responsable M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2019-0222612512500-2013, ISSN: En trámite, ambos son otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino, docente del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Colonia Palmira, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 62490, Tel. +(52) 777 362 7770, fecha de término de última actualización, 20 de julio 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
Jefe de la 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

Portada: Imagen que contiene la representación del sistema de numeración binario, con algunos elementos que hacen referencia al cómputo genómico.

Editorial

La actual contingencia sanitaria generada por el virus SARS- CoV2 (COVID-19) que se ha vivido en el mundo ha ocasionado entre muchos sucesos, la cancelación o reprogramación de acciones académicas y culturales, entre otras.

Ante ello el Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), dirigido por la Dra. Yesica Imelda Saavedra Benítez, tuvo que adaptar la actividad académica 4ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada, a través de la cual se realiza la presentación presencial de artículos relacionados a tópicos de las áreas de Ciencias Computacionales, Electrónica y Mecánica, sugiriendo en esta ocasión se llevara a cabo la Convocatoria de participación únicamente para la recepción, arbitraje y publicación de los textos seleccionados que conforman la publicación semestral electrónica de la revista Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada, Volumen 3, Núm. 1, Enero - Junio 2020 que en esta ocasión se presenta.

La recepción de los artículos estuvo abierta de febrero al mes de abril de 2020, la revisión de éstos se llevó a cabo en los meses de mayo y junio del mismo año, notificando la aceptación y/o rechazo de las investigaciones a partir del mes de junio.

El arbitraje de los artículos lo realizaron expertos y profesores-investigadores de las áreas mencionadas pertenecientes al CENIDET y a otras Instituciones de educación y de investigación del país e internacionales. Es importante destacar la importante participación del comité técnico de cada área quienes realizaron un gran trabajo; en Mecánica, el Dr. Andrés Blanco Ortega; en Electrónica el Dr. Jesús Darío Mina y en Ciencias Computacionales el Dr. Humberto Hernández García; así como al Editor general de los artículos, Dr. Manuel Mejía Lavalle.

Para este número se aceptaron 48 artículos; de los cuales 23 corresponden al área de Ciencias Computacionales, 14 a Ingeniería Electrónica y 11 a Ingeniería Mecánica de más de 15 Centros e Institutos de Investigación y Educativas y de empresas que hacen investigación entre las cuales destacan: El Centro de Investigación en Ingenierías y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, el Instituto de Energía Renovable de la Universidad Nacional Autónoma de México campus Morelos, el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, la Universidad Politécnica del Estado de Morelos, la Universidad Tecnológica Emiliano Zapata, la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán del Instituto Politécnico Nacional, la Universidad Autónoma de Aguascalientes, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, el TecNM campus Tuxtla Gutiérrez, de TecNM campus Acapulco, el TecNM campus Cuautla, el TecNM campus Mazatlán, la Universidad Tecnológica de Tehuacán, la empresa Equipos Médicos Vizcarra, el CETYS, Universidad campus Tijuana y la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la Universidad Autónoma de México.

En estos trabajos se ve plasmada la calidad de investigación de profesores y estudiantes de diferentes puntos del país, los cuales generan y transfieren conocimiento competitivo en sus áreas de estudio.

Finalmente, agradecemos a todos los revisores internos y externos su contribución eneste producto académico del CENIDET.

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Editora

Volumen 3, Número 1, Enero - Junio 2020.

JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA

Comité de Arbitraje TecNM/CENIDET

Ciencias Computacionales

Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez
Dra. Alicia Martínez Rebollar
Dra. Olivia Graciela Fragoso Díaz
Dr. Manuel Mejía Lavalle
Dr. Joaquín Pérez Ortega
Dr. Javier Ortiz Hernández
Dr. Juan Carlos Rojas Pérez
M.C. Humberto Hernández García
Ing. Víctor Josué Ruiz Martínez

Ingeniería Electrónica

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Dr. Jesús Darío Mina Antonio
Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel
Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Dr. Luis Gerardo Vela Valdés
Dr. Jarniel García Morales
Dr. Ricardo Eliu Lozoya Ponce
Dr. Jesús Aguayo Alquicira
Dr. Enrique Quintero Mármol Márquez
Mtro. Héctor Ramón Azcaray Rivera
Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez Dr. Gabriel Calzada Lara
Dr. Abraham Jashiel Pérez Estrada

Ingeniería Mecánica

Dr. Andrés Blanco Ortega
Dra. Claudia Cortés García
Dr. Arturo Abúndez Pliego
Dr. Wilberth Alcocer Rosado
Dr. Efraín Simá Moo
Dr. Saulo Jesús Landa Damas
Dr. Carlos Manuel Lara Barrios
Dr. Enrique Alcudia Zacarías
Dr. Carlos Miguel Jiménez Xamán
Dra. Sara Lilia Moya Acosta
Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda
Mtro. Miguel Ángel Che Pan

Comité de Arbitraje Externo

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

Dra. Adriana Mexicano Santoyo
Tecnológico Nacional de México campus Ciudad Victoria.

Dr. Jesús Carlos Carmona Frausto
Tecnológico Nacional de México campus Ciudad Victoria

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. Osslan Osiris Vergara Villegas
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

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

Dra. Blanca Alicia Vargas Govea
OCC Mundial

Dr. Fabio Abel Gómez Becerra Instituto Tecnológico Superior de Puerto Vallarta

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

Dr. Winfried Meusel
Infinity³ professional services GmbH

M.C. José Efraín Ruiz Ramírez
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

Dr. Cornelio Morales Morales
Tecnológico Nacional de México campus Cuatla

Dr. Gabriel Calderón Zavala Universidad Politécnica del Estado de Morelos

Dr. Francisco Ronay López Estrada
Université de Lorraine, Francia.

Dra. Susana Estefany de León Aldaco
Universidad Internacional Iberoamericana

Volumen 3, Número 1 , Enero - Junio 2020.

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 Asociado

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

Comité Técnico de los Artículos de la 4ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada

Dr. Manuel Mejía Lavalle
Editor General de los Artículos

Dr. Jesús Dario Mina
Editor Asociado
Ingeniería Electrónica

Dr. Andrés Blanco Ortega
Editor Asociado
Ingeniería Mecánica

M.C. Humberto Hernández García
Editor Asociado
Ciencias Computacionales y
Administrador de la plataforma
Easychair

ÍNDICE

Ciencias Computacionales

Modificación Algorítmica Aplicable a Búsquedas en Internet	10
Hill Climbing con Agenda Limitada para Problemas Industriales	16
Evaluación Objetiva de Descriptores Visuales del Estándar MPEG-7 en la Recuperación de Imágenes	23
Estudio del Mapeo Sistemático de Herramientas Utilizadas en el Problema de la Variedad en Big Data	30
Alineación de Secuencias Genómicas Utilizando el Algoritmo de Búsqueda Best First Search	37
Implementación de Patrones para la Capa de Acceso de una Herramienta Informática Basada en la Metodología Scrum para la Gestión de Proyectos de Desarrollo de Software	41
Red Neuronal Pulso- Acoplada en la Mejora de Imágenes Digitales a Color Oscuro	46
Taxonomía de Herramientas de Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE), para el Desarrollo de Aplicaciones Embebidas y/o Ciber -Físicas	54
Sistema de Servicios para la Medición de la Modularidad de Arquitecturas de Software	61
Métricas para la Disminución de Deuda Técnica Originada por la Carencia de Protección Modular en Arquitecturas Orientadas a Objetos	69
Implementación del Backend de un Sistema Informático para el Seguimiento y Control del Mantenimiento de Infraestructura y equipo en el ITSM	78
Algoritmo para la Medición no Invasiva de Objetos a Pequeña Escala	83
Desarrollo de un Sistema Embebido de Visión Artificial Multiespectral para la Estimación de la Humedad en Productos Agrícolas	87
Algoritmo de Transformación Espacial de Imágenes para Reducción de Bits Aplicado a Estimación de Movimiento	92
Revisión del Estado del Arte en Reconocimiento Basado en Imágenes de la Oreja	98

Modelo Ab Initio para Reconstrucción de Tiempos de Respuesta en Procesos con Alta Prioridad en una SBC con RT-Linux 103

Un Modelo de Alfas de Essence para Priorizar Características del Desarrollo de Software Mediante Mapas Cognitivos Difusos 109

Método para la Extracción de Tweets y su Aplicación en Comentarios en Torno al Coronavirus 117

Navegación de una Robot Diferencial Basada en una Red Neuronal Multicapa con el Método de Retro propagación 122

Sistema de Asistencia Médica para Pacientes Geriátricos Basado en Sistemas Expertos y Bioseñales 128

Traducción de una Representación Gráfica de un Lenguaje Matemático a un Lenguaje Procedimental de Base de Datos 132

Análisis Comparativo de Arquitecturas para Internet of Things 137

Estudio Experimental del Comportamiento de la Intensidad de la Señal BLE 142

Ingeniería Electrónica

Estimación Paramétrica Basada en Modelos de Caja Gris para un Fotobiorreactor Vertical 147

Validación del Método Activo Anti-isla Cambio de Frecuencia Sandia 153

Técnica de Control Inteligente para el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia en Sistemas Fotovoltaicos Aislado 157

Obtención de Parámetros Óptimos para el Correcto Control de Corriente en Transmisor Inalámbrico de Energía 162

Estimación de Parámetros del Modelo de Circuito Eléctrico Rint de una Batería de Ionlitio con Mínimos Cuadrados Recursivos y Filtro de Kalman Extendido 167

Control por Modos Deslizantes en un Motor de CD: Resultados Experimentales 173

Comparación de Tres Estrategias de Detección y Diagnóstico de Fallas para un Sistema de Conversión de Energía Eólica 178

Control de una Máquina Saponificadora en la Sección del Tanque de Agitado Aplicando Inteligencia Artificial 184

Modelado y Análisis de un Motor de Inducción Trifásico para Aplicaciones de Almacenamiento de Energía 189

Diseño de un Algoritmo Basado en el EKF para la Estimación de Demandas Desconocidas en Ductos de Agua 194

Análisis de Ganancia de Voltaje e Impedancia de Entrada de Tanque-Z Modificado 201

Implementación en FPGA de una Técnica de Modulación LS-PWM Modificada para Inversor Multinivel con Reasignación de los Pulsos de Comando 206

Análisis de Factores de Diseño para Escalamiento Seguro en Potencia de Transmisor Inalámbrico Inductivo 211

Convertidor de Baja Potencia para Cosecha de Energía 216

Ingeniería Mecánica

Análisis Numérico de un Sistema de Seguridad con el Uso de Elastómeros 221

Estrategia para Utilizar y Comercializar los Excedentes de Producción Agrícola 226

Gráficas de Optimización Termo-Económica de un Sistema de Calentamiento Solar 231

Análisis de la Microestructura de una Caja de Conexión de Aluminio Fundido Mediante un Estudio Metalográfico 236

Viabilidad Económica de la Nanofiltración Fotovoltaica de Baja Presión en San Luis Potosí 245

Dimensionamiento de un Sistema Híbrido Solar-Solar para Generación de Vapor en la Industria, Utilizando Herramientas Gráficas 249

Efecto de la Hibridación en las Propiedades Mecánicas a Flexión de un Laminado Híbrido Carbono/Vidrio 255

Análisis Dinámico de un Inersor en MSC ADAMS 260

Cinética de Secado de Calabaza (Cucurbita pepo L.) Deshidratada a 50°C con Velocidad de Aire de 2m/s 266

Aspectos Básicos para el Diseño Mecánico de un Exoesqueleto de Extremidades Inferiores para Aumento de Fuerza 270

Diseño e Implementación de un Robot de Asistencia y Servicio para Aplicaciones de Jardinería 277

Modificación Algorítmica aplicable a búsquedas en internet

Alejandro Aranda Díaz, Dr. Manuel Mejía Lavalle

Tecnológico Nacional de México / CENIDET
Cuernavaca, Morelos, México;
Enero-2019

e-mail: Alejandro.aranda19ca@cenidet.edu.mx
mlavalle@cenidet.edu.mx

Resumen

EL objetivo de este articulo es proponer un algoritmo de búsqueda basado en *Best First Search (BFS),* buscando optimizar las búsquedas que se realizan en contexto de Internet. El algoritmo propuesto incluye un umbral para limitar el tamaño de los nodos en la agenda. Aunque la intención del trabajo es aplicarlo en Internet por ahora se realizaron experimentos en un entorno controlado. Los resultados mostraron que se logró obtener un mejor tiempo (31.75% mejor) con el método propuesto y la heurística propuesta, en todas las configuraciones se consiguió reducir el tamaño de la agenda en un 44.99%.

Palabras clave: Métodos de Búsqueda, Best First Search, Internet, Search Engine Optimization.

1. Introducción

La inteligencia artificial (IA) se ha integrado en varios aspectos de la vida humana, como han sido: educación, salud, inversiones, etc. [Thomas, 2017]. IA también ha sido aplicada en búsquedas de Internet, ayudando a obtener información confiable y en contexto a los deseos del usuario, a través de motores de búsqueda [Kaput, 2018] [Gupta, 2017].

En la actualidad se busca la optimización de estos motores en un área conocida como optimización de motores de búsqueda (SEO por sus siglas en inglés) donde el resultado considerará varios factores, como el área donde reside el usuario, historial de búsqueda, *websites* favoritos y que han seleccionado otros usuarios que han realizado el mismo *query*; los algoritmos deciden los factores mejor relacionados a tomar en cuenta en cada búsqueda [Jaiswal, 2018].

IA se ha aplicado también para el control de calidad de los motores de búsqueda; se solía utilizar malas prácticas para realizar ésto, eran conocidas como "*black hat SEO techinques*". Estas prácticas fueron dañinas para los motores de búsqueda, los cuales llegaban a mostrar en primera página, sitios sin calidad [Kaput, 2018].

Hoy en día se utiliza IA para identificar el contenido de calidad y excluirlo del malo, así mismo se ha aplicado con algoritmos de clasificación los cuales cumplen un papel muy importante a la hora de proporcionar de forma ordenada los sitos provistos por el motor de búsqueda; de forma mas técnica, se espera que los algoritmos creen una lista con los mejores posibles resultados en orden óptimo a partir de un *query* [Kaput, 2018].

 ISSN en trámite

Los algoritmos de búsqueda son procedimientos que permiten recorrer, en el peor de los casos, todas las posibles soluciones para encontrar una secuencia de operadores a un problema específico, hasta encontrar una solución [Lizma, 2013].

Un algoritmo de búsqueda toma un problema como entrada y devuelve una solución en forma de una secuencia de acciones constituidos por los siguientes elementos: un estado inicial, estado del cual parte la búsqueda; estado final, estado objetivo; estados y operadores [Gupta, 2017]. Muchos algoritmos de búsqueda se han desarrollado desde los inicios de la IA y aunque son muy utilizados en el ámbito de juegos [Nasarre, 2019] su utilidad se extiende más allá.

Además de SEO, los algoritmos de búsqueda se han aplicado en otros problemas del mundo real como direcciones de manejo en *websites* y sistemas integrados en automóviles [Gupta, 2017]. El algoritmo *Best First Search* se ha aplicado a manejo de tiempo en áreas de trabajo, mientras que el algoritmo *Beam Search* se ha aplicado en el área de optimizado de empaquetado [Bennell, 2018].

El principal problema con BFS es la gran cantidad de espacio que requiere para la agenda lo cual, en práctica, podría agotar la memoria de la máquina utilizada antes de alcanzar una solución [Mencía, 2013].

En este artículo se propone una modificación para BFS que pretende reducir el problema que comprende la gran cantidad de nodos generados por el algoritmo, así mismo se propone una heurística basada en Manhattan.

2. Algoritmos de Búsqueda

2.1 Descripción de Best First Search (BFS)

En BFS se considera cualquiera de los nodos como el nodo siguiente. La idea es utilizar una heurística que decida cuál de los nodos en la agenda es el más prometedor a ser explorado. A continuación, una descripción del algoritmo:

1. Crear una Agenda vacía.
2. Insertar estado inicial
3. Hasta Agenda este vacía
   Si Agenda(0) es la Meta
   Salir
   SiNo
   Explorar Agenda(0)
   Agregar Hijos
   Marcar Agenda(0) “Visitado”
   Eliminar Agenda(0)
   Reordenar Agenda
   FinProceso

Dado el siguiente árbol en donde cada nodo representa el valor de la heurística **Figura 1**, de esta forma la agenda se muestra a continuación:

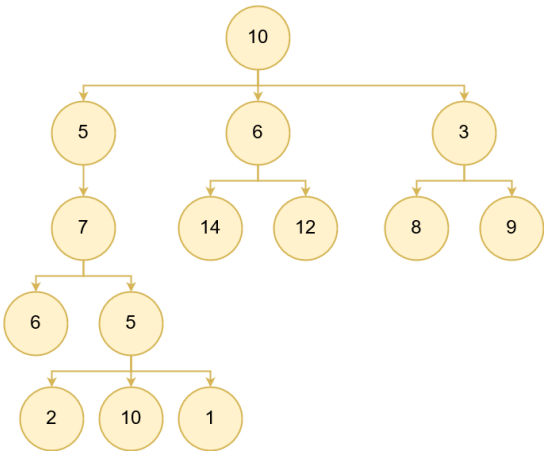


Figura 1. Árbol de estados.

1. [10]
2. [3,5,6]
3. [5,6,8,9]
4. [6,7,8,9]
5. [7,8,9,12,14]
6. [5,6,8,9,12,14]
7. [1,2, 6,8,9,10,12,14]

2.2 Descripción del Algoritmo propuesto (AAD)

El algoritmo propuesto parte de BFS, utilizando un principio de solo admitir estados que posean una heurística no mayor a un umbral definido por la heurística de menor valor en la agenda. Esto con el propósito de reducir el tamaño de la agenda y el costo en tiempo; a continuación se describe el algoritmo AAD.

Haciendo H una abreviación de Heurística y U de Umbral:

1. Crear una Agenda vacía.
2. Insertar estado inicial
3. U ← 10 (Ajustable)
4. MainH ← HInicial
5. Hasta Agenda este vacía
   Si Agenda(0) es la Meta
   Salir
   SiNo
   Explorar Agenda(0)
   Comparar H con MainH+U

 ISSN en trámite

```
                Agregar hijos no visitados en U
                Marcar Agenda(0) "Visitado"
                Eliminar Agenda(0)
                Reordenar Agenda
                Si Agenda(0).H >MainH
                        MainH ← Agenda(0).H
        FinProceso
```

3. Heurística

Son criterios, métodos o principios para decidir entre algunos cursos de acción para alcanzar el objetivo de la forma más efectiva [Pearl, 1988]. Representan un valor cuyo significado es la cercanía que posee el estado actual de resolver el problema dado.

3.1 Manhanttan

Consiste en obtener la distancia de las entidades con respecto a la posición meta; para 8-Puzzle se obtiene individualmente la distancia de los números a su posición meta, posteriormente se suma el total de los valores para de esta forma obtener el valor de Heurística **Figura 2**.

Estado

8	**3**	5
4	1	6
2	7	**0**

Manhattan

1	1	2
2	2	2
3	1	2

Distancia a 0

	0	1

Figura 2. Obtención de Heurística Manhattan

3.2 Heurística Propuesta

La heurística propuesta es una variación de la heurística Manhattan, a la cual se le multiplica la distancia de cada elemento hasta el elemento vacío o cero, de esta manera el resultado final tendrá un valor extra que representará una heurística de mayor valor.

Tomando en cuenta el estado dado: {8,3,5,4,1,6,2,7,0} **Figura 3**, y se desea llegar al estado meta: {1,2,3,8,0,4,7,6,5} **Figura 4**.

8	**3**	**5**
4	**1**	**6**
2	**7**	**0**

Figura 3. Estado

1	**2**	**3**
8	**0**	**4**
7	**6**	**5**

Figura 4. Estado meta

Para cada elemento del estado se obtiene la distancia a 0 y finalmente se suman todos los elementos para obtener la heurística del estado. Esto se puede observar de manera gráfica en la **Figura 5.**

Estado

8	**3**	5
4	1	6
2	7	**0**

Distancia a 0

	0	1
		2
		3

Manhattan * Distancia a 0

1*4	1*3	2*2
2*3	2*2	2*1
3*2	1*1	2*0

Figura 5. Funcionamiento de distancia a 0

4. Experimentación

Para la experimentación se utilizó un procesador Intel Core i7 de séptima generación con 16GB RAM en el SO Windows 10, el código fue realizado en C# con Visual Studio 2019. Se probaron 100 casos de estados iniciales generados al azar realizando 55 movimientos.

El tiempo fue medido utilizando la clase *StopWatch* de C#, la cual se inicia al comienzo del código que se desea medir y se detiene al finalizar este, de esta forma *StopWatch* ahora porta el atributo *ElapsedMilliseconds* el cual pose el tiempo transcurrido en milisegundos.

Los 100 casos se ejecutaron de forma continua sin interrupciones, para esto, un preprocesamiento de los datos fue realizado con el fin de ajustarlos al manejo de los datos que utiliza el algoritmo, así mismo con el fin de evitar la generación de ramas infinitas se asignó una condición de paro de profundidad.

A ambos algoritmos se les aplico una limitación en el nivel de profundidad siendo el máximo nivel de profundidad 55.

4.1 Experimentación del algoritmo propuesto con heurística propuesta y Manhattan

Los resultados obtenidos por el algoritmo propuesto utilizando la heurística propuesta y Manhattan se muestran en la **Tabla 1**:

ISSN en trámite

Tabla 1. Comparación de algoritmo propuesto (AAD), heurística propuesta (HPRO) contra Manhattan (MAN), Profundidad (P), Nodos Visitados (V), Tamaño de Agenda (A), Tiempo transcurrido en milisegundos (T).

	P	V	A	T
AAD+HPRO	22.121	93.141	40.323	2.559
AAD+ MAN	22.18	110.42	89.61	3.749

En la **Tabla 1** se muestra en color verde el mejor caso, en esta ocasión la heurística propuesta obtuvo un ligero mejor desempeño exceptuando en el tamaño de la agenda donde logro reducirla por la mitad.

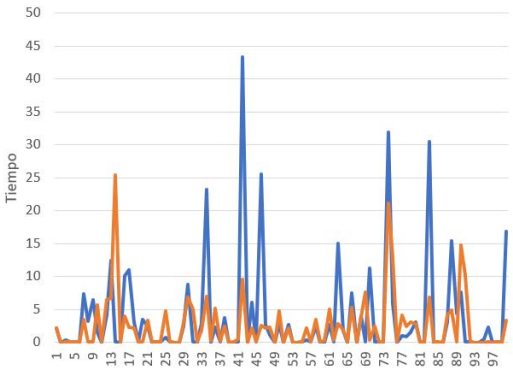


Figura 6. Gráfica con la comparacion de heuristica prouesta (Naranja) y manhattan (Azul) respecto al tiempo con AAD.

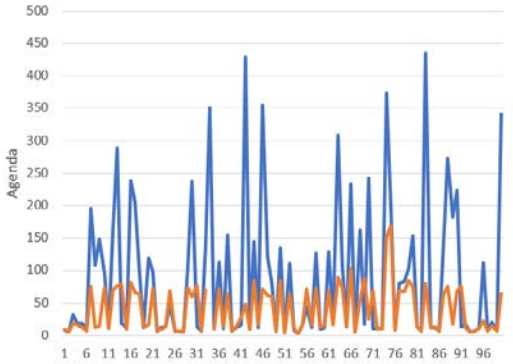


Figura 7. Gráfica con la comparacion de heuristica prouesta (Naranja) y manhattan (Azul) respecto al tamaño de la agenda con AAD.

En la **Figura 6** podemos observar el comportamiento en los 100 casos de las heurísticas con respecto al tiempo, es posible observar que Manhattan muestra picos más elevados a lo largo de los casos.

En la **Figura 7** es posible observar que la heurística propuesta logro una agenda más reducida y más consistente, ya que manhattan muestra grandes elevaciones.

Algo más a agregar es que con la heurística propuesta, uno de los casos no fue alcanzado mientras que manhattan finalizo todos los casos.

4.2 Experimentación con algoritmo Best First Search (BFS) con heurística propuesta y Manhattan

En la **Tabla 2** se muestran los resultados obtenidos con el algoritmo BFS con la heurística propuesta y Manhattan. Los experimentos se realizaron con los mismos casos utilizados para el algoritmo propuesto.

Tabla 2. Comparación de algoritmo BFS, heurística propuesta (HPRO) contra Manhattan (MAN), Profundidad (P), Nodos Visitados (V), Tamaño de Agenda (A), Tiempo transcurrido en milisegundos (T).

	P	V	A	T
BFS+HPRO	23.68	100.12	81.8	3.22
BFS+ MAN	22.18	110.42	89.61	3.44

En la **Tabla 2** se muestra en color verde el mejor caso, en esta ocasión la heurística propuesta obtuvo un ligero mejor desempeño exceptuando la profundidad, en la cual fue derrotada por manhattan.

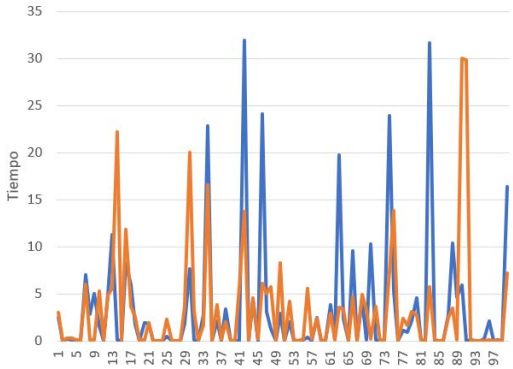


Figura 8. Gráfica con la comparacion de heuristica prouesta (Naranja) y manhattan (Azul) respecto al tiempo con BFS.

 ISSN en trámite

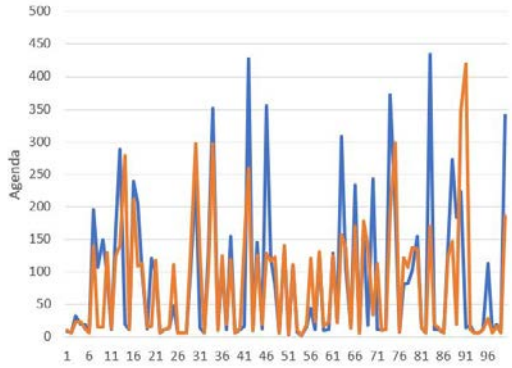


Figura 9. Gráfica con la comparacion de heuristica prouesta (Naranja) y manhattan (Azul) respecto al tamaño de la agenda con BFS.

En la **Figura 8** es posible observar que ambas heurísticas se comportaron de forma similar, por lo que se considera que HPRO logro tener mejor tiempo solo por el pico más elevado de MAN.

En la **Figura 9** se muestra que HPRO presenta varias coincidencias con su contrincante pero, HPRO presento menos picos en la agenda, de esta forma logro un mejor puntaje que MAN.

4.3 BFS contra AAD

Una comparación de las tablas mostradas anteriormente es mostrada en la **Tabla 3**, en color verde los mejores puntajes y en rojo los peores.

Tabla 3. Comparación de algoritmo BFS vs AAD, heurística propuesta (HPRO) contra Manhattan (MAN), Profundidad (P), Nodos Visitados (V), Tamaño de Agenda (A), Tiempo transcurrido en milisegundos (T).

	P	V	A	T
AAD+HPRO	22.121	93.141	40.323	2.559
AAD+ MAN	22.18	110.42	89.61	3.749
BFS+HPRO	23.68	100.12	81.8	3.22
BFS+ MAN	22.18	110.42	89.61	3.44

Estos datos muestran que el algoritmo propuesto es más eficiente con la heurística propuesta, así mismo se puede observar que AAD+MAN y BFS+MAN dan un resultado similar, se considera que esto se debe a el umbral utilizado, quizá si es reducido podría obtener un resultado diferente, es posible observar la comparación en tiempo y agenda con una gráfica en las **figuras 10 y 11**.



Figura 10. Gráfica con la comparacion en tiempo de AAD y BFS.



Figura 11. Gráfica con la comparacion en tamaño de agenda de AAD y BFS.

5. Conclusiones

Al finalizar el experimento con las configuraciones utilizadas podemos concluir que el algoritmo propuesto resultó ser más eficiente con la heurística propuesta, mejorando en un 31.75% en tiempo y en 49.99% el número de nodos en agenda; debido a los resultados de Manhattan, se considera ajustar el umbral, reduciendo su valor, para observar que diferencias en el comportamiento obtendrían las heurísticas con algoritmo propuesto.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Alejandro Aranda Díaz agradece a CONACYT por la beca concedida para la realización de sus estudios de posgrado.

 ISSN en trámite

Referencias

[Thomas 2017] B. Thomas, "Two REITs for Our Artificial Intelligence Future," Forbes, Nov. 25, 2019. [Online] Available: https://www.forbes.com/sites/bradthomas/2017/04/18/two-reits-for-our-artificial-intelligencefuture/#23b09815fc68.

[Jaiswal, 2018] S. R. Jaiswal, V.S. Belsare, 'Theoretical Approach of Artificial Intelligence and Search Engine Optimization', International Journal of Advance Innovative Technology in Engineering (IJAITE), Vol. 2, Special Issue 1, 2018.

[Kaput, 2018] M. Kaput, 'How Search Engines Use Artificial Intelligence' Marketing Artificial Intelligece Institute, Jan. 14, 2020. [Online] Available: https://www.marketingaiinstitute.com/blog/how-search-engines-use-artificial-intelligence

[Lizma, 2013] S. Lizma, A. Muñoz. 'Algoritmos de consistencia para programación con restricciones.' pontificia universidad católica de Valparaíso, 2013.

[Gupta, 2017] P. Gupta, 'Search algorithms in artificial intelligence', hackernoon, Jan ,14 2020. [Online] available: https://hackernoon.com/search-algorithms-in-artificial-intelligence-8d32c12f6bea

[Nasarre, 2012] B. Nasarre, 'Método de Monte-Carlo Tree Search (MCTS) para resolver problemas de alta complejidad: Jugador virtual para el juego del Go' Escuela de ingeniería y arquitectura, universidad de Zaragoza, 2012.

[Bennell, 2018] J. Bennell, M. Cabo, A. Martinez-Sykora, 'A beam search approach to solve the convex irregular bin packing problem with guillotine cuts', European Journal of Operational Research 270 89–102, 2018

[Mencia, 2013] C. Mencia, M. Sierra, R. Varela, 'An efficient hybrid search algorithm for job shop scheduling with operators', International journal of production research, 2013. http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2013.802389

[Pearl, 1984] J. Pearl, 'Heuristics: intelligent search strategies for computer problem solving' Los Angeles, CA: Addison-Wesley Longman Publishing Co. 1984.

Hill Climbing con agenda limitada para problemas industriales

J. Andrés Arizmendi Sánchez, Manuel Mejía Lavalle

Departamento de Ciencias Computacionales
Tecnológico Nacional de México / CENIDET
Cuernavaca, Morelos, México
{jose.arizmendi19ca & mlavalle}@cenidet.edu.mx

Resumen: Los algoritmos de búsqueda clásicos pese a ser de los primeros algoritmos que se crearon han tenido buenos resultados. Inicialmente eran utilizados mayoritariamente en el área de las ciencias computacionales, pero actualmente no necesariamente se limita a las ciencias computacionales sino más bien en áreas de diferentes ámbitos como arquitectura, manufactura, logística o inclusive en medicina. En este artículo se propone un método basado en el algoritmo Hill Climbing en donde se elimina la limitante de la profundidad y acotando la agenda a 100 elementos para evitar la explosión combinatoria, así como también se propone una heurística para realizar las pruebas. Es comparado con Iteritve Deepening Search.

Palabras clave: Hill Climbing, Búsqueda clásica, ingeniería.

1. INTRODUCCION

Los algoritmos de búsqueda clásica a pesar de su aparente antigüedad han demostrado ser eficientes para resolver problemas, no necesariamente ligados al área de la computación Tsamardinos et al. (2006), Liu, et al. (2008), Alajmi et al. (2011). Hill Climbing es un algoritmo eficaz pese a su relativa sencillez de implementación pero que puede presentar un problema cuando el nodo que se busca se encuentra alejado. Este puede ocurrir, básicamente, por una mala heurística más que por el algoritmo en sí.

De esta manera, estos algoritmos han demostrado tener un buen funcionamiento, sin embargo, debido a su aparente antigüedad y por la gran cantidad de datos que se pueden generarse actualmente Chen, et al. (2014), estos han comenzado a quedar obsoletos. Por tal motivo, se propone una modificación al algoritmo Hill Climbing.
Actualmente existen algoritmos de búsqueda como Beam Valente and Alves (2005), Best First Search, Branch & Bound, A*, etc Aljazzar and Leue (2011), Szer et al. (2012). Así como también heurísticas específicas para problemas como en ingeniería industrial, donde además el uso de una buena heurística es fundamental para que el algoritmo pueda tener un buen desempeño Ribas and Companys (2015), Shoja, et al. (2019), Basso et al. (2019). En este artículo se propone un algoritmo basado en Hill Climbing con una heurística basada en Manhattan y probado en 8-Puzzle.
Hill Climbing hace uso de los estados operadores donde a partir de un estado inicial, se busca llegar al estado final. Para lo cual se hace uso de una heurística la cual le permite elegir el mejor camino para cumplir su objetivo.

Una búsqueda ciega tiene el problema de tener que buscar en todo el árbol, lo cual hace que sea una búsqueda por fuerza bruta y el tiempo junto con el espacio necesario sea demasiado. Por ejemplo, un árbol con un factor de ramaje de 10 y con una velocidad de 1000 nodos por segundo, para buscar en un árbol con profundidad de 14, la agenda necesitaría 1111 Terabytes y 3500 años para completar la búsqueda.

2. ALGORITMOS DE BÚSQUEDA

2.1 Algoritmo de Escalada Simple

El algoritmo de búsqueda de Escalada Simple (*Hill Climbing HC*) es un método de búsqueda clásica sin adversarios dentro de los métodos de búsqueda informada. El algoritmo se describe de la siguiente manera:

1. Crear una lista y agregar el nodo raíz
2. Comparar si el primer elemento de la lista es el elemento buscado
   a. Si es el elemento buscado termina la búsqueda
   b. Si no es el elemento buscado genera sus estados hijos y elimina el primer elemento
      i. Ordenar los estados hijos
      ii. Agregar los estados hijos al inicio de la agenda
      iii. Regresar al paso 2.

Para este algoritmo se deben de tomar las siguientes consideraciones:

- La profundidad debe de ser definida a una profundidad máxima
- Los hijos se ordenan de acuerdo con la heurística que se esté utilizando

- Los estados visitados no pueden volver a visitarse
- Si la agenda supera los 3000 elementos se debe de reportar fracaso
- Si la búsqueda ha tardado más de 10 minutos se debe de reportar fracaso

Dado el siguiente árbol en donde cada nodo representa el valor de la heurística, la agenda quedaría representada como se muestra en la Figura 1.

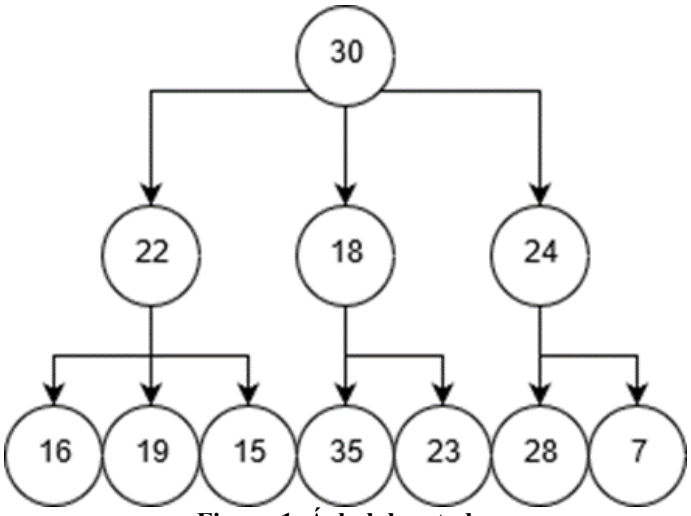


Figura 1. Árbol de estados

1. [30]
2. [18,22,24]
3. [23,35,22,24]
4. [35,22,24]
5. [22,24]
6. [15,16,19,24]
7. [16,19,24]
8. [19,24]
9. [24]
10. [7,28]
11. [28]
12. []

2.2 Búsqueda en profundidad iterativa

Este algoritmo de búsqueda en profundidad iterativa (*Iteritve Deepening Search IDS*) realiza una búsqueda similar a como lo hace *Hill Climbing*, pero utilizando una profundidad incremental. La profundidad comienza en un valor pequeño y comienza a subir hasta alcanzar una profundidad en donde la meta sea alcanzable.

Una de las ventajas de este algoritmo sobre HC, es el hecho de poder encontrar la meta cuando esta se encuentra a poca profundidad sin tener que explorar en profundidades innecesarias. A pesar de que parece que ser que el algoritmo es ineficiente por estar repitiendo la búsqueda, pero cada vez a mayor profundidad realmente funciona y puede reducir en gran medida el tiempo de búsqueda y la memoria.

El algoritmo está dado de la siguiente manera:

1. Comenzar en una baja profundidad como 2 y realizar la búsqueda HC a esta profundidad
2. Realizar la búsqueda HC, si es alcanzada la meta entonces terminar
   a. Si la meta no es alcanzada entonces aumentar la profundad en 1 y regresar al paso 2

Para este algoritmo se deben de tomar las siguientes consideraciones:

- La profundidad incrementara hasta encontrar la meta
- Los hijos se ordenan de acuerdo con la heurística que se esté utilizando
- Los estados visitados no pueden volver a visitarse
- Si la agenda supera los 3000 elementos se debe de reportar fracaso
- Si la búsqueda ha tardado más de 10 minutos se debe de reportar fracaso

3. HEURÍSTICA

Son criterios, métodos o principios para decidir entre algunos cursos de acción para alcanzar el objetivo de la forma más efectiva. Una heurística está representada por un valor numérico el cual representa de cierta manera la "distancia" del estado hasta la meta, este valor es calculado utilizando diferentes métodos como Manhattan.

La importancia de la heurística es tal que sin esta el algoritmo se convierte en una búsqueda por fuerza bruta, por lo cual, para este artículo se propone una modificación de Manhattan.

3.1 Manhattan

La heurística Manhattan consiste en la distancia euclidiana en x,y de la posición actual a la posición deseada. Para demostrar este comportamiento se experimenta con el juego 8-Puzzle, debido a que este presenta un entorno de experimentación fácil de utilizar y por la clara demostración, este Puzzle, presenta una gran cantidad de estados específicamente 9! que son equivalentes a 362880 estados distintos. Una limitante del 8-Puzzle es el hecho de existir estados inalcanzables a partir de un estado dado, por lo cual los posibles estados alcanzables a partir de un estado inicial son equivalentes a 9!/2, que equivalen a 181440 estados posibles partiendo de un estado inicial. Donde para cada elemento del 8-Puzzle se calcula la distancia Manhattan y finalmente se suman las distancias, el resultado es el valor de la heurística para el estado.

8	**3**	**5**
4	**1**	**6**
2	**7**	**0**

Figura 2. Estado

1	**2**	**3**
8	**0**	**4**
7	**6**	**5**

Figura 3. Estado meta

Manhattan calcula la distancia que existe entre su posición en la que se encuentra hasta su posición a la que pertenece. Por ejemplo, considerando la Figura 1 como el estado inicial y la

 ISSN en trámite

Figura 2 como el estado meta, la distancia del número 3 en la Figura 1 obtendría un valor de 1, debido a que se encuentra a un bloque de la posición real del valor como se muestra en la Figura 4.

Estado

8	**3**	**5**
4	1	6
2	7	0

Distancia

	0	1
		2
		3

Manhattan

1	1	2
2	2	2
3	1	2

Figura 4. Funcionamiento de distancia *Manhattan*

4. ALGORITMO Y HEURISTICA PROPUESTA

4.1 Algoritmo propuesto

El algoritmo propuesto es una variante de Hill Climbing. La principal diferencia con HC radica en la ausencia de limitante de profundidad, pero esto genera un problema en la agenda haciendo que la explosión combinatoria llene a la agenda, para evitar esto, se propone limitar a la agenda a solo 100 elementos. Los nodos hijos son ordenados y agregados al inicio. La agenda se comienza a recorrer haciendo que se eliminen los elementos que estén al final de la agenda, esto hace que la agenda no sea de un tamaño inmenso.

El algoritmo está dado de la siguiente manera:

1. Crear una lista y agregar el nodo raíz
2. Comparar si el primer elemento de la lista es el elemento buscado
   b. Si es el elemento buscado termina la búsqueda
   c. Si no es el elemento buscado genera sus estados hijos y elimina el primer elemento
      i. Ordenar los estados hijos
      ii. Agregar los estados hijos al inicio de la agenda
      iii. Acotar la lista a 100 elementos eliminando los últimos
      iv. Regresar al paso 2

Para este algoritmo se deben de tomar las siguientes consideraciones:

- No se definirá la profundidad
- Los hijos se ordenan de acuerdo con la heurística que se esté utilizando
- Los estados visitados no pueden volver a visitarse
- La agenda está limitada a 100 elementos, si esta se llena se eliminan los últimos elementos
- Si la búsqueda ha tardado más de 10 minutos se debe de reportar fracaso

Haciendo que la profundidad no sea determinada y la agenda acotada a 100 elementos la búsqueda comenzara a generar hijos descontroladamente bajo una heurística. Esto hace que el tiempo se reduzca enormemente por que eventualmente llegara a la solución a una profundidad muy alta a diferencia de HC, pero en muchos casos utilizando menos nodos explorados.

Una desventaja que presenta es que, si se desea encontrar el camino más corto, el método propuesto falla rotundamente por la profundidad que representa el número de pasos a diferencia de HC que puede encontrarla en un máximo de pasos (profundidad) que puede ser 55.

4.2 Heurística propuesta

La heurística propuesta es una variación de la heurística Manhattan, a la cual se le multiplica la distancia de cada elemento hasta el elemento vacío o cero, de esta manera el resultado final tendrá un valor extra que representará una heurística de mayor valor.

Tomando en cuenta el estado dado: {8,3,5,4,1,6,2,7,0} representado en la Figura 2, y se desea llegar al estado meta: {1,2,3,8,0,4,7,6,5} representado en la Figura 3:

Para cada elemento del estado se obtiene la distancia a 0 y finalmente se suman todos los elementos para obtener la heurística del estado como se muestra en la Figura 5.

Estado

8	**3**	5
4	1	6
2	7	**0**

Distancia a 0

	0	1
		2
		3

Manhattan * Distancia a 0

1*4	1*3	2*2
2*3	2*2	2*1
3*2	1*1	2*0

Figura 5. Funcionamiento de distancia a 0

5. EXPERIMENTACIÓN

Para la experimentación se utilizó una computadora con procesador AMD FX 8350 con 8gb de RAM en Ubuntu 18.04 LTS, el código fue programado en Java 11 LTS. Se probaron 100 casos distintos generados aleatoriamente utilizando 55 movimientos. Donde cada caso parte del estado que se busca, en este caso se parte del estado que se muestra en la Figura 3. Se realizan 55 movimientos aleatorios para obtener el estado resultante, esto se repite 100 veces para generar los 55 estados iniciales para las pruebas en la búsqueda.

El tiempo fue medido utilizando la función System.nanoTime() de java, la cual retorna el tiempo que lleva ejecutado el programa en nanosegundos. Para obtener el tiempo se obtuvo el tiempo antes de comenzar la búsqueda y se detuvo una vez encontrada la meta o cuando este fracase.

Los 100 casos fueron ejecutados uno tras otro sin interrupción dentro del programa, fueron leídos de un archivo txt y procesados para darle el formato deseado y realizar la búsqueda.

5.1 Experimentación con algoritmo propuesto con heurística propuesta y Manhattan

Los resultados obtenidos por el algoritmo propuesto utilizando la heurística propuesta y Manhattan se muestran en la Tabla 1:

En la Tabla 1 se muestran los resultados acumulados, En este caso considerando el algoritmo propuesto PR se muestra en color verde el mejor caso, en este caso el método propuesto más la heurística propuesta fue el que obtuvo el mejor resultado habiendo visitado en promedio la mitad de nodos y a la mitad de profundad. Respecto al tiempo fue alrededor de 5 veces más rápido.

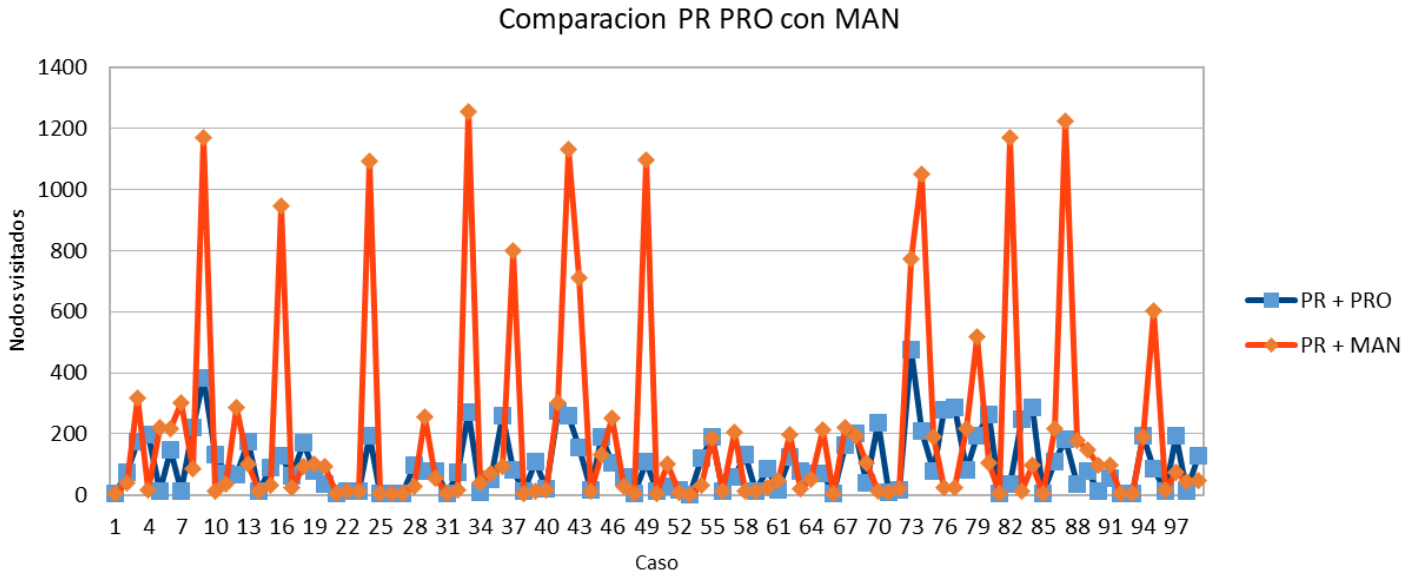


Figura 6. Grafica con la comparación de Heurística propuesta (azul) y Manhattan (naranja) respecto a nodos visitados con PRO

 ISSN en trámite

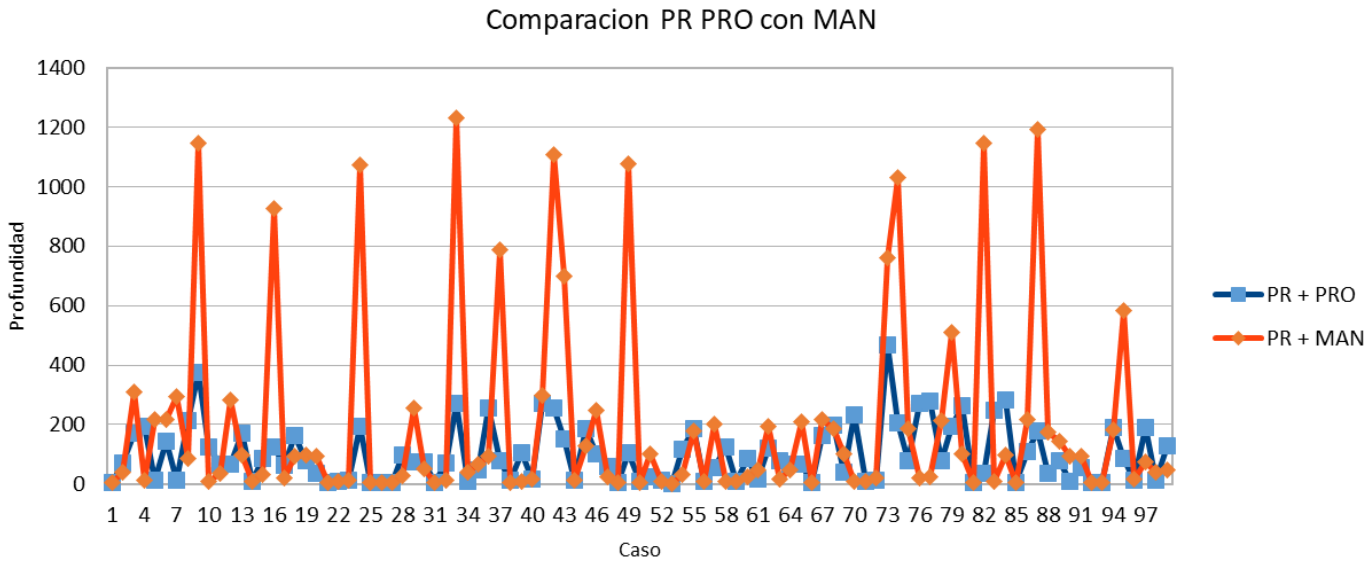


Figura 7. Grafica con la comparación de Heurística propuesta (azul) y Manhattan (naranja) respecto a profundidad alcanzada con PRO

En la Figura 6 se muestra el comportamiento de la búsqueda alrededor de los 100 casos, mientras que la heurística propuesta tiene un comportamiento más suave al mantenerse en un margen menor a los 200 nodos visitados. Por otro lado, Manhattan genera picos en donde la búsqueda toma hasta 1200 o más nodos en la búsqueda.

En la Figura 7 se muestra el comportamiento de la profundidad máxima alcanzada, visualmente se ven iguales y esto se debe a que el algoritmo genera el primer hijo y continúa bajando sin detenerse hasta encontrar el nodo buscado, esto provoca que la profundidad sea similar a los nodos visitados. En la Tabla 1 se muestran los promedios de Nodos visitados y profundidad y se observa que ambos números son muy cercanos.

5.2 Experimentación con algoritmo Búsqueda en profundidad iterativa con heurística propuesta y Manhattan

En la Tabla 1 considerando únicamente los resultados utilizados con Búsqueda en profundidad iterativa (IDS), se muestran los resultados obtenidos con el algoritmo IDS con la heurística propuesta y Manhattan. Los experimentos fueron realizados con los mismos estados que con los que se experimentó con el algoritmo propuesto.

La heurística propuesta cuando es aplicada al método IDS este tiene un menor desempeño que el algoritmo propuesto, pero logra un mejor tiempo en promedio que con la heurística Manhattan.

 ISSN en trámite

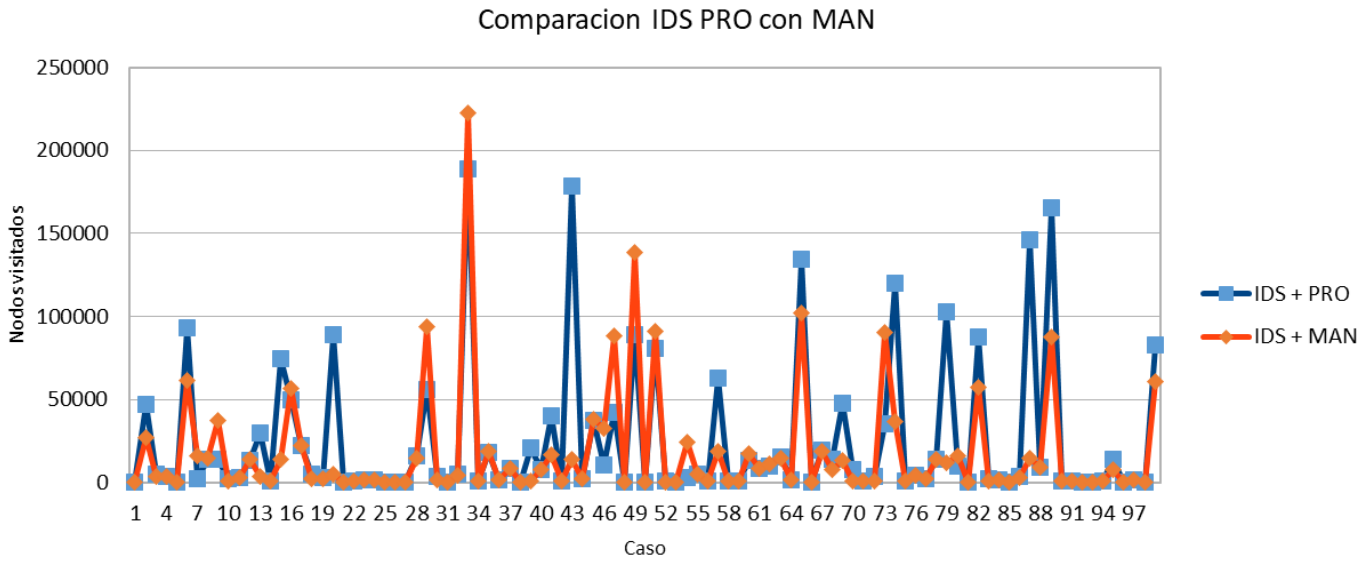


Figura 8. Grafica con la comparación de Heurística propuesta (azul) y Manhattan (naranja) respecto a nodos visitados con IDS

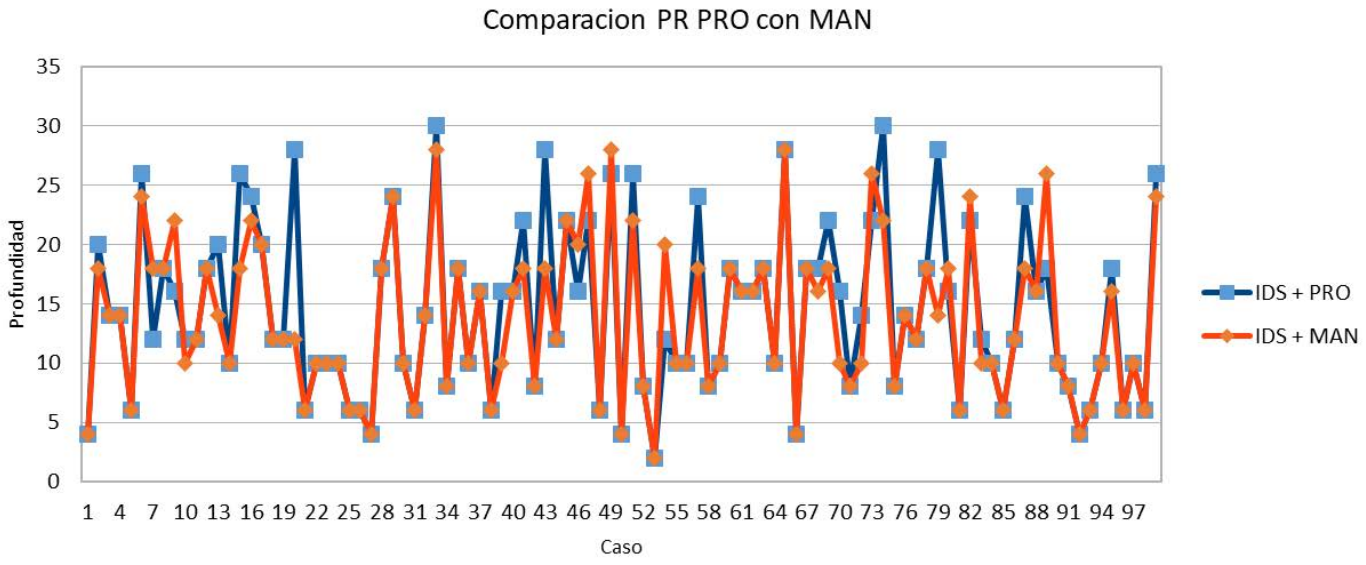


Figura 9. Grafica con la comparación de Heurística propuesta (azul) y Manhattan (naranja) respecto a profundidad alcanzada con IDS

En la Figura 8 se muestra una comparación grafica del comportamiento del método IDS con ambas heurísticas en donde se muestra que ambas heurísticas tienen un comportamiento muy similar y la heurística propuesta (azul) tiene picos más altos lo que representa que busca en más nodos respecto a Manhattan.

En la Figura 9 se muestra el comportamiento de la profundidad en donde se muestra que varias ocasiones ambas heurísticas coincidían, pero regularmente la propuesta obtenía una profundidad mayor.

Cabe mencionar que el método IDS en algunos casos alcanzo la meta en muy pocos nodos y profundidades de 5 o menos, pero en otras ocasiones alcazaba una profundidad de aproximadamente 25 en donde el número de nodos visitados es enorme, por lo tanto, mostrar el promedio no da una fiel referencia del tiempo requerido por estado a diferencia del método propuesto que regularmente todos los nodos los alcanza en un tiempo similar.

5.3 Búsqueda en profundidad iterativa vs algoritmo propuesto

La Tabla 1 muestra una comparación de los resultados de las experimentaciones realizadas en donde se muestra en verde el mejor puntaje y en rojo el peor puntaje en cada sección.

Tabla 1. Comparación entre el algoritmo IDS utilizando las heurísticas Manhattan (MAN) y Propuesta (PRO)

	Nodos	Profundidad	Tiempo ms
PR + PRO	102.43	99.9	1.14
IDS + PRO	24343.8	14.38	1,980.90
PR + MAN	204.31	199.86	6.48
IDS + MAN	17572.34	13.64	2,014.86

Por la naturaleza de los datos obtenidos no es posible generar graficas comparativas con los resultados puesto que las distancias entre los resultados resultan complicadas visualizar debido que por ejemplo en el tiempo, mientras que PR + PRO es de 1 ms, IDS + MAN es de 2014 ms, por lo cual es alrededor de 2000 veces mayor, para tener una referencia en graficas están las figuras 5,6,7 y 8, en las cuales se muestran las comparaciones gráficas.

El algoritmo propuesto es mucho mejor para encontrar la solución en el menor tiempo posible, pero con una mayor profundidad mientras que IDS es el mejor para encontrar el camino más corto, pero demora más tiempo.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Una vez realizadas las experimentaciones y comparaciones anteriores, podría considerarse que bajo diferentes estándares o posiblemente en general el algoritmo con propuesta obtiene mejores resultados, mientras que el método IDS tiene un mejor desempeño cuando se utiliza la heurística Manhattan.

Ambos métodos son diferentes, puesto que si se desea encontrar la solución en el mejor tiempo posible es mejor utilizar el algoritmo propuesto puesto que en promedio tarda tan solo 1ms en encontrar la solución, pero con el problema de generar un camino muy largo, de lo contrario si se busca encontrar el camino más corto es más efectivo utilizar el método IDS puesto que encuentra la solución en una pequeña profundidad de en promedio 13 nodos.

Se continuará experimentando con el algoritmo y heurística propuesta, realizando más comparaciones con algoritmos más complejos y con un escenario más grande que el 8-Puzzle. Bajo este escenario, el 8-Puzzle tiene un desempeño no necesariamente mayor, pero si logra ganar en algunos aspectos, no obstante, aún puede tener problemas con árboles mucho más grandes.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Tecnológico Nacional de México, al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). J. Andres Arizmendi S. agradece a CONACYT por la beca concedida para la realización de sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

Alajmi, N,B., Ahmed K. H., Finney, S. J. Williams B. W. (2011). Fuzzy-Logic-Control Approach of a Modified Hill-Climbing Method for Maximum Power Point in Microgrid Standalone Photovoltaic System. *IEEE Transactions on Power Electronics,* volume (26), pp. 1022-1030.

Aljazzar, H. and Leue, S. (2011). K∗: A heuristic search algorithm for finding the k shortest paths. *Artificial Intelligence,* volume (175), pp. 2129-2154.

Basso, F., Epstein, L. D., Pezoa R. and Varas, M. (2019). An optimization approach and a heuristic procedure to schedule battery charging processes for stackers of palletized cargo. *Computers & Industrial Engineering,* volume (133), pp. 9-18.

Chen, M., Mao, S. and Liu, Y. (2014). Big Data: A Survey. *Mobile Networks and Applications,* volume (19), pp. 171-209.

Judea Pearl. (1988). Heuristics. University of California: Addison-Wesley.

Liu, F., Kang, Y., Zhang, Y and Duan, S. (2008). Comparison of P&O and hill climbing MPPT methods for grid-connected PV converter. *2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications.*

Shoja, A., Molla-Alizadeh-Zavardehi, S. and Niroomand, S. (2019). Adaptive meta-heuristic algorithms for flexible supply chain network design problem with different delivery modes. *Computers & Industrial Engineering,* volume (138), pp. 106107.

Szer, D., Charpillet, F. and Zilberstein, S. (2012). MAA*: A Heuristic Search Algorithm for Solving Decentralized POMDPs.

Ribas, I., and Companys, R. (2015). Efficient heuristic algorithms for the blocking flow shop scheduling problem with total flow time minimization. *Computers & Industrial Engineering,* volume (87), pp. 30-39.

Tsamardinos, I., Brown, L. E and Aliferis C.F. (2006). The max-min hill-climbing Bayesian network structure learning algorithm. *Machine Learning,* volume (65), pp. 31-78.

Valente, J. M. S., and Alves, R. A. F. S. (2005). Filtered and recovering beam search algorithms for the early/tardy scheduling problem with no idle time. *Computers & Industrial Engineering,* volume (48), pp. 363-375.

Evaluación Objetiva de Descriptores Visuales del Estándar MPEG-7 en la Recuperación de Imágenes

K. Salvador Aguilar Domínguez, Manuel Mejía Lavalle

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

Resumen: En este trabajo se implementaron métricas de evaluación para los descriptores MPEG-7 presentes en LIRe y se propuso un ajuste para la métrica sugerida por el estándar, con la finalidad de obtener una evaluación objetiva de los descriptores y mejorar la evaluación realizada considerando la cantidad de imágenes recuperadas evitando así castigar la recuperación por ello. Los resultados mostraron cual descriptor presentó una mejor recuperación por si solo y la diferencia entre la evaluación con las diferentes métricas y el ajuste propuesto., la cual aparenta ser una buena alternativa de evaluación para casos donde las imágenes recuperadas sean menores a la clase de la consulta.

Palabras clave: MPEG-7, Descriptores, CBIR, Multimedia.

1. INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de archivos multimedia está aumentando; por lo tanto, surge la necesidad de filtrar eficientemente, buscar e identificar información visual similar (J. M. Martínez, 2004). *Moving Picture Experts Group* (MPEG) desarrolló el estándar MPEG-7 (interfaz de descripción de contenido multimedia) para resolver este problema y sus aplicaciones son variadas, como(Hyun, Kim, & Oh, 2015; Mejía-Lavalle, Pérez Lara, & Ruíz Ascencio, 2013; Pattanaik & G. Bhalke, 2012; Sikora, 2001; Tyagi & Tyagi, 2017; Vertan, Badea, Florea, Florea, & Bădoiu, 2017). Una de las aplicaciones que se están dando a los descriptores visuales de este estándar es en los sistemas de recuperación de imágenes basadas en contenido (CBIR) (Hyun et al., 2015; Pattanaik & G. Bhalke, 2012), sin embargo, a pesar de que el estándar muestra información de estos descriptores, aún faltan evaluaciones objetivas de estos descriptores en la recuperación de imágenes basados en contenido con otros *Datasets* aparte de los que se presenta el estándar.

Aunque el estándar lleva más de 10 años que se presentó, actualmente, todavía se están implementando varios descriptores MPEG-7 para imágenes (Georgescu, Răducanu, & Datcu, 2017), así como para video (Duan et al., 2019) y audio (Lee & Lee, 2018). Del mismo modo, los sistemas CBIR todavía se aplican para resolver muchos problemas y se ha trabajado para mejorarlos como se muestra en (Jabeen et al., 2018), donde se propone una nueva técnica CBIR basada en la fusión de palabras visuales de Características Robustas Aceleradas (SURF) y Descriptores de funciones de REtina *Keypoint* (FREAK) rápidos. Otro ejemplo es (Fadaei, Amirfattahi, & Ahmadzadeh, 2017), este trabajo se centra en un esquema de partición uniforme que se aplica en el espacio de color *Hue*, *Saturation* and *Value* (HSV) para extraer las características del Descriptor de color dominante (DCD); este esquema CBIR, las características DCD se extrajeron inicialmente como características de color, y luego se aplicó una medida de similitud apropiada. Entre otros trabajos que resuelven otros problemas (Dash, Mukhopadhyay, & Das Gupta, 2015; Huang et al., 2018; Mohamadzadeh & Farsi, 2016; Wu, Xiao, & Hong, 2018; Xia, Zhu, Sun, Qin, & Ren, 2018).

A lo largo del tiempo se han creado diversos sistemas CBIR, que implementan descriptores del estándar. Uno de ellos es LIRe (Lux & Marques, 2013), que implementa tres descriptores del estándar. Sin embargo, aunque este sistema los implementa carece de una métrica de evaluación para realizar una comparación objetiva entre descriptores. La Sección 3 muestra más información sobre LIRe.

En el presente trabajo se implementa una evaluación objetiva de estos tres descriptores de LIRe y una propuesta de mejora para la métrica *Average Normalized Modified Retrieval Rank* (*ANMRR*) que llamamos *MEPRO*. El artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se explica el estándar MPEG-7; la Sección 3 describe el sistema utilizado LIRe; en la Sección 4 se presentan las métricas utilizadas, junto a la mejora propuesta; la experimentación y resultados obtenidos se presentan en la Sección 5; y finalmente las conclusiones y el trabajo futuro son mencionados en la Sección 6.

2. ESTANDAR MPEG-7

MPEG-7, un estándar desarrollado por la *International Standards Organization* (ISO) y la *International Electrotechnical Commission* (IEC). MPEG-7 describe el contenido multimedia en varios niveles, que incluyen características, estructura, semántica, modelos, colecciones y otros metadatos inmutables relacionados con la descripción

multimedia. Su objetivo es permitir una indexación, búsqueda y filtrado rápido basado en su contenido. El alcance normativo de MPEG-7 incluye esquemas de descripción (DS), descriptores (Ds), lenguaje de definición de descripción (DDL) y esquemas de codificación (CS). MPEG-7 estandariza la sintaxis y la semántica de cada DS y D para permitir la interoperabilidad. Sin embargo, la extracción y el uso de descripciones no están definidos por el estándar. Como resultado, los métodos, algoritmos y sistemas para el análisis de contenido, extracción de características, anotación y autoría de descripciones de MPEG-7 están abiertos a la competencia de la industria y la innovación futura. Del mismo modo, los métodos, algoritmos y sistemas de búsqueda y filtrado, clasificación, consulta compleja, indexación y personalización también están abiertos a la competencia de la industria y la innovación futura. El estándar MPEG-7 consta de varias partes. Las partes especifican las construcciones básicas del estándar de descripción de contenido multimedia y proporcionan información sobre la implementación, extracción y uso de descripciones MPEG-7. (Tyagi & Tyagi, 2017).

Partes del Estándar

El estándar MPEG-7 se compone de ocho partes diferentes, cada una de las cuales especifica un aspecto diferente del estándar. Las partes se dan de la siguiente manera:

1. *Systems.* Especifica las herramientas que serán necesitadas para especificar los descriptores.
2. *Description Definition Language*. Especifica el lenguaje para definir nuevas descripciones de esquemas.
3. *Visual*. Especifica los descriptores para describir la parte visual del material.
4. *Audio*. Especifica los descriptores para describir la parte de audio del material.
5. *Generic Entities and Multimedia Description Schemes (MDS).* Especifica los descriptores con la descripción genérica multimedia.
6. *Reference Software*. Aquí se especifican algunas herramientas experimentales de software para llevar a cabo la descripción del contenido.
7. *Conformance Testing*. Define guías para probar la conformidad con MPEG-7.
8. *Extraction and Use of MPEG-7 Descriptions*. Provee información sobre la extracción y uso de las herramientas para descripción.

Herramientas de descripción visual

Las herramientas de descripción visual MPEG-7 describen datos visuales como imágenes y videos. Las herramientas describen características tales como color, textura, forma, así como, movimiento, localización y caras. Continuación se describen a grandes rasgos la parte de descriptores de color y textura, así mismo, los descriptores aquí utilizados.

Color

Las herramientas de descripción de color describen información de color que incluye espacios de color y cuantización de espacios de color. Se proporcionan diferentes descriptores de color para describir las diferentes características de los datos visuales.

Scalable Color descriptor (*SCD*) es un histograma de color en el espacio de color HSV, que está codificado por una transformación de *Haar*. Su representación binaria es escalable en términos de números de contenedor y precisión de representación de bits en una amplia gama de velocidades de datos. El descriptor de color escalable es útil para la coincidencia y recuperación de imagen a imagen en función de la función de color. La precisión de recuperación aumenta con el número de bits utilizados en la representación.

Color Layout descriptor (*CLD*) representa efectivamente la distribución espacial del color de las señales visuales en una forma muy compacta. Esta compacidad permite la funcionalidad de coincidencia de señal visual con alta eficiencia de recuperación a costos computacionales muy pequeños. Proporciona coincidencia de imagen a imagen, así como una secuencia a secuencia de velocidad ultra alta, que requiere tantas repeticiones de cálculos de similitud. También proporciona una interfaz de usuario muy amigable que utiliza consultas de croquis manuscritas, ya que estos descriptores capturan la información de diseño de la función de color. Las consultas de croquis no son compatibles con otros descriptores de color.

Textura

Los descriptores de textura facilitan la exploración y la recuperación de similitudes en bases de datos de imágenes y videos. Una imagen puede considerarse como un mosaico de texturas homogéneas para que estas características de textura asociadas con las regiones puedan usarse para indexar los datos de la imagen.

Edge Histogram Descriptor (*EHD*) captura la distribución espacial de los bordes en una imagen. Por lo tanto, es útil para hacer coincidir regiones no uniformes que varían espacialmente. Se identifican cuatro bordes direccionales y un tipo de borde no direccional, y su distribución se cuantifica en un histograma de 80 bin. Su eficacia se demuestra en datos de imágenes que no tienen necesariamente una textura homogénea, por ejemplo, imágenes naturales, imágenes de croquis e imágenes prediseñadas.

3. LUCENE IMAGE RETRIEVAL (LIRe)

LIRe se seleccionó de los diferentes sistemas CBIR en la literatura por ser libre, simplicidad e incluir descriptores del estándar MPEG-7. LIRe extrae características de imagen de imágenes ráster y las almacena en un índice de Lucene para su posterior recuperación. Está destinado a desarrolladores e investigadores que desean integrar características de CBIR en sus aplicaciones. Debido a la simplicidad del enfoque (no se necesita una base de datos y solo se necesitan unas pocas líneas de código para integrar LIRe), es una manera fácil de probar las capacidades de los enfoques CBIR clásicos para dominios de aplicación única (Lux & Chatzichristofis, 2008). Actualmente, las siguientes características de imagen están incluidas en LIRe:

1. *Color histograms* en RGB y HSV.
2. Descriptores MPEG-7, *scalable color*, *color layout* y edge histogram.

3. Tamura texture features coarseness, contrast and Directionality.
4. Color and edge directivity descriptor, CEDD.
5. Fuzzy color and texture histogram, FCTH.
6. Auto color correlation feature.

LIRe demo

Además de la biblioteca Java, una aplicación de demostración también forma parte del proyecto LIRe. **demo** ofrece una manera fácil de probar las funciones básicas con datos de imagen arbitrarios (se admiten imágenes PNG y JPEG). LIRe demo permite indexar un conjunto de imágenes y agregar imágenes a un índice existente. Si no se proporcionan imágenes de un repositorio local, se descarga un conjunto de fotos de muestra de *Flickr5*. Luego permite navegar por las imágenes indexadas y emitir consultas, por ejemplo (Lux & Chatzichristofis, 2008).

4. MÉTRICAS

4.1 Métricas tradicionales

Generalmente se usan medidas como*: Precision, Recall, MAP*, *ANMRR* (Lux & Marques, 2013). Para evaluar los resultados obtenidos en un sistema CBIR. A continuación, se describen las métricas utilizadas en este trabajo.

Mean Average Precision (*MAP*)

Esta medida une *Precision* y *Recall*. Esta consta de calcular primero *Average Precision* (*AP*) de cada una de las consultas realizadas. *AP* es definido en la Ecuación 1.

$$AP(q) = |R_i|^{-1} \sum_{k=1}^{n} Par(k) * rel(k) \quad (1)$$

$$rel(k) = \begin{cases} 1 & si\ es\ relevante\ la\ imagen\ en\ la\ posicion\ k \\ 0 & en\ otro\ caso \end{cases} \quad (2)$$

$$MAP = |T|^{-1} \sum_{q=1}^{n} AP(q) \quad (3)$$

Donde $R_{(q)}$ es el total de imágenes en la clase para la consulta q, $Par(k)$ es la precisión de la imagen hasta la posición k. y MAP resulta de la media de todas las consultas donde T es la cantidad de consultas realizadas.

Precision-at-k (P_K)

Es una medida sencilla que es útil cuando se tienen muchas imágenes relevantes en la recuperación, ya que el usuario prestara atención a las primeras márgenes recuperados. Se define por dos ecuaciones en la Ecuación 4 Y 5.

$$P_k = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^{k} r(x_n) \quad (4)$$

$$r(x_n) = \begin{cases} 1 & si\ x_n\ es\ relevante \\ 0 & en\ otro\ caso \end{cases} \quad (5)$$

Donde k es un parámetro para ajustar que indica la cantidad de imágenes recuperadas a considerar normalmente establecido en 10 (Lara, Lux, & Mejía-Lavalle, 2015; Lux & Marques, 2013) y x_n la imagen recuperada en la posición n.

Average Normalized Modified Retrieval Rank (*ANMRR*)

Es la medida oficial usada y desarrollada por el grupo MPEG para medir el desempeño de los algoritmos (Ndjiki-Nya et al., 2000). Esta medida se define por 6 ecuaciones que se enlistan a continuación:

$$Rank(k) = \begin{cases} Rank(k) & si\ Rank(k) \leq K(q) \\ 1.25 * K(q) & si\ Rank(k) > K(q) \end{cases} \quad (6)$$

$$K(q) = \min \{4 * R_{(q)}, \quad 2 * \max [R_{(q)}, \forall q]\} \quad (7)$$

$$AVR(q) = \sum_{k=1}^{R_{(q)}} \frac{Rank(k)}{R_{(q)}} \quad (8)$$

$$MRR(q) = AVR(q) - 0.5 * \left[1 + R_{(q)}\right] \quad (9)$$

$$NMRR(q) = \frac{MRR(q)}{1.25 * K(q) - 0.5 * \left[1 + R_{(q)}\right]} \quad (10)$$

$$ANMRR = \frac{1}{T} \sum_{q=1}^{T} NMRR(q) \quad (11)$$

Donde el Rank (Ecuación 6) es asignado de acuerdo a la posición en que fue recuperada la imagen y K(q) (Ecuación 7). AVR(q) es el Rank promedio para la consulta (Ecuación 8), MRR es el ranking de recuperación modificado (Ecuación 9). NMRR(q) el valor MRR(q) normalizado (Ecuación 10) y finalmente *ANMRR* es el promedio de NMRR(q) para todas las consultas (Ecuación 11).

4.2 Métrica propuesta (*MEPRO*)

La métrica *ANMRR* a pesar de ser una de las más utilizadas en la literatura, llega a castigar cuando las imágenes recuperadas

 ISSN en trámite

son menores a la clase es decir $R_{(q)}>A_{(q)}$, donde $A_{(q)}$ es la cantidad de imágenes recuperadas. Ya que en el caso donde todas las imágenes recuperadas pertenecieran a la clase no obtendría el 0, impidiendo que se obtenga una evaluación correcta de esa consulta. Para resolver esto se propone ajustar $R_{(q)}$ como se muestra en la Ecuación 12. Antes de aplicar la métrica a lo que llamamos *MEPRO*.

$$R_{(q)} = \begin{cases} R_{(q)} & si\ R_{(q)} \leq A_{(q)} \\ A_{(q)} & en\ otro\ caso \end{cases} \quad (12)$$

esto da como resultados una evaluación que permite obtener 0 a pesar de que la cantidad de imágenes recuperadas sea menor que la de la clase, sin embargo, se tiene que hacer un pequeño calculo más y podría verse afectada si la cantidad de imágenes en una clase es demasiado grande en comparación a las imágenes recuperadas.

5. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS CONSEGUIDOS

Para los experimentos se utilizó el sistema LIRe demo usando los tres descriptores del estándar que ofrece en búsqueda, *SCD*, *CLD* y *EHD* dos descriptores de color y uno de textura. Se utilizó un *Dataset* encontrado en la literatura actual Corel Dataset-10k. El *Dataset* está compuesto por 10, 800 imágenes con un tamaño de 80 * 120 pixeles agrupadas en 80 clases distintas.

En los resultados mostrados se utilizaron 20 consultas aleatorias de diferente clase cada consulta y se utilizaron las mismas para cada descriptor consiguiendo un total de 60 consultas. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos evaluando con la métrica *MAP, P_k* con *k=10* considerando que los usuarios revisan principalmente los primeros 10 resultados, *ANMRR y ANMRR* con el ajuste propuesto que llamaremos *MEPRO*. Resaltando que *MAP* y P_k reconoce como mejor resultados el valor cercano a uno; *ANMRR* y *MEPRO* a la inversa mientras más cercano a *0* mejor. En la Tabla se marcan con negritas el mejor resultado y en itálicas el peor resultado. Los datos de la Tabla se muestran de manera gráfica en la Fig. 1. Y Fig. 2.

Tabla 1. Resultados de evaluación

Métrica	SCD	CLD	EHD
MAP	*0.017*	**0.044**	0.032
Pat_k	*0.250*	**0.637**	0.330
ANMRR	*0.972*	**0.939**	0.953
MEPRO	*0.810*	**0.410**	0.717

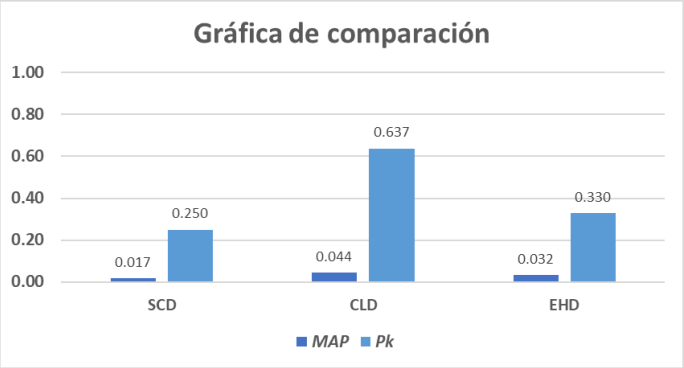


Fig. 1 Gráfica de comparación de resultados *MAP* y P_k

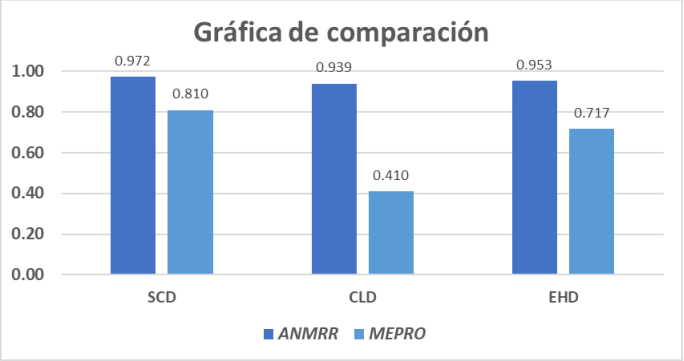


Fig. 1 Gráfica de comparación de resultados *ANMRR* y *MEPRO*

Uno de los resultados de recuperación para *SCD*, *CLD* y *EHD* se muestra en las Fig. 4, 5 y 6; respectivamente. Donde se pueden observar las imágenes recuperadas por cada descriptor utilizando la misma imagen de consulta Fig. 3.



Fig. 3 Imagen de consulta

Los experimentos nos muestran que en las cuatro métricas *CLD* aparentemente entrega mejores resultados por si solo que *SCD* y *EHD*. esto implica que *MEPRO* no varía en comparación a las otras métricas y presentó un comportamiento muy parecido a P_k, que podría deberse a que los casos donde el descriptor obtiene una recuperación buena las 10 primeras que evalúa P_k son evaluadas muy parecido a *MEPRO* ya que del mismo modo presentará pocos errores.

ISSN en trámite



Fig.4 Imágenes recuperadas usando *SCD*

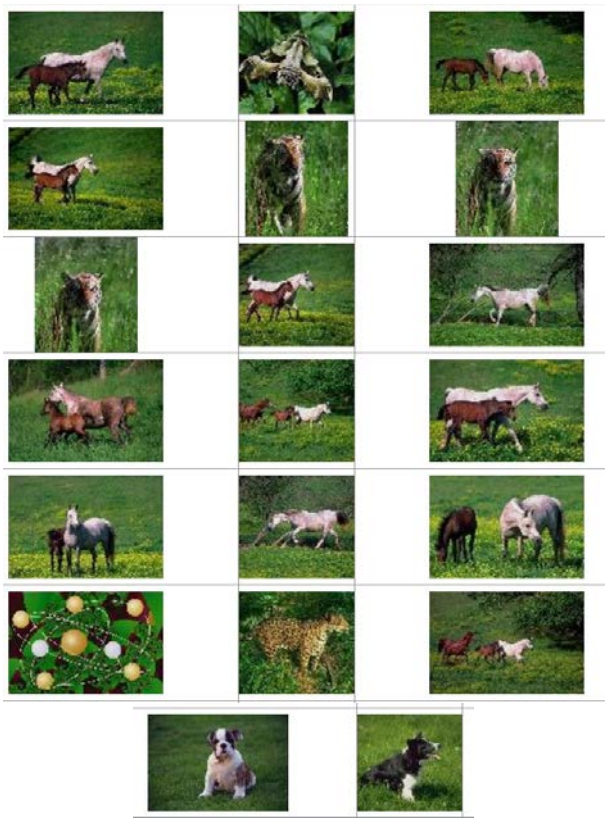


Fig. 5 Imágenes recuperadas usando *CLD*

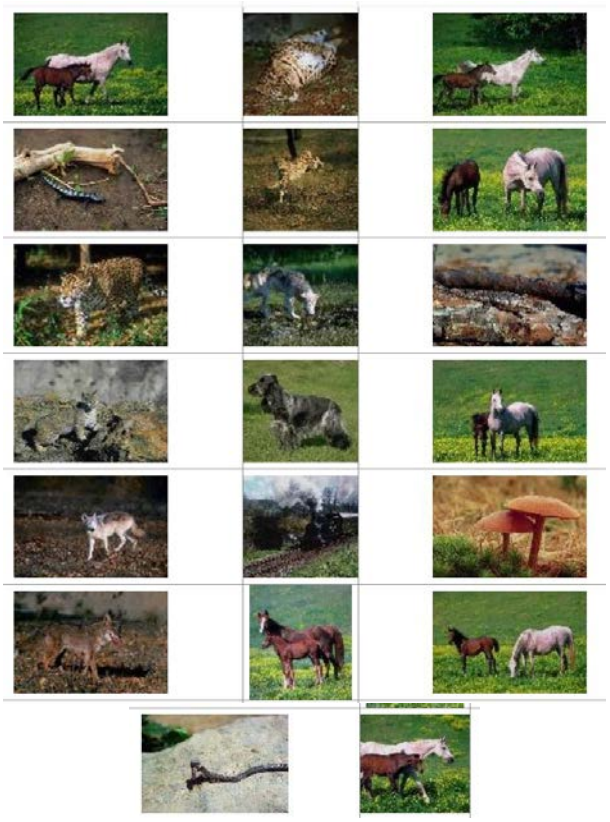


Fig. 6 Imágenes recuperadas usando *EHD*

Otro aspecto encontrado en la evaluación de las métricas, son las imágenes que no están en una clase y contienen gran parte de otra como el caso de la clase sc*_cloud* y *sp_ski* donde se encontraron imágenes en la clase *sp_ski* que contenían más nubes y parte de cielo que alguien practicando esquí (Fig. 7).



Fig. 7 Imagen 225098 de la clase *sp_ski*

Esto afecta la evaluación ya que existen imágenes que bien podrían pertenecer en cierto grado a otra clase, y esto es algo que no consideran las métricas. En los resultados se observó que los descriptores de color se confunden más en especial en imágenes que poseen un fondo de color uniforme o que presentan en mayor medida fondo que el objeto a considerar de la clase, así mismo en imágenes que presentan una gran variedad de colores como lo son las imágenes de personas. Se revisó el *Dataset* a detalle y se encontró que algunas de las clases poseen imágenes muy parecidas tal es el caso de *fitness* la cual entregó muy buenos resultados de recuperación con los descriptores de color ya que la gran mayoría o todas las imágenes contenían una gama de colores muy similar. Algo

similar pasó con *wl_horse* que presenta imágenes muy parecidas Fig. 4, 5 y 6 en la cual en términos generales los tres descriptores hacen una mejor recuperación que en otras consultas.

6. CONCLUSIONES

Se observó que la *MEPRO* evalúa de una manera semejante a P_k y presenta una evaluación considerando la cantidad de imágenes recuperadas a diferencia de *ANMRR* sin alterar el resultado final usando como referencia las otras métricas. En cuanto a los descriptores *CLD* entrega mejores resultados en promedio, sin embargo, estos resultados siguen siendo bajos, a pesar de que un sistema CBIR completo utiliza más de un descriptor mientras mejores resultados obtengan uno de ellos mejores serán en conjunto. Por eso estos descriptores necesitan mejorarse para recuperar imágenes con mayor semejanza a la consulta de una manera más parecida al humano. Así como las métricas no sólo deberían contemplar su clase para evaluar los resultados ya que existen clases que son muy parecidas y darle la misma calificación a una recuperación totalmente errónea a una recuperación con cierta semejanza no parece algo indicado para descubrir que tan buena o pobre es una recuperación. Como trabajo futuro se podrían evaluar los demás descriptores del estándar y utilizar más *Datasets*. Al igual que mejorar los descriptores y métricas de evaluación de los sistemas CBIR observando sus carencias.

7. 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

Dash, J. K., Mukhopadhyay, S., & Das Gupta, R. (2015). Content-based image retrieval using fuzzy class membership and rules based on classifier confidence. *IET Image Processing*, *9*(9), 836–848. https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2014.0299

Duan, L. Y., Lou, Y., Bai, Y., Huang, T., Gao, W., Chandrasekhar, V., … Kot, A. C. (2019). Compact Descriptors for Video Analysis: The Emerging MPEG Standard. *IEEE Multimedia*, *26*(2), 44–54. https://doi.org/10.1109/MMUL.2018.2873844

Fadaei, S., Amirfattahi, R., & Ahmadzadeh, M. R. (2017). New content-based image retrieval system based on optimised integration of DCD, wavelet and curvelet features. *IET Image Processing*, *11*(2), 89–98. https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2016.0542

Georgescu, F. A., Răducanu, D., & Datcu, M. (2017). New MPEG-7 Scalable Color Descriptor Based on Polar Coordinates for Multispectral Earth Observation Image Analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, *14*(7), 987–991. https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2656822

Huang, F., Jin, C., Zhang, Y., Weng, K., Zhang, T., & Fan, W. (2018). Sketch-based image retrieval with deep visual semantic descriptor. *Pattern Recognition*, *76*, 537–548. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.11.032

Hyun, J., Kim, H. K., & Oh, W. G. (2015). Study on performance of MPEG-7 visual descriptors for deformable object retrieval. *2015 Frontiers of Computer Vision, FCV 2015*. https://doi.org/10.1109/FCV.2015.7103701

J. M. Martínez. (2004). MPEG-7 Overview.

Jabeen, S., Mehmood, Z., Mahmood, T., Saba, T., Rehman, A., & Mahmood, M. T. (2018). An effective content-based image retrieval technique for image visuals representation based on the bag-of-visual-words model. *PLoS ONE*, *13*(4), 1–24. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194526

Lara, C. P., Lux, M., & Mejía-Lavalle, M. (2015). Toward Improving Content-Based Image Retrieval Systems by means of Text Detection. *Proceedings - 2014 IEEE International Conference on Mechatronics, Electronics, and Automotive Engineering, ICMEAE 2014*, (i), 50–53. https://doi.org/10.1109/ICMEAE.2014.19

Lee, J., & Lee, J. S. (2018). Music popularity: Metrics, characteristics, and audio-based prediction. *IEEE Transactions on Multimedia*, *20*(11), 3173–3182. https://doi.org/10.1109/TMM.2018.2820903

Lux, M., & Chatzichristofis, S. A. (2008). LIRe: Lucene image retrieval - An extensible java CBIR library. *MM'08 - Proceedings of the 2008 ACM International Conference on Multimedia, with Co-Located Symposium and Workshops*, 1085–1087. https://doi.org/10.1145/1459359.1459577

Lux, M., & Marques, O. (2013). Visual Information Retrieval using Java and LIRE. In U. ofNorth C. at C. Gary Marchionini (Ed.), *Morgan & Claypool*. https://doi.org/10.2200/S00468ED1V01Y201301ICR025

Mejía-Lavalle, M., Pérez Lara, C., & Ruíz Ascencio, J. (2013). The MPEG-7 visual descriptors: A basic survey. *Proceedings - 2013 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering, ICMEAE 2013*, 115–120. https://doi.org/10.1109/ICMEAE.2013.46

Mohamadzadeh, S., & Farsi, H. (2016). Content-based image retrieval system via sparse representation. *IET Computer Vision*, *10*(1), 95–102. https://doi.org/10.1049/iet-cvi.2015.0165

Ndjiki-Nya, P., Restat, J., Meiers, T., Ohm, J.-R., Seyferth, A., & Sniehotta, R. (2000). "Subjective Evaluation of the MPEG-7 Retrieval Accuracy Measure (ANMRR). *ISO/WG11 MPEG Meeting*.

Pattanaik, S., & G. Bhalke, D. (2012). Efficient Content based Image Retrieval System using Mpeg-7 Features. *International Journal of Computer Applications*, *53*(5), 19–24. https://doi.org/10.5120/8418-1092

Sikora, T. (2001). The MPEG-7 visual standard for content description - An overview. *IEEE Transactions on*

Circuits and Systems for Video Technology, *11*(6), 696–702. https://doi.org/10.1109/76.927422

Tyagi, V., & Tyagi, V. (2017). MPEG-7: Multimedia Content Description Standard. *Content-Based Image Retrieval*, (Ddl), 85–100. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6759-4_5

Vertan, C., Badea, M. S., Florea, C., Florea, L., & Bădoiu, S. (2017). MPEG-7 visual descriptors selection for burn characterization by multidimensional scaling match. *2017 E-Health and Bioengineering Conference, EHB 2017*, 253–256. https://doi.org/10.1109/EHB.2017.7995409

Wu, M., Xiao, W., & Hong, Z. (2018). Similar image retrieval in large-scale trademark databases based on regional and boundary fusion feature. *PLoS ONE*, *13*(11), 1–25. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205002

Xia, Z., Zhu, Y., Sun, X., Qin, Z., & Ren, K. (2018). Towards Privacy-Preserving Content-Based Image Retrieval in Cloud Computing. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, *6*(1), 276–286. https://doi.org/10.1109/TCC.2015.2491933

Estudio de Mapeo Sistemático de herramientas utilizadas en el problema de la variedad en Big Data

Ramírez-Gervacio Daniel* Rojas-Pérez Juan Carlos**
Fragoso-Díaz Olivia G.* Santaolaya-Salgado René******

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos;*
Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490.
*Email: *daniel.ramirez18ca@cenidet.edu.mx*
*{**juan.rp, ***olivia.fd, ****rene.ss} @cenidet.tecnm.mx*

Resumen: El constante aumento de información que se genera en la actualidad y el desarrollo de nuevas tecnologías han traído consigo un crecimiento exponencial de nuevos tipos de datos, los cuales son difíciles de procesar con herramientas previas al surgimiento de Big Data. Sin embargo, el mayor problema en el análisis de Big Data no es la gran cantidad de datos (Volumen), sino la dificultad de analizar los diferentes tipos de datos (Variedad). El presente artículo tiene como objetivo evidenciar el estatus en cuanto al uso de herramientas utilizadas en el problema de la variedad en Big Data. Para esto se llevó a cabo un estudio de mapeo sistemático, que inició con una pregunta de investigación principal hasta llegar a la búsqueda, selección y clasificación de estudios relevantes. Este artículo permitirá guiar futuras investigaciones, de tal forma que pueda ser utilizado como referencia de línea base.

Keywords: Big Data, Mapeo Sistemático, Problema de la variedad, Herramientas, Integrated Development Environments (IDE´s).

I. INTRODUCCIÓN

El concepto de Big Data no solo hace referencia a la gran cantidad de datos, sino que se enfoca al tratamiento y análisis de la información, con el objetivo de extraer conocimiento, generar patrones o dar algún valor a los datos que se obtienen para tomar mejores decisiones. (Kościelniak, 2015)

El principal problema en el análisis de Big Data se centra en tres características: el volumen, la velocidad y la variedad de datos, mejor conocidas como las 3V de Big Data, las cuales no pueden ser procesadas con medios convencionales.

El "volumen" hace referencia a la cantidad de datos que se generan de forma exponencial, la "velocidad" describe a los datos que se generan de forma continua y acelerada, y por último está la "variedad" que se refiere a los datos que provienen de diferentes tipos de fuentes, haciendo que exista una diversidad en su tipo y formato. (McAfee, 2012)

En este contexto, el problema principal del análisis de Big Data es la dificultad de procesar los diferentes tipos de datos (variedad), dicha dificultad radica en la diversidad estructural de los datos, centrándose en la gran complejidad y multitud de fuentes, así como la combinación y diversidad de múltiples formatos, estructuras y lenguajes. (Pathak, 2018)

En la actualidad, las tecnologías y herramientas de Big Data se deben centrar en la integración de datos estructurados y datos no estructurados o semiestructurados, así como la integración de los datos tradicionales de las bases de datos relacionales con los datos no estructurados de las bases de datos analíticas y NoSQL. (Joyanes, 2013)

Los datos estructurados se pueden considerar generalmente como archivos de texto, que están bien organizados, los datos no estructurados son incompletos y de naturaleza desorganizada y por último los datos semiestructurados son una mezcla de los dos anteriores y no presentan una estructura perfectamente definida como los datos estructurados pero si presentan una organización definida en sus metadatos donde describen los objetos y sus relaciones. (Mishra, 2017)

En este artículo se presentan los resultados del estudio del mapeo sistémico dividiéndolo en las siguientes secciones: Metodología de Investigación (Sección II), donde se describe el alcance de los procesos que fueron llevados a cabo durante el estudio. Resultados (Sección III), que corresponde a la sección principal del reporte y presenta los datos obtenidos en la aplicación del estudio. Finalmente, se presentan las conclusiones (Sección IV) a las que condujo el estudio y las referencias (Sección V).

II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con (Misra, 2016) un estudio de mapeo sistemático, (también denominado estudio de alcance), es una revisión amplia de los estudios primarios en un área o temática específica que tiene como objetivo identificar qué evidencia está disponible sobre el tema.

Los pasos fundamentales para llevar a cabo el proceso del mapeo sistemático son los siguientes: (1) Definir un objetivo principal y establecer las preguntas de investigación, (2) Conducción de la búsqueda, (4) Selección de estudios y (5) Extracción y Síntesis de la información. Cada paso del proceso tiene un resultado, el resultado final del proceso es el mapeo sistemático.

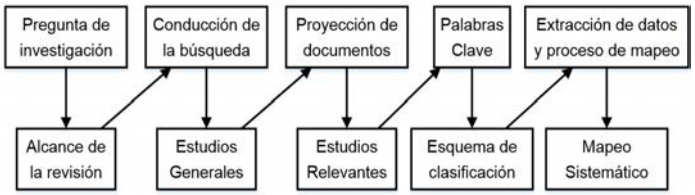


Figura 1. Proceso de mapeo sistemático. Tomado de (Petersen, 2008)

A) Definir la pregunta de investigación

La definición de la pregunta de investigación es el primer paso antes de iniciar el estudio. En este caso es llevar a cabo una clasificación y análisis de las herramientas o IDE´s usados en el problema de la variedad en sistemas Big Data para evidenciar y definir una guía para trabajar con los diferentes tipos de datos.

Para la formulación de la pregunta de investigación se revisó y aplicó la técnica PICO descrita en (Kitchenham, 2007), de la siguiente forma:

- Population (Definición del problema): Estudios publicados sobre herramientas utilizadas en el problema de la variedad en Big Data.
- Intervention (Por palabras clave): desarrollo, uso o implementación de herramientas utilizadas en el problema de la variedad.
- Control: Criterios de inclusión y exclusión de artículos en el contexto de herramientas y Big Data.
- Outcome: Listado de evidencias concretas sobre IDE´s o herramientas utilizados en el procesamiento de los diferentes tipos de datos.

De esta manera, se definió la siguiente pregunta de investigación (**SQ**, Search Question):

SQ1= ¿Qué herramientas o IDE´s son utilizados para abordar el problema de la variedad en Big Data?

Esta pregunta busca obtener la mayor evidencia posible sobre la implementación o aplicación de cualquier *herramienta* o *IDE* relacionada con el problema de análisis y proceso de los diferentes tipos de datos que existen en Big Data. La idea principal es encontrar la mayor cantidad de herramientas posibles, conocer sus aplicaciones, procesos, ventajas y desventajas, compararlas entre ellas, en el contexto de proceso y análisis de datos.

B) Selección de fuentes

Las fuentes utilizadas en el estudio fueron las siguientes bibliotecas digitales: ACM digital library, IEEE Xplore, ScienceDirect, JSTOR y SpringerLink. Los criterios de selección utilizados en este estudio fueron la disponibilidad de acceso a estas bibliotecas y el hecho de ser referentes en Ciencias de la Computación. Con respecto a la disponibilidad, el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet) tiene un convenio con Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica (CONRICYT) para el acceso a los recursos mencionados.

En la Tabla 1 se muestra el resumen de las fuentes seleccionadas.

Tabla 1. Información de las fuentes seleccionadas

Fuente	Dirección URL
Acm Digital Library	*https://dl.acm.org/*
ScienceDirect	https://www.sciencedirect.com/
IEEE Xplore	https://ieeexplore.ieee.org
JSTOR	https://www.jstor.org/
SpringerLink	https://link.springer.com/

C) Estrategia de Búsqueda

Para la búsqueda de los estudios relevantes en las fuentes seleccionadas se utilizó el proceso mencionado en (Petersen, 2008) con los pasos representados en la Figura 1 y descritos a continuación:

1. Palabras Clave

A partir del objetivo y la pregunta de investigación se obtuvieron las siguientes palabras clave: Variedad, Herramientas y Big Data.

2. Sinónimos y combinación de palabras relacionadas

Se buscaron y generaron sinónimos para las palabras clave en idioma inglés. Los sinónimos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Palabras clave y sus sinónimos/ combinación

Palabras clave	Sinónimos
Tools	IDE
	Combinación de palabras
Variety	Variety Problem
Big Data	Big Data System

3. Cadena de búsqueda

Se organizó la cadena de búsqueda (**SQ**, *Search Question*) con las palabras clave utilizando los operadores OR para sinónimos o alternativas, AND para combinar las palabras clave y NOT para exclusiones o negaciones.

***SQ**= (Tools OR IDE) AND (variety OR variety problem) AND (Big Data OR Big Data Systems)*

4. Generación de la búsqueda en las librerías digitales seleccionadas

La cadena de búsqueda generada fue ajustada según el formato de cada fuente para su posterior aplicación en las mismas. Cabe resaltar que en este punto se aplicaron los siguientes criterios de inclusión: Años [2014,2019]; Tipos de publicación {Papers, Journals, Conference Proceedings}; Idioma {inglés}; Acceso a Abstract y Keywords {Sí}. En la Figura 2 se muestra la búsqueda realizada sin ajustes, las cuales arrojaron 79,599 estudios inicialmente.

D) Criterios de Inclusión y Exclusión

Para la selección final de los estudios, se definieron los criterios de inclusión y exclusión que se muestran en la Tabla 3, con los cuales se excluyeron estudios no relevantes o que no respondieron a alguna de las preguntas de investigación.

Tabla 3. Criterios de Inclusión y Exclusión

Tipo	Criterio
Inclusión	• Artículos publicados entre los años 2014 y 2019 • Artículos publicados en Journals y Conference Proceedings • Artículos escritos en idioma inglés • Artículos que tengan acceso a la revisión de abstract y keywords mínimo • Artículos que aborden el problema de variedad en Big Data • Artículos que permitan evidenciar el problema de variedad
Exclusión	• Si se requiere un artículo completo y éste no es accesible por medio del Conricyt será excluido. • Artículos que aborden la variedad, pero sin relación con Big Data • Artículos que no presenten una implementación o aplicación de herramientas para la variedad en el contexto de Big Data. • Artículos que no involucren ninguna característica de este tipo de implementaciones (herramientas, IDE, Variedad y Big Data)

5. Filtrado por criterios de inclusión

Se realizó el proceso de filtrado por criterios de inclusión para cada base de datos tomando en cuenta los criterios mencionados en la Tabla 3. Con este filtrado se llegó a 5,175 estudios. En la Figura 2 se muestra el resultado obtenido por este criterio.

6. Filtrado por criterios de exclusión

Utilizando los criterios de exclusión, se descartaron los estudios que no tenían relevancia al no abordar el objetivo de la pregunta de investigación. Con este filtrado se llegó a 37 estudios relevantes. En la Figura 2 se muestra el resultado del filtrado por el criterio de exclusión.

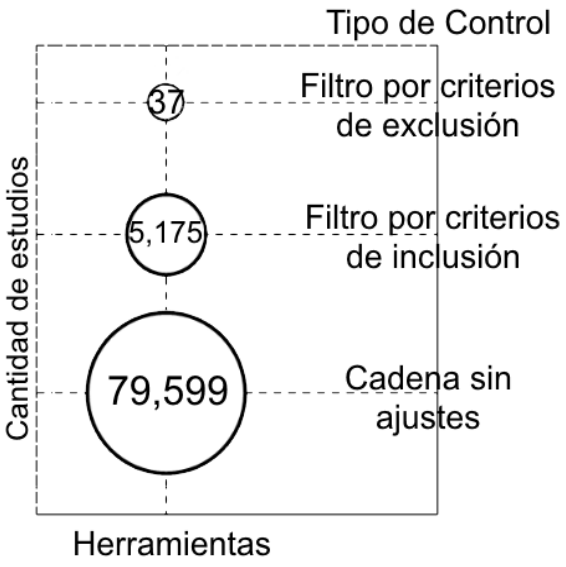


Figura 2. Total de estudios de herramientas

 ISSN en trámite

En la Figura 3 se muestran los resultados que produjo cada librería digital de los cuales 79,599 los representa la cadena general sin ajustes, 5,175 estudios con el filtro por criterio de inclusión y por último 37 estudios que fueron los relevantes para el estudio por medio del filtro por criterios de exclusión.

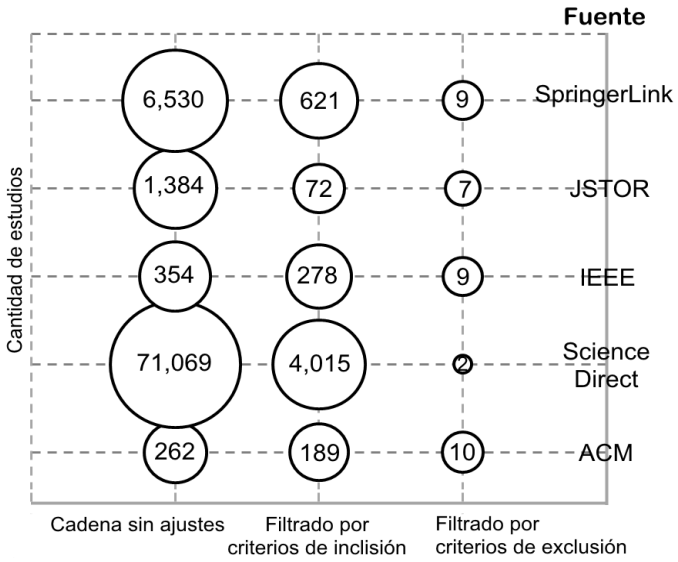


Figura 3. Total de estudios por cada fuente

III. RESULTADOS

Este artículo aporta un panorama general sobre el estudio de las herramientas más utilizadas para abordar el problema de la variedad en Big Data, de las cuales se obtuvieron catorce herramientas que son las más implementadas y mencionadas dentro de la literatura. Algunas de las características que se pueden tomar en cuenta para comparar las herramientas para el procesamiento y análisis de los datos en el contexto de la variedad son: tipo de dato, por ejemplo: estructurados, no estructurados y semiestructurados; el tipo de procesamiento, formato de los datos, licencia, etc.

La Tabla 4 muestra las catorce herramientas que se utilizan para el análisis y procesamiento de los datos. En la tabla 5 se muestra una comparativa entre el tipo de dato que procesa cada herramienta, así como también el formato de datos que están denominados como Clave – Valor (C-V) y Resilient Distributed Datasets (RDD).

Todas estas herramientas dividen el trabajo analítico de datos en sub tareas y eligen otros sistemas adecuados para realizar el procesamiento de la información en función de los tipos de datos, ya que su procesamiento depende si un dato no estructurado requiere ser procesado a otro tipo de dato como puede ser semiestructurado o estructurado.

Tabla 4. Herramientas empleadas en el análisis y procesamiento de datos.

Herramientas de código abierto	Herramientas de Licencia
Apache Hadoop Apache MapReduce Apache Mahout Apache Storm Apache Spark Apache Flink Apache Samza Project Voldemort Hortonworks	EpiC Genus IBM InfoSphere IBM BigSheets Cloudera Big Data Solutions-(Hadoop)

Tabla 5. Comparación de herramientas por características

Herramienta	Formato de datos	Procesamiento	Tipo de datos
Hadoop	C-V	Lotes	Estructurado, Semiestructurado y No estructurado.
Spark	C-V y RDD	Lotes y Stream	Estructurado, Semiestructurado y No estructurado.
Storm	C-V	Stream	Estructurado y No estructurado.
Flink	C-V	Lotes y Stream	Semiestructurados
Samza	C-V	Stream	Semiestructurados
MapReduce	C-V y RDD	Stream	No Estructurados
Mahout	C-V	Lotes	Semiestructurados
Voldemort	C-V	Lotes	Semiestructurado y No estructurado.
Hortonworks	C-V	Lotes y Stream	Semiestructurados
EpiC	C-V y RDD	Híbrido	No Estructurados
Genus	C-V y RDD	Híbrido	Estructurado, Semiestructurado y No estructurado.
IBM InfoSphere	C-V	Lotes y Stream	Estructurado, Semiestructurado y No estructurado.
IBM BigSheets	RDD	Lotes y Stream	Estructurado Y Semiestructurado
Cloudera	C-V	Stream	Semiestructurado

Un resumen del análisis de las herramientas es el siguiente:

Apache Hadoop: es utilizado para el procesamiento de 3 tipos de datos (estructurados, semiestructurados y no estructurados) permitiendo tener un procesamiento por lotes dividiendo los trabajos en pequeñas tareas y distribuyéndolas en un conjunto de máquinas.

Aapche Spark: es utilizado para el procesamiento de los 3 tipos de datos, el procesamiento se basa en Hadoop y MapReduce para separar la información en un formato CSV para representar datos en forma de tabla y en un conjunto de datos distribuidos resilientes(RDD) para distribuir la información, modificarla.

Storm: es utilizado para el procesamiento de los datos estructurados y no estructurados, su procesamiento es con ayuda de Apache ZooKeeper que se basa en la coordinación de procesos distribuidos de una forma similar que Hadoop con la diferencia que el procesamiento es en tiempo real entregando como salida un formato en Texto y XML.

Flink: es utilizado para el procesamiento de los datos no estructurados, el procesamiento distribuido es basado en hadoop en la forma de separar la información en un formato binario mediante HDFS y de esta manera almacenar la información en un almacén de datos con formato Clave - Valor.

Samza: se utiliza para el procesamiento de los datos semiestructurados, la entrada de datos es en tiempo real y realiza el procesamiento distribuido utilizando Hadoop y YARN, para el análisis de los datos se basa en conjunto de tareas que contienen un almacén clave-valor usado para guardar el estado. Como resultado es un almacén en formato de clave – valor.

MapReduce: es utilizado para el procesamiento de los datos no estructurados, el procesamiento que realiza MapReduce en realidad se refiere a dos procesos separados: El proceso Map toma un conjunto de datos y lo convierte en otro conjunto, donde los elementos individuales son separados en tuplas y el proceso Reduce que obtiene la salida del map como datos de entrada y combina las tupias en un conjunto más pequeño de las misma y de esta manera se obtiene un conjunto de datos en formato binario que posteriormente se pueden almacenar dentro de un almacén de datos con formato Clave - Valor.

Mahout: es utilizado para el procesamiento de los datos no estructurados, el procesamiento es basado en la minería de datos basado principalmente en Hadoop extrayendo conocimiento útil a partir de fuentes de datos en bruto apoyándose en la arquitectura Map-Reduce para separar la información en un formato de vectores y un diccionario de términos que luego se podrán utilizar para un agrupamiento en forma clave- valor.

Project Voldemort: es utilizado para el procesamiento de los datos semiestructurados y no estructurados, el procesamiento es distribuido basado en hadoop, los datos se replican automáticamente en varios servidores, y como resultado del procesamiento es un sistema de almacenamiento de datos en formato clave – valor.

Hortonworks: es utilizado para el procesamiento de los datos no estructurados, el procesamiento de datos es mediante múltiples cargas de trabajo a través de una variedad de métodos de procesamiento y análisis de la información en HDFS y de esta manera almacenar la información en un formato binario en HBase.

EpiC: es utilizado para el procesamiento de los datos no estructurados

Genus: es utilizado para el procesamiento de los 3 tipos de datos, el procesamiento es mediante algoritmos de Extracción Transformación y carga para separar la información dando como resultado un formato XML.

IBM InfoSphere: el análisis de los datos puede ser mediante 2 tipos: Lotes y en tiempo real, se utiliza para el procesamiento de los 3 tipos de datos basándose en los procesos ETL (extracción, transformación y Carga) de los datos mediante un lenguaje de consulta declarativa para entregar un formato binario o CSV.

IBM BigSheets: se utiliza para el procesamiento de los datos estructurados y semiestructurados, el procesamiento se basa en almacenar los datos en un sistema de archivos de distribución, utiliza una interfaz que permite analizar los datos mostrando como salida una interfaz gráfica similar a la hoja de Excel.

Cloudera (Hadoop): se utiliza para el procesamiento de los datos semiestructurados, utiliza Apache hadoop para el procesamiento distribuido añadiendo funciones de seguridad, control y gestión mediante un conjunto de herramientas como Sqoop, Flume, Kafka, Hive, apache pig, MR2 y Spark para procesar los datos y obtener un conjunto de archivos en binario para su almacenamiento en formato clave – valor.

IV. CONCLUSIONES

Este artículo aporta un panorama general sobre el estudio de las herramientas más utilizadas para abordar el problema de la variedad en Big Data. Para proporcionar esta visión general se realizó un estudio de mapeo sistemático, con el cual se logró obtener una clasificación de herramientas como se muestra en la Figura 4.

Cabe mencionar que el procesamiento de los datos en el contexto de la variedad es una característica de Big Data que en la actualidad no se ha podido solucionar porque antiguamente los tipos de datos estaban más limitados, se hablaba de enteros, caracteres, cadenas, etc. En la actualidad el tipo de los datos son mucho más variados por ejemplo datos geoespaciales, datos en 3 dimensiones, audio, videos, sensores, texto, datos que se generan en redes sociales de interacciones de usuarios y con esto la variedad de los datos ha crecido en enormes

proporciones donde los sistemas tradicionales no son capaces de almacenar y gestionar estos datos.

Respondiendo a la pregunta principal de este estudio, existen herramientas que nos ayudan a procesar los datos estructurados, semiestructurados y aquellos que no tienen estructura, por ejemplo: En la revisión sistemática la única herramienta que trata las imágenes y videos es Genus, proponiendo que el video se trabaje como una serie de imágenes y transformar los datos obtenidos en formatos XML para poder tener un formato semiestructurado. El texto, bases de datos, tablas y toda la información semiestructurada y estructurada son manejados en su mayoría por las herramientas de Apache (Hadoop, Mapreduce, Spark, Flink, etc.). Utilizando técnicas de optimización, modelos matemáticos, análisis semánticos, minería de datos, etc., y así poder aplicar técnicas de visualización para tener una mejor toma de decisiones.

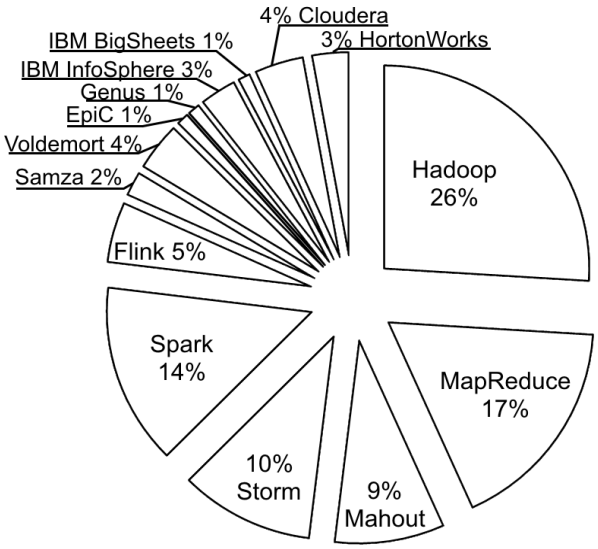


Figura 4. Herramientas más utilizadas en el procesamiento de la variedad en Big Data

Por otra parte, las herramientas más usadas para el análisis de la información de datos estructurados, semiestructurados y no estructurados son Hadoop, MapReduce y Spark, la razón de que éstas herramientas son las más utilizadas es por su forma de procesar los tipos de datos.

Se observó una variedad de herramientas que en su mayoría se basan en el procesamiento distribuido mediante Hadoop junto con el análisis y separación de valores para dar un formato semiestructurado o estructurado con MapReduce, logrando en su mayoría un almacén en formato binario o en formato clave - valor para otros tipos de procesamiento de extracción de conocimiento con un determinado fin, ya sea para patrones de comportamiento, patrones predictivos, modelos de visualización, etc. Esto demuestra la importancia del análisis de la información desde cualquier fuente de información.

De acuerdo al análisis de los diferentes estudios se obtuvo que la mayoría de las herramientas trabajan principalmente con el análisis de las bases de datos, tablas y formatos binarios para los tipos de datos estructurados, para los tipos de datos semiestructurados el análisis de los principales datos son XML, CSV y JASON, por ultimo para los tipos de datos no estructurados los formatos de los datos más analizados son texto, sitios web, datos gráficos y redes sociales.

Existen decenas de herramientas para procesar los datos de Big Data, pero el problema general para abordar la variedad de datos es saber cuál escoger. En este trabajo se describen un conjunto de herramientas para abordar el problema de los diferentes tipos de datos y formatos para llevar a cabo un análisis de la información para poder extraer datos relevantes.

En este estudio se observó que no existe una herramienta o conjunto de herramientas estándar que pueda servir como base única para abordar el problema de la variedad de datos, la diversidad de herramientas y sus alcances son variados. Cada investigador ha propuesto una solución siguiendo diversos criterios. Se espera que este estudio proporcione una guía inicial del panorama del problema de la variedad y en un estudio posterior de revisión sistemática se arrojen resultados más precisos que permitan identificar y caracterizar estas herramientas.

V. REFERENCIAS

Chandarana, P. V. M., 2014. Big Data Analytics Frameworks. IEEE explore, pp. 430-434.

Chen, G. M. R. L. K., 2017. 'A parallel computing framework for big data'. SpringerLink, pp. 608-621.

Dautov, R. D. S., 2017. 'Quantifying Volume, Velocity, and Variety to Support (Big) Data-Intensive Application Development'. IEEE explore, pp. 2843-2852.

Inoubli, W. A. S. M. H. M. M. N. M. E., 2018. 'An experimental survey on big data frameworks'. Elsevier B.V., Volumen 86, pp. 546-564.

Jiang, D. W. S. C. G. C. O. B. T. K. L. X. J., 2015. 'epiC: an extensible and scalable system for processing Big Data'. VLDB Journal, pp. 541-552.

Joyanes, A. L., 2013. 'Big Data: Análisis de grandes volúmenes de datos en organizaciones', México: Alfaomega.

Kitchenham, B. C. S., 2007. 'Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering', Durham: EBSE.

ISSN en trámite

Kościelniak, H. P. A., 2015. 'BIG DATA in decision making processes of enterprises'. Elsevier B.V, Volumen 65, pp. 1052-1058.

Kumar, C. R. T. G., 2016. Big Data and Advanced Analytics Tools. IEEE explore, pp. 1-8.

Mazumder, S., 2016. 'Big Data Tools and Platforms'. ResearchGate, pp. 29-128.

McAfee, A. B. E., 2012. 'Big Data: The Management Revolution'. Harvard Business Review, pp. 1-9.

Mishra, S. M. A., 2017. 'Structured and Unstructured Big Data Analytics'. IEEE explore, pp. 235-240.

Misra, R. P. B. T. M., 2016. 'Big data and ICT applications – A study'. ACM Digital Library, pp. 1-6.

Pathak, S. D. R. R., 2018. 'Adaptive System for Handling Variety in Big Text'. Springer Nature Singapore Pte, Volumen 19, pp. 305-313.

Petersen, K. F. R. M. S. M. M., 2008. 'Systematic Mapping Studies in Software Engineering'. Proccedings of the 12th international conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering, 2(1), pp. 68-77.

Ramalingeswara, R. T. M. P. B. R. G. A., 2017. 'The big data system, components, tools, and technologies: a survey'. SpringerLink, pp. 1-81.

Riaz, F. A. M. A. A., 2017. 'Filtering the Big Data Based on Volume, Variety and Velocity by Using Kalman Filter Recursive Approach'. IEEE explore, pp. 1-6.

Singh, J. S. V., 2015. 'Big Data: Tools and Technologies in Big Data'. International Journal of Computer Applications, 112(15), pp. 1-5.

Souissi, S. B. M., 2016. 'GENUS: An ETL tool treating the Big Data Variety'. IEEE explore, pp. 1-8.

Tatineni, M. L. X. C. D. M. A. P. K. D., 2016. 'Experiences and Benefits of Running RDMA Hadoop andSpark on SDSC Comet'. ACM Digital Library, pp. 1-5.

Alineación de secuencias genómicas utilizando el algoritmo de búsqueda Best First Search

A. Aranda-Díaz*. M. Mejía-Lavalle*'**

* *Tecnológico Nacional de México / CENIDET ,Cuernavaca, Morelos, México; Enero-2019*
**alejandro.aranda19ca@cenidet.edu.mx*
***mlavalle@cenidet.edu.mx*

Abstract: En la actualidad se requieren herramientas computacionales útiles para el área de la genómica, un problema en esta área es la alineación de secuencias genómicas, El objetivo de este artículo es proponer la utilización de un algoritmo de búsqueda para llevar a cabo un alineamiento, se utilizará el *scoring* de Needleman como heurística. Debido a la presente desventaja del algoritmo de búsqueda propuesto (Best First Search) se propone una modificación, la cual consiste en agregar un umbral que solo admita los nodos prometedores, reduciendo de esta forma el gran tamaño generado en agenda. Llevando a cabo la implementación, se espera obtener alineamientos e inserción de indels similares a los obtenidos por Needleman-Wunsch con un menor coste computacional.

Keywords: Alineamiento de secuencias, Best first search, Needleman-Wunsch, Genómica, Bioinformática.

1. INTRODUCTION

1.1 Alineamiento genómico

El alineamiento genómico (Whole Genome Alignment, WGA por sus siglas en inglés) es la predicción de relaciones evolutivas a nivel nucleótido entre dos o más genomas. WGA dice en donde se encuentran los segmentos "correspondientes" en otros genomas [Dewey, 2019].

WGA presenta una gran complejidad, debido al tamaño de las secuencias a analizar y a la explosión combinatoria. Utilizando recursos computacionales para solventarlo se han realizado varios métodos de alineamiento genómico, uno de estos métodos es Needleman-Wunsch.

1.2 Needleman-Wunsch

En Needleman-Wunsch se toman 2 secuencias como entrada y se construye una matriz de puntajes, obtenidos al comparar ambas secuencias elemento por elemento.[Needleman, 1969]. El siguiente es un ejemplo de este algoritmo:

Dadas las secuencias S_1[AATCGCT] y S_2[AACGCAT] y utilizando los puntajes: +2 Similitud, -1 Disimilitud y -2 Indel se obtiene un score, con 3 similitudes (+6) y 4 disimilitudes (-4) el score total es de 2. Podemos visualizar esto en la Fig1.

```
A A T C G C T
| |       |
A A C G C A T
```

Fig1. Secuencias antes de ser procesadas por Needleman, líneas verticales indican una similitud.

Llevando a cabo Needleman podemos obtener un mejor puntaje, el algoritmo Needleman provee la matriz de puntajes y se obtiene lo siguiente

D		A	A	C	G	C	A	T
	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
A	-2	2	0	-2	-4	-6	-8	-10
A	-4	0	4	2	0	-2	-4	-6
T	-6	-2	2	3	1	-1	-3	-2
C	-8	-4	0	4	2	3	1	-1
G	-10	-6	-2	2	6	4	2	0
C	-12	-8	-4	0	4	8	6	4
T	-14	-10	-6	-2	2	6	7	8

Tabla 1. Matriz producida por el algoritmo Needleman con las secuencias ingresadas.

Al finalizar la composición de la matriz se procede a hacer *Backtracking*, siguiendo el camino de los mejores puntajes comenzando desde el valor más alto en la última columna. Las secuencias ahora están estructuradas de una nueva forma, la cual provee un mejor puntaje gracias al proceso realizado por Needleman, así mismo se puede observar los elementos perdidos o ganados en ambas secuencias Fig2.

```
A A T C G C _ T
| |   | | |   |
A A _ C G C A T
```

Fig2. Secuencias después de ser procesadas por Needleman

Se considera uno de los algoritmos de alineación genómica más precisos pero posee un gran coste computacional. [Zheng, 2019].

1.3 Algoritmos de búsqueda

Los algoritmos de búsqueda son procedimientos que permiten recorrer todas las posibles soluciones para encontrar una secuencia de operadores a un problema específico, hasta encontrar una solución [Lizma, 2013].

Un algoritmo de búsqueda toma un problema como entrada y devuelve una solución en forma de una secuencia de acciones constituidos por los siguientes elementos: un estado inicial, estado del cual parte la búsqueda; estado final, estado objetivo; estados y operadores.[Gupta, 2017] Muchos algoritmos de búsqueda se han desarrollado durante el último siglo y aunque son muy utilizados en el ámbito de juegos [Nasarre, 2019] su utilidad se extiende más allá.

Los algoritmos de búsqueda se han aplicado en otros problemas del mundo real, el algoritmo *Best First Search* se ha aplicado a manejo de tiempo en áreas de trabajo, mientras que el algoritmo *Beam Search* se ha aplicado en el área de optimizado de empaquetado [Bennell, 2018].

2. MÉTODO PROPUESTO

Se propone aplicar los algoritmos de búsqueda para realizar la alineación, a continuación se explica cómo se lleva esto a cabo.

2.1 Diseño de Estado

Entidades

- Alfabeto (ATCG)
- Indel (__)
- Secuencias

Relaciones

- Los elementos de la primera secuencia debe ser similar al de la segunda.

Estado

- INI Cualquier conjunto de 2 secuencias S1[AATCGCT] y S2[AACGCAT]
- Como condición de paro se propone al superar un umbral de profundidad o al llegar al último carácter de la secuencia.

Operadores

- Insertar Indel (__)

Condiciones de Aplicabilidad

- Se puede insertar solo un Indel
- Puede no insertarse ninguno

2.2 Best First Search (BFS)

En BFS se considera cualquiera de los nodos como el nodo siguiente. La idea es utilizar una heurística que decida cuál de los nodos en la agenda es el más prometedor a ser explorado [Pearl, 1984]. A continuación una descripción del algoritmo:

1. Crear una Agenda vacía.
2. Insertar estado inicial
3. Hasta Agenda este vacía

```
Si Agenda(0) es la Meta
        Salir
SiNo
        Explorar Agenda(0)
        Agregar Hijos
        Marcar Agenda(0) "Visitado"
        Eliminar Agenda(0)
        Reordenar Agenda
FinProceso
```

Dado el siguiente árbol en donde cada nodo representa el valor de la heurística **Figura 3**, de esta forma la agenda se muestra a continuación:

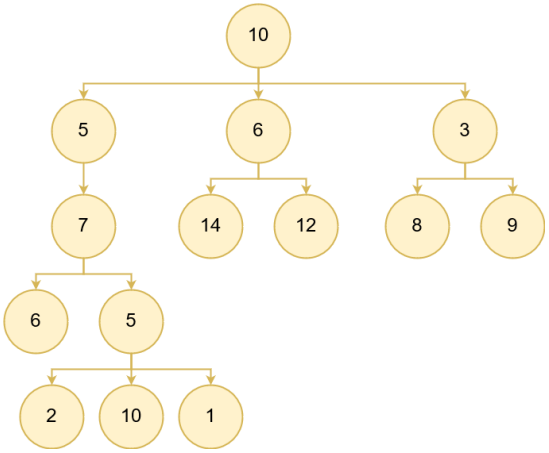


Fig3. Árbol de estados.

1. [10]
2. [3,5,6]
3. [5,6,8,9]
4. [6,7,8,9]
5. [7,8,9,12,14]
6. [5,6,8,9,12,14]
7. [1,2, 6,8,9,10,12,14]

2.3 Generador de Estados

Utilizando BFS podemos generar los estados diseñados anteriormente, a continuación se muestra el proceso por el cual serán generados dichos estados con los puntajes obtenidos a través de la puntuación de Needleman-Wunsch:

 ISSN en trámite

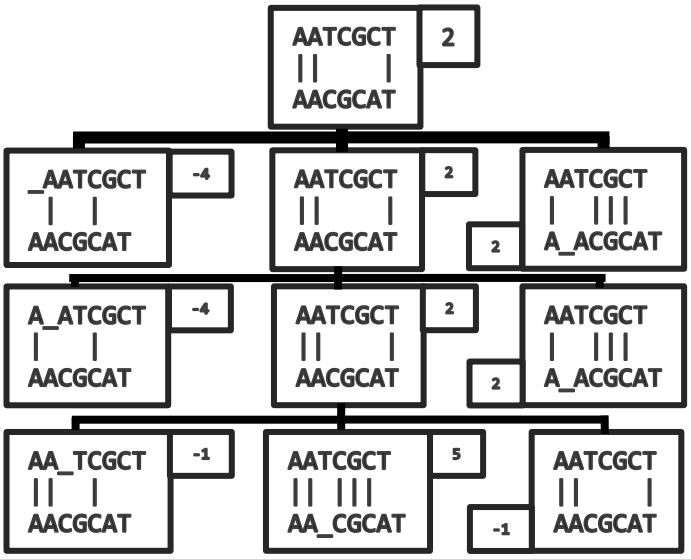


Fig4. Estados Generados por BFS con el puntaje utilizado en Needleman-Wunsch

2.4 Modificación a BFS Propuesta

El principal problema con *BFS* es la gran cantidad de espacio que requiere para la agenda lo cual, en practica, podría agotar la memoria de la máquina utilizada antes de alcanzar una solución [Mencía, 2013].

Cuando el tamaño de los datos crece al punto de ser muy grande para almacenar en la memoria principal de la computadora, la transferencia de datos se convierte en un significante cuello de botella [Maheshwari,1999].

En este artículo se propone una modificación para *BFS* que pretende reducir el problema que comprende la gran cantidad de nodos generados por el algoritmo.

El algoritmo propuesto parte de BFS, utilizando un principio de solo admitir estados que posean una heurística no mayor a un umbral definido por la heurística de mejor valor en la agenda. Esto con el propósito de reducir el tamaño de la agenda y el costo en tiempo; a continuación se describe el algoritmo AAD.

Haciendo H una abreviación de Heurística y U de Umbral:

1. Crear una Agenda vacía.
2. Insertar estado inicial
3. U ← 10 (Ajustable)
4. MainH ← HInicial
5. Hasta Agenda este vacía
   Si Agenda(0) es la Meta
   Salir
   SiNo
   Explorar Agenda(0)
   Comparar H con MainH+U
   Agregar hijos no visitados en U
   Marcar Agenda(0) “Visitado”
   Eliminar Agenda(0)
   Reordenar Agenda
   Si Agenda(0).H >MainH
   MainH ← Agenda(0).H

FinProceso

2.5 Espacios recorridos por BFS vs BFS + U

D		A	A	C	G	C	A	T	-
	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-
A	-2	2	0	-2	-4	-6	-8	-10	-
A	-4	0	4	2	0	-2	-4	-6	-
T	-6	-2	2	3	1	-1	-3	-2	-
C	-8	-4	0	4	2	3	1	-1	-
G	-10	-6	-2	2	6	4	2	0	-
C	-12	-8	-4	0	4	8	6	4	-
T	-14	-10	-6	-2	2	6	7	8	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 2. Matriz producida por el algoritmo Needleman con las secuencias ingresadas para representación de estados visitados en los algoritmos.

En la tabla 2. Utilizando la matriz generada por Needleman-Wunsch es posible observar en naranja los estados visitados por el algoritmo BFS, en azul los visitados por BFS + U y en verde el mejor estado visitado, esto nos demuestra la reducción de estados visitados producida por los algoritmos en comparación con Needleman-Wunsch. Además, BFS Finalizó después de visitar 3000 estados mientras que BFS + U lo hizo en soló 17 estados logrando una reducción de 99.5%.

3. CONCLUSIONES

La complejidad de Needleman-Wunsch este algoritmo está dada por el tamaño total de las secuencias a tratar $O(n^k)$ donde k es el tamaño de una de las secuencias y n el de la otra.

La complejidad de BFS en el peor de los casos es $O(n*Log\ n)$ donde n es el número de nodos, el peor de los casos es la visita de todos los nodos para alcanzar la meta.

En este artículo se propone el uso de un algoritmo y se aborda un caso de estudio, las pruebas se llevaran a cabo una vez implementado el algoritmo.

Aplicando este algoritmo se espera obtener un puntaje en score y cantidad de *indel* insertados cerca de lo obtenido por Needleman-Wunsch, con menor coste computacional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Alejandro Aranda Díaz agradece a CONACYT por la beca concedida para la realización de sus estudios de posgrado.

ISSN en trámite

REFERENCIAS

[Bennell, 2018] J. Bennell, M. Cabo, A. Martinez-Sykora, 'A beam search approach to solve the convex irregular bin packing problem with guillotine cuts', European Journal of Operational Research 270 89–102, 2018

[Dewey, 2019] C. Dewey, "Whole-Genome Alignment", Evolutionary Genomics: Statistical and Computational Methods, Methods in Molecular Biology, vol. 1910, 2019.

[Lizma, 2013] S. Lizma, A. Muñoz. 'Algoritmos de consistencia para programación con restricciones.' pontificia universidad católica de Valparaíso, 2013.

[Mencia, 2013] C. Mencia, M. Sierra, R. Varela, 'An efficient hybrid search algorithm for job shop scheduling with operators', International journal of production research, 2013.

[Nasarre, 2012] B. Nasarre, 'Método de Monte-Carlo Tree Search (MCTS) para resolver problemas de alta complejidad: Jugador virtual para el juego del Go' Escuela de ingeniería y arquitectura, universidad de Zaragoza, 2012.

[Needleman, 1969] S. Needleman and C. Wunsch, "A general Method Applicable to the search for similarities in the amino acid sequence of two proteins", J. Mol. Biol. (1970) 48, 443-453, 1969.

[Pearl, 1984] J. Pearl 'Heuristics:Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving' Addison-Wesley,1984

[Zheng, 2019] W. Zheng, L. Yang 'SENSE: Siamese neural network for sequence embedding and alignment-free comparison', Bioinformatics, Oxford, 2019.

[Maheshwari,1999] Maheshwari A., Zeh N. External Memory Algorithms for Outerplanar Graphs, Algorithms and Computation. ISAAC 1999. Lecture Notes in Computer Science, vol 1741. Springer, Berlin, Heidelberg.

Implementación de patrones para la capa de acceso de una herramienta informática basada en la metodología Scrum para la gestión de proyectos de desarrollo de software

López Morales José Raúl*, Gazga Portillo José Francisco, Hernández Bravo Juan Miguel***, de Jesús Islao Alma Delia******

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Acapulco, (Tel: 74-42-39-93-58; e-mail:jraul_lopz@hotmail.com).*
***Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Acapulco, (e-mail:ita.gazga@gmail.com).*
**** Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Acapulco, (e-mail: jmhernan@yahoo.com).*
***** Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Acapulco, (e-mail: alma.islao.ita@gmail.com).*

Resumen: En este artículo, se plasma el trabajo interdisciplinario de la Maestría en Sistemas Computacionales con apoyo del CONACyT, impartida en el Instituto Tecnológico de Acapulco. El artículo tiene por meta, presentar la implementación de los patrones de unidad de trabajo y repositorio en la capa de acceso a datos, permitiendo agilizar y facilitar la manipulación de los datos respecto de la persistencia de datos a la capa de negocio. Se hace mención a que este artículo forma parte de una serie de trabajos siendo el tercero de estos, el cual da seguimiento a un artículo previo titulado: **Diseño de una herramienta informática basada en la metodología Scrum para la gestión del desarrollo de software**, escrito por los mismos autores y que fue presentado y publicado en el congreso de Academia Journals Puebla 2019.

Palabras claves: Patrón de diseño, ASP.NET Core MVC, MVC, Repositorio y Unidad de trabajo.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existen una gran variedad de tecnologías para desarrollar sistemas informáticos que implementan patrones de diseño que permiten agilizar y facilitar el proceso de desarrollo, lo cual es debido a la gran demanda que existe en el mercado, que las empresas requieren de algún tipo de software que demande la menor cantidad de tiempo en su construcción. Cuando se habla de escalar sistemas informáticos, el patrón MVC (Modelo-Vista-Controlador) es ideal para este tipo de escenarios, porque resulta más fácil codificar, depurar y probar algo (ya sea del modelo, vista o controlador) que tenga un solo trabajo ya que resulta complejo actualizar, probar y depurar código que tenga dependencias repartidas entre dos o más de estas tres áreas. Por ejemplo, la lógica de la interfaz de usuario tiende a cambiar con mayor frecuencia que la lógica de negocios. Si el código de presentación y la lógica de negocios se combinan en un solo objeto, un objeto que contenga lógica de negocios deberá modificarse cada vez que cambie la interfaz de usuario (1). ASP.NET Core MVC es un marco de desarrollo de aplicaciones web de Microsoft que combina la eficiencia y el orden de la arquitectura de MVC, ideas y técnicas de desarrollo ágil y las mejores partes de la plataforma .NET (2). Este marco de desarrollo es de código abierto y multiplataforma permitiendo desplegar aplicaciones en diferentes sistemas operativos. Un grupo de especialistas conformado por Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson y John Vlissides han catalogado un conjunto de patrones. Actualmente, su catálogo se considera una de las fuentes de información más populares sobre patrones de diseño. Dado que los patrones fueron documentados por los cuatro autores, los patrones se denominan patrones de diseño Gang of Four, o GoF. El catalogo GoF incluye 23 patrones de diseño. Los autores han colocado estos 23 patrones en tres categorías; patrones de creación, estructurales y de comportamiento (3). ASP.NET Core MVC permite utilizar inyección de dependencia, la cual es una técnica que ayuda a crear aplicaciones flexibles y simplifica las pruebas unitarias (2). Esta técnica permite inyectar servicios antes de que muestre una vista al usuario, una forma de inyectar servicios con esta técnica es a través del patrón *singleton* el cual dicta que solamente se puede crear una instancia de una clase, entonces cuando se crean aplicaciones web con ASP.NET Core MVC que accedan a una base de datos, es obligado crear un contexto (clase) donde se establezca una cadena de conexión a la base de datos. Al inyectar un servicio del contexto a través del patrón *singleton*, se permite mejorar el rendimiento de una aplicación web debido a que, si múltiples usuarios realizan transacciones, estos podrán acceder

a la base de datos a través de un solo objeto del contexto. El patrón *singleton* pertenece a la categoría creacional del catálogo GoF.

1.1 Patrones de arquitectura de aplicaciones empresariales

Existe otro catálogo de patrones compilado por Martin Fowler. Este catálogo es llamado Patrones de Arquitectura de Aplicaciones Empresariales (en inglés Patterns of Enterprise Application Architecture ó P of EAA). Los patrones de ambos catálogos (GoF y P of EAA) se usan al construir sistemas de software. Sin embargo, los P de EAA están orientados a las aplicaciones empresariales (3). Una aplicación empresarial es una colección de componentes que proporciona una funcionalidad empresarial que se puede utilizar internamente, externamente o con otras aplicaciones empresariales. Por ejemplo, gestión de pedidos, de inventarios o facturación (6). Estas aplicaciones suelen ser complejas, altamente escalables y distribuidas. Los patrones del catálogo P of EAA están colocados en 10 categorías: Patrones de lógica de dominio, arquitectónicos de orígenes de datos, de comportamiento relacional de objetos, estructurales relacional de objetos, de mapeo de metadatos de objetos relacionales, de presentación web, de distribución, de concurrencia fuera de línea, de estado de sesión y de base. Las aplicaciones modernas están divididas en tres capas conceptuales: Acceso a datos, lógica de negocio y presentación o interfaz de usuario.

Los patrones unidad de trabajo y repositorio que pertenecen al catálogo P of EAA, permiten obtener la mejor forma de realizar transacciones con la base de datos. A continuación, se explican estos patrones.

1.2 Patrón repositorio

Emplear una capa de acceso a datos para realizar las operaciones Crear, Leer, Actualizar y Eliminar (en inglés Create, Read, Update y Delete, CRUD) es muy común en las aplicaciones del mundo real. Un componente de acceso a datos aísla los detalles de cómo las operaciones CRUD están tomando lugar en un sistema informático, por ejemplo, cuando se necesita realizar un conjunto de consultas de la misma base de datos desde varios lugares. Aunque un componente de acceso a datos encapsule las operaciones básicas de CRUD, no ofrecerá ayuda para evitar la duplicación de estas operaciones. Por lo tanto, se viene realizando el mismo código en varios lugares de una aplicación. En tales casos, se puede introducir una capa entre las clases de dominio y la capa de acceso a datos. Esta capa se encargará de las operaciones de encapsulación que se pueden reutilizar una y otra vez. Esta capa viene en forma de patrón repositorio. El patrón repositorio media entre la capa de acceso a datos y el resto del sistema. Además, lo hace proporcionando acceso de colección a los datos subyacentes. Una vez que se implementa el patrón de repositorio, el código de la capa de negocio no invocará el componente de acceso a datos directamente. En su lugar, invocará el repositorio para hacer el trabajo. El patrón repositorio ofrece una interfaz de recopilación al proporcionar métodos para agregar, modificar, eliminar y recuperar objetos de dominio.

1.3 Patrón unidad de trabajo

Una operación comercial involucra múltiples pasos mientras es requerida. La operación puede ser tratada como un solo lote o unidad. Se puede recurrir a las transacciones de la base de datos y realizar la tarea de la siguiente manera:

- Comenzar una transacción en la base de datos.
- Realizar todos los pasos de la operación uno por uno contra la base de datos.
- Comprometer o revertir la transacción.

Aunque este procedimiento parece sencillo, existe un problema: Se están realizando pasos individuales de la operación directamente en la base de datos. Entonces, si una operación involucra *n* pasos, está creado *n* operaciones de escritura en la base de datos. Una cantidad tan grande de pequeñas operaciones en la base de datos puede afectar el rendimiento general del sistema. Una mejor forma es capturar pasos individuales y luego enviarlos al motor de la base de datos de una sola vez y luego ejecutarlos en una única transacción, esa es la idea detrás del patrón unidad de trabajo. El patrón de unidad de trabajo realiza un seguimiento de la transacción comercial que se supone altera la base de datos de alguna manera. Una vez que finaliza la transacción comercial, los pasos se reproducen en la base de datos en una transacción para que la base de datos refleje los cambios deseados. Por lo tanto, el patrón de unidad de trabajo rastrea una transacción comercial y la traduce en una transacción de base de datos, en la que los pasos se ejecutan colectivamente como una sola unidad (3).

2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal que se pretende lograr con la presente propuesta, consiste en desarrollar una herramienta informática que permita la gestión de proyectos de desarrollo de software que basan su construcción, en el empleo de la metodología Scrum, para ello, es importante la implementación de los patrones unidad de trabajo y repositorio en la capa de acceso, haciendo uso del lenguaje de programación C# con el marco de desarrollo ASP.NET Core MVC.

3. IMPLEMENTACIÓN DE LOS PATRONES REPOSITORIO Y UNIDAD DE TRABAJO

A partir de esta sección, se presenta la implementación de los patrones repositorio y unidad de trabajo en la capa de acceso a datos de la herramienta, esta implementación es soportada por el diagrama de clases propuesto en el segundo artículo de la serie (4), en el cual se representó dichos patrones.

3.1 Repositorio

En este apartado se presenta algunos métodos implementados que proporciona el patrón repositorio al momento de utilizarlo. Las siguientes líneas de código implementan la clase genérica

RepositorioGenerico la cual hereda la interfaz *IRepositorioGenerico* indicando a través de la palabra reservada *where* que *T* es una clase.

```
public class RepositorioGenerico<T> :
IRepositorioGenerico<T> where T : class
{
  internal PiScrumDbContext db = null;

  public RepositorioGenerico(PiScrumDbContext db) {
    this.db = db;
  }
}
```

Dentro de la clase ***RepositorioGenerico*** se crea un campo el cual es de tipo ***PiScrumDbContext*** que es una clase que representa el contexto para realizar operaciones en la base de datos. A continuación, se muestran las líneas de código que implementan el método para agregar (***AgregarAsin***) un registro en la base de datos.

```
public virtual async Task<T> AgregarAsin(T entity)
{
  db.Set<T>().Add(entity);
  return entity;
}
```

El método ***AgregarAsin*** recibe como parámetro ***entity*** de tipo ***T***, el cual es proporcionado como argumento para el método ***Add*** donde a través del método ***Set*** se obtiene un ***DbSet*** (que representa la colección de todas las entidades en el contexto) de la entidad para que se pueda guardar la instancia de la entidad (clase). Los métodos ***Add*** y ***Set*** son proporcionados por ***Entity Framework*** el cual es un mapeador de objetos relacionales que permite a los desarrolladores de .NET trabajar con una base de datos utilizando objetos .NET. Las siguientes líneas de código permiten actualizar datos de un registro en la base de datos.

```
public virtual async Task<T> ActualizarAsin(T entity, object
key)
{
   if (entity == null)
   return null;
  T exist = await db.Set<T>().FindAsync(key);
  if (exist != null) {
     db.Entry(exist).CurrentValues.SetValues(entity);
  }
  return exist;
}
```

El método ***ActualizarAsin*** presentado, recibe como parámetros ***entity*** y ***key*** donde ***entity*** es de tipo ***T*** y ***key*** de tipo ***object***. En este método primero se realiza una consulta (***FindAsync***) en la entidad almacenada en ***entity*** donde se hace un filtrado utilizando el parámetro ***key***. La variable ***exist*** almacena la entidad retornada por la consulta, entonces la segunda condición se cumple y se hace la actualización a través del método ***Entry*** proporcionando como argumento la entidad retornada a la cual se va actualizar con la información almacenada en ***entity*** por el método ***SetValues***. Los métodos ***FindAsync***, ***Entry*** y ***SetValues*** también son proporcionados por ***Entity Framework***. A continuación, en las siguientes líneas se presenta el método para eliminar un registro de la base de datos.

```
public virtual async Task EliminarAsin(T entity)
{
  db.Set<T>().Remove(entity);
}
```

El método ***EliminarAsin*** presentado, recibe como parámetro ***entity*** de tipo ***T*** donde almacena la información del registro a eliminar de una entidad específica. Para eliminar un registro simplemente se utiliza el método ***Remove*** donde se pasa como argumento ***entity*** y este obtiene un ***DbSet*** por el método ***Set*** para realizar la transacción en el contexto.
Como pueden observar en la firma de los métodos presentados tienen dos palabras reservadas ***async*** y ***Task***, esto hace que los métodos sean asíncronos, permitiendo que se puedan hacer múltiples transacciones en el contexto con una sola instancia de este.

3.2 Unidad de trabajo

En las siguientes líneas de código se muestra la parte esencial de la implementación del patrón unidad de trabajo.

```
public class UnidadDeTrabajo : IUnidadDeTrabajo
{
    private readonly PiScrumDbContext db;
    private IRepositorioGenerico<SeguimientoSprint>
    SeguimientoSprint;
    private IRepositorioGenerico<HistoriasUsuario>
    HistoriasUsuario;

    public IRepositorioGenerico<SeguimientoSprint>
    SeguimientoSprintRepositorio {
        get
        {
        return SeguimientoSprint = SeguimientoSprint ?? new
        RepositorioGenerico<SeguimientoSprint>(db);
        }
    }

    public IRepositorioGenerico<HistoriasUsuario>
    HistoriasUsuarioRepositorio {
          get
          {
          return HistoriasUsuario = HistoriasUsuario ?? new
          RepositorioGenerico<HistoriasUsuario>(db);
          }
    }

    public async Task<int> SaveAsync() {
       return await db.SaveChangesAsync();
    }
}
```

La clase ***UnidadDeTrabajo*** tiene el propósito de asegurar que, usando varios repositorios, compartan un mismo contexto de base de datos (variable ***db***). De tal forma que, cuando se complete una unidad de trabajo, se pueda invocar al método ***SaveChanges*** en esa instancia del contexto, asegurando que todos los cambios relacionados se coordinen. Por ello, la clase necesita el método ***SaveAsync*** y una propiedad para cada repositorio. Las propiedades del repositorio retornan una instancia de repositorio de la cual se han creado instancias con la misma instancia de contexto de base de datos que las demás instancias de repositorio. En el código anterior, se crean variables de clase para el contexto de la base de datos y para cada repositorio (variable ***SeguimientoSprint***). En el caso de la variable ***db***, se crea una instancia de un nuevo contexto.

Las propiedades del repositorio comprueban si el repositorio existe. De otra forma, se crea una nueva instancia de este, pasando la instancia de contexto (***db***). Lo cual da como resultado, cada uno de los repositorios que comparten la misma instancia de contexto.

RESULTADOS

Este apartado se presenta el uso de los patrones **repositorio** y **unidad de trabajo** en la lógica de negocio. El siguiente código es un fragmento del método que realiza el **seguimiento del sprint** de un proyecto en la herramienta.

```
await unidadDeTrabajo.SeguimientoSprintRepositorio.AgregarAsin(Modelo);
//guardando cambios en las entidades de tareas e historias de usuario
if (ModeloT.EstimacionEsfuerzoRestante == 0)
   ModeloT.Estatus = "FINALIZADO";
else
   ModeloT.Estatus = "PROCESO";

if (ModeloH.EstimacionEsfuerzoRestante == 0)
   ModeloH.Estatus = "FINALIZADO";
else
   ModeloH.Estatus = "PROCESO";

await unidadDeTrabajo.TareasRepositorio.ActualizarAsin(ModeloT,ModeloT.IdTarea);

await unidadDeTrabajo.HistoriasUsuarioRepositorio.ActualizarAsin(ModeloH,ModeloH.IdHistoriaUsuario);

await unidadDeTrabajo.SaveAsync();
```

Del código anterior, las líneas con ***fondo gris***, son donde se implementa el patrón de repositorio y unidad de trabajo. La primera línea en negrita se utiliza el método ***Agregar*** a través de la propiedad ***SeguimientoSprintRepositorio*** del repositorio perteneciente a la clase ***UnidadDeTrabajo*** que implementa el patrón unidad de trabajo. El método ***Agregar*** requiere un modelo el cual es una clase de tipo ***SeguimientoSprint***. De esta misma forma se utiliza para actualizar una tarea y una historia de usuario. Cuando se realizan las transacciones comerciales agregar y actualizar se guardan cambios en la base de datos con las instancias de las entidades ***Seguimiento sprint***, ***Historias Usuario*** y ***Tareas***. Estos cambios se hacen con el método ***SaveAsync*** a través del patrón ***unidad de trabajo*** como se muestra en el código presentado anteriormente.

Cuando se ejecuta el método ***AgregarAsin***, **Entity framework** traduce esta instrucción en una instrucción SQL para que el gestor de base de datos pueda interpretarlo y realizar la transacción. En la figura 1 se observa la traducción del método ***AgregarAsin*** en SQL.

```
INSERT INTO "SeguimientoSprint" ("IdSeguimientoSprint", "FechaRegistro", "IdSprint", "IdTarea",
VALUES (@p2, @p3, @p4, @p5, @p6);
```

Figura 1. Traducción del método ***AgregarAsin*** a SQL.

De la misma forma, cuando se ejecuta el método ***ActualizarAsin*** este se traduce a SQL como se observa en la figura 2.

```
UPDATE "Tareas" SET "EstimacionEsfuerzoRestante" = @p7
WHERE "IdTarea" = @p8;
UPDATE "HistoriasUsuario" SET "Estatus" = @p0
WHERE "IdHistoriaUsuario" = @p1;
```

Figura 2. Traducción del método ***ActualizarAsin*** a SQL.

4. COMENTARIOS FINALES

4.1 Conclusiones

En este artículo, se presentó la implementación de los patrones repositorio y unidad de trabajo en la capa de acceso permitiendo mejorar el rendimiento al momento de realizar transacciones en la base de datos, también influye el hecho de que los métodos contenidos en el patrón son asíncronos, resolviendo así, el problema de concurrencia. La forma de tratar una transacción comercial el patrón unidad de trabajo, es muy similar al mecanismo de las instrucciones commit y rollback de SQL, es decir, si en una transacción con n cambios falla uno ellos entonces ninguno se refleja en la base de datos esto asegura la integridad de la base de datos. La implementación de estos patrones en la capa de acceso no afecta al momento de cambiar de gestor de base de datos ya que estos patrones como se expuso, el patrón repositorio tiene la función de crear una capa de abstracción entre la capa de acceso a datos y la lógica de negocio y el patrón unidad de trabajo permite manejar transacciones durante la manipulación de datos utilizando los métodos implementados en el patrón repositorio, es decir, el patrón unidad de trabajo solamente necesita de un contexto sin importar el origen.

ISSN en trámite

4.2 Trabajos a futuro

Este artículo forma parte de una serie de trabajos que reflejan el progreso del proyecto de tesis de maestría, donde el trabajo a futuro claramente debe abordar la conclusión de la herramienta donde se expondrá, el desarrollo de la aplicación propuesta, haciendo uso de la implementación de los patrones repositorio y unidad de trabajo presentada en este trabajo y haciendo uso de las herramientas de desarrollo de software, implementando la arquitectura propuesta en el primer artículo (5).

REFERENCIAS

1. **Smith, Steve.** Información general de ASP.NET Core MVC. *Información general de ASP.NET Core MVC.* [En línea] Microsoft, 28 de 01 de 2020. [Citado el: 19 de 02 de 2020.] https://docs.microsoft.com/es-es/aspnet/core/mvc/overview?view=aspnetcore-3.1.

2. **Freeman, Adam.** *Pro ASP.NET Core MVC 2.* Londres : Apress, 2017. 978-1-4842-3150-0.

3. **Joshi, Bipin.** *Beginning SOLID Principles and Design Patterns for ASP.NET Developers.* Thane : Apress, 2016. 978-1-4842-1848-8.

4. *Diseño de una herramienta informática basada en la metolodología Scrum para la gestión del desarrollo de software.* **López Morales, José Raúl, y otros.** 6, Puebla : Academia Journals, 2019, Vol. 11.

5. *Propuesta de una herramienta basada en la métodología Scrum para la gestión del desarrollo de software.* **López Morales, José Raúl, y otros.** 2, Michoacan : Academia Journals, 2019, Vol. 11.

6. **IBM.** Aplicaciones empresariales. *IBM Knowledge Center.* [En línea] IBM Corp., 2017. [Citado el: 22 de Febrero de 2020.] https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SSPLFC_7.3.0/com.ibm.taddm.doc_7.3/UserGuide/c_cmdb_business_apps.html.

Red Neuronal Pulso-Acoplada en la Mejora de Imágenes Digitales a Color Oscuras

J. Andrés Arizmendi Sánchez, Manuel Mejía Lavalle, José Ruiz Ascencio y Gerardo Reyes Salgado

Departamento de Ciencias Computacionales
Tecnológico Nacional de México / CENIDET
Cuernavaca, Morelos, México
{jose.arizmendi19ca, mlavalle, josera & greyes}@cenidet.edu.mx

Resumen: En este artículo se realiza una implementación y experimentación del Modelo de Intersección Cortical el cual es una versión reducida de la Red Neuronal Pulso-Acoplada y se propone un primer enfoque a una futura propuesta de mejora de imágenes digitales a color. Para abordar el tema del color, se utiliza el modelo RGB realizando una mejora en cada canal de color. La imagen es normalizada al rango de [0,1], posteriormente ICM genera una matriz de tiempo única para cada canal, esta es normalizada al rango de [0,1] y sumado con la imagen de entrada normalizada e invertida para generar una imagen mejorada, finalmente se invierte nuevamente para regresar a los colores originales y normalizada al rango de [0,255]. De manera objetiva los resultados son comparados con Ecualización de Histograma y Ecualización de Histograma Adaptativo Limitado de Contraste y medido con *Peak Signal-to-Noise Ratio*, *Structural Similarity* y *Visual Information Fidelity*. Debido a que este artículo se enfoca más en presentar un primer enfoque, no se presentan experimentaciones exhaustivas, más bien se presentan experimentaciones preliminares.

Palabras clave: Mejoramiento de imágenes, Redes Neuronales Pulso-Acopladas, Imágenes Oscuras, Matriz de Tiempo.

1. INTRODUCCIÓN

Una imagen digital es una representación numérica de una imagen bidimensional donde la calidad de la imagen puede ser descrita por medio de diferentes atributos como: color, luminosidad, contraste, nitidez, ruido y los artefactos [Pedersen, 2010]. Sin embargo estos atributos pueden ser afectados por diversos factores externos como un equipo no adecuado o problemas de iluminación provocando que la imagen pierda información haciendo que sea más difícil para el humano o para una máquina obtener información a partir de la imagen, por ejemplo los oftalmólogos utilizan imágenes del fondo de la retina en el diagnóstico médico de enfermedades oculares como el glaucoma, cataratas, degeneración macular relacionada con la edad y retinopatía diabética [Abràmoff, 2010]. Por lo cual se necesita de técnicas de mejoramiento, Por otra parte, la mejora de la calidad de imágenes es un tema subjetivo puesto que actualmente no existe un estándar universal que defina a una mejora de imágenes [Pratt, 2007]. Donde la mejora se mide de manera subjetiva por medio de expertos y objetivamente utilizando diferentes tipos de métricas. Estas mejoras se pueden realizar utilizando métodos de mejora clásicos como EH, CLAHE y diferentes variantes de estos métodos [Zheng, 2019] o por medio de métodos más avanzados como con Retinex [Park, 2019].

Otra forma de realizar la mejora de imágenes son las Redes Neuronales Artificiales (RNA), las cuales han entregado resultados sobresalientes [Jena, 2018]. Dentro de las RNA, existen las de tercera generación o Pulso-Acopladas (PCNN).

Las PCNN comienzan en 1990 cuando Eckhorn et al. [Eckhorn, 1990] propusieron un nuevo modelo de red neuronal basado en la corteza visual de los gatos. En 1999, Johnson y Padgett [Johnson, 1994] modificaron este modelo en uno adaptado para el procesamiento de imágenes y lo nombraron como Red Neuronal Puso-Acoplada (PCNN). En 1999, Kinser [Kinser, 1999] introduce un modelo simplificado con resultados similares a modelo PCNN. En 2004, Ekblad et al. [Ekblad, 2004] presenta un nuevo algoritmo al que llama Modelo de Intersección Cortical (ICM).

Las PCNN son ampliamente utilizadas en el procesamiento de imágenes debido a que están inspiradas en la corteza visual de los mamíferos. La mejora de imágenes se ha abordado desde hace años, sin embargo, es un tema relativamente nuevo debido a que los primeros modelos eran utilizados principalmente en segmentación. No obstante en los últimos años se han utilizado ampliamente en otras áreas como extracción de características, fusión, filtrado, mejoramiento entre otros [Ma, 2010][Lindblad, 2005]. Donde el mejoramiento se ha abordado en menor medida aunque se ha demostrado su capacidad para realizar esta tarea. Por lo cual se comenzó a experimentar en esta área debido a que han demostrado buenos resultados. Dentro de los trabajos relacionados con mejoramiento de imágenes se ha incursionado en gran medida para imágenes en escala de grises, aunque pueden ser utilizadas en imágenes a color. Algunos de los trabajos propuestos son: F. Xia Wu [Wu, 2016] implementa el

modelo PCNN para la mejora de imágenes oscuras a color logrando corregir la iluminación y preservando los detalles de la imagen la mejora es realizada utilizando el modelo de color HSV el cual también se planea explorar a futuro, *feature-linking model* (FLM) [Zhan, 2016] proponen un nuevo modelo PCNN en el que utiliza los tiempos de activación similar a la matriz de tiempo con la diferencia que se está utilizando la función de enlace, esto para codificar la información consiguiendo mejorar el contraste y preservando la información de la imagen, *Linking synaptic computation for image enhancement* (LSCM) [Zhan, 2017] que es el sucesor directo de FLM enfocado a realizar la misma tarea con la diferencia que reduce la función de alimentación para obtener un nuevo modelo que reduce la complejidad respecto a FLM.

En este trabajo se presenta un primer enfoque para la mejora de imágenes digitales a color haciendo uso de la matriz de tiempo. Por tal motivo las experimentaciones presentadas son preliminares enfocándose principalmente en un análisis sobre el comportamiento del modelo ICM y la matriz de tiempo además de presentar un breve análisis sobre cómo abordar el tema del color.

El resto del articulo está organizado de la siguiente manera. Sección 2 presenta las bases de donde se parte y un análisis del comportamiento del modelo ICM, la matriz de tiempo y el color. Sección 3 describe brevemente las bases de la experimentación y configuración de ICM. Sección 4 presenta la discusión de los resultados y finalmente Sección 5 las conclusiones y Sección 6 trabajo a futuro.

2. MODELO DE INTERSECCIÓN CORTICAL

2.1 Modelo propuesto

Se propone una variante del Modelo de Intersección Cortical con Matriz de Tiempo Luminosa ICM-LTM [Aguilar, 2019]. En este trabajo realiza la mejora de imágenes en escala de grises en donde la matriz de tiempo tiene la función de complementar a la imagen oscura o brillante para generar una imagen con una mejora en la iluminación. La mejora está enfocada en imágenes de resonancia magnética del cerebro humano. Una limitante de este trabajo a parte del color el cual no era el objetivo, es el poco desempeño en imágenes con iluminación dinámica complicada por ejemplo imágenes con zonas muy brillante y zonas muy oscuras. Para abordar esta limitante se propone un nuevo enfoque en la implementación de la matriz de tiempo. Cabe destacar que este trabajo es una implementación y experimentación preliminar, por lo cual tanto la experimentación y las imágenes utilizadas son limitadas.

El modelo ICM es una variante más ligera del modelo PCNN sin perder sus características originales. [Ekblad, 2004] El modelo PCNN está dado por las siguientes ecuaciones:

$$F_{ij}[n] = fF_{ij}[n-1] + S_{ij} + \sum_{k,l} w_{ijkl} Y_{kl}[n-1] \quad (1)$$

$$T_{ij}[n] = gT_{ij}[n-1] + hY_{ij}[n-1] \quad (2)$$

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

Donde cada neurona esta denotada por ij y el tiempo por n. La función de alimentación F_{ij} (1) es la responsable de conectarse con las neuronas vecinas por medio de la matriz de pesos sinápticos w que regularmente es de tamaño 3x3. S_{ij} es la imagen de entrada previamente normalizada. f es un escalar menor a 1 que representa una función de decaimiento. El umbral de activación está dado por la función T_{ij} (2) donde g es un escalar menor a 1 y h regularmente 20. La generación de pulsos se genera a partir de la función Y_{ij} (3) cuando F es mayor al umbral T. Este comportamiento se muestra en la Figura 1 en la que se muestra el diagrama donde la entrada se encuentra la imagen original S_{ij} junto con la convolución de Y_{ij} con la mascara w_{ijkl}, en esta sección Y_{ij} esta dada por los pulsos generados en la iteración anterior, 0 en caso de ser la primera iteración. En la sección de modulación se suma la entrada y F_{ij} aplicando una atenuación f. Finalmente, la sección de generación de pulsos calcula el umbral con la ecuación 2 y finalmente utilizando el umbral T_{ij} se aplica la función de activación dada por la ecuación 3.

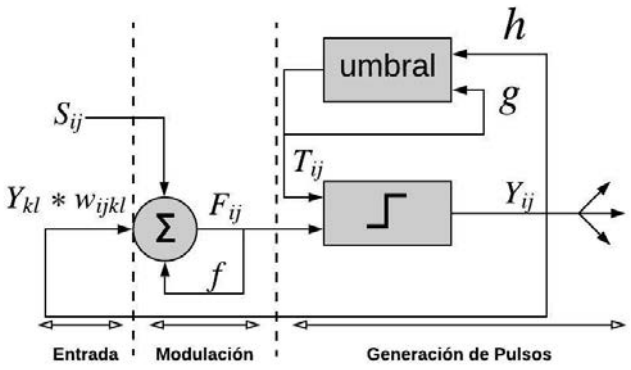


Figura 1. Diagrama del modelo ICM [Ortiz, 2016]

En la Figura 2, se muestra el comportamiento que sigue cada neurona del modelo ICM, donde cada neurona se conecta a un pixel de la imagen, por lo cual, el número de neuronas es la cantidad de pixeles. Este comportamiento representa a un pixel con un valor de 1 que equivale a 255 en RGB, por lo tanto, durante la primera iteración esta neurona es detonada provocando que el umbral T aumente en 20. Por otra parte, la función F estará aumentando a través del tiempo, mientras que el umbral T estará decayendo a través del tiempo hasta alcanzar a la función F o esta alcance al umbral T.

 ISSN en trámite

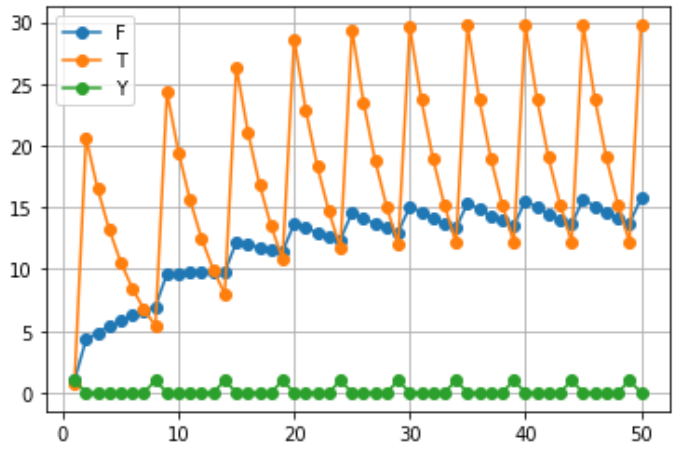


Figura 2. Comportamiento de una neurona ICM

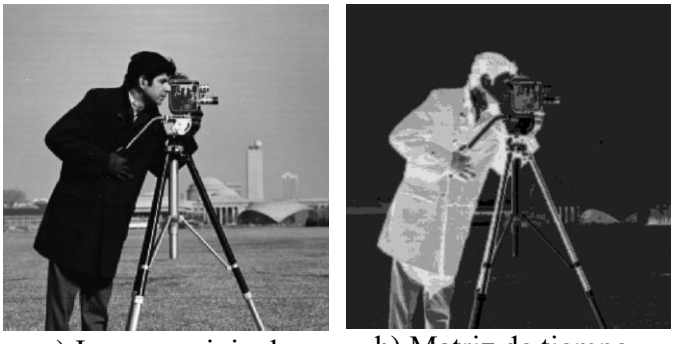
2.2 Matriz de Tiempo

La matriz de tiempos es un mapa de información de la imagen a través del tiempo, registrando el tiempo de activación de las neuronas [Ma, 2010]. La matriz de tiempo está dada por la siguiente ecuación:

$$M_{ij}[n] = \begin{cases} n & si\ Y_{ij} = 1 \\ M_{ij}[n-1] & en\ otro\ caso \end{cases} \quad (4)$$

Donde n representa al número de iteración o tiempo de activación, cuando una neurona es detonada el valor de Y en la posición ij es 1 por lo cual en la matriz de tiempo M en la posición ij se asigna el tiempo n de lo contrario mantiene su valor.

Debido a que la matriz de tiempo registra el momento de activación, y las neuronas se activan partiendo de los pixeles más brillantes hasta los pixeles más oscuros. La matriz de tiempo almacenará una imagen similar a la imagen de entrada, pero en negativo como se muestra en la Figura 3. Por lo cual se puede interpretar como un mapa de intensidades normalizada dependiendo del número de iteraciones requeridas siendo los pixeles más oscuros con valores cercanos al 1 y pixeles brillantes con valores cercanos al 0.



a) Imagen original b) Matriz de tiempo

Figura 3. Diferencia entre la imagen original y la imagen generada por la matriz de tiempo

2.3 Color

La Red Neuronal Pulso-Acoplada está especializada para trabajar en un único canal de color por lo cual es ampliamente utilizada en imágenes en escala de grises. Por lo tanto, para abordar el tema del color se puede realizar de diferentes opciones como puede ser pasando de un modelo en RGB a otro modelo de color que contenga un canal de iluminación como puede ser LAB, YUV o HSV, los cuales poseen un canal dedicado a la iluminación. No obstante, en imágenes con muy poca iluminación estos modelos presentan pobres resultados recuperando el color como se muestra en la Figura 4. Esto debido a que los colores son demasiado pequeños como para poder recuperar color con estos modelos.

Por lo cual se opta por la utilización y experimentación con el modelo RGB, el cual presenta mejores resultados para este tipo de imágenes. El principal inconveniente es la posibilidad de distorsión de color que pueda haber al manejar los 3 canales de manera independiente.



a) Imagen original b) Imagen mejorada

Figura 4. Comparación visual entre la imagen original a) e imagen mejorada por Ecualización de Histograma utilizando el canal de iluminación del modelo de color YUV b).

Utilizando el modelo RGB y realizando la mejora en los diferentes canales se presenta el problema de la atenuación de colores haciendo que estos pierdan parte de su intensidad. Este efecto se debe a que la matriz de tiempo está registrando los pixeles dependiendo de su intensidad, por otra parte, hay colores que solo dependen de 2 como el color amarillo que depende únicamente del canal rojo y verde, así como los colores primarios del modelo RGB rojo, verde y azul que son colores independientes, por lo tanto, si se tiene un color amarillo, este puede atenuarse y acercarse al color gris y si es un color primario este inclusive puede cambiar su color como se muestra en la Figura 5 donde se muestra como el color amarillo puede atenuarse esto debido a que el canal azul tiene un valor muy bajo, esto en una imagen en escala de grises se considera que es un pixel oscuro, por lo cual para mejorarlo es necesario aumentar su

 ISSN en trámite

valor provocando que el color resultante termine siendo diferente, en el caso del color amarillo este es atenuado mientras que el rojo, al aumentar los colores verde y azul este cambia el color final.



Figura 5. Posibles pérdidas de color al realizar la mejora utilizando el modelo RGB a cada canal de manera independiente. Izquierda Pixel original. Derecha Pixel distorsionado

2.4 Mejora

La imagen de entrada S es previamente normalizada al rango dinámico de entre 0 y 1 a través de la siguiente ecuación:

$$S = \frac{I - \min(I)}{\max(I) - \min(I)} + \varepsilon \qquad (5)$$

Donde ε está dado por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{1}{255} \qquad (6)$$

En la ecuación 5, la imagen sin normalizar está dada por I, $\min(I)$ y $\max(I)$ representan el valor mínimo y máximo de la imagen I respectivamente. Se aplica esta normalización para asegurarse que todos los valores de S estén en el rango de [0,1].

La ecuación 6 es para asegurar que todas las neuronas incluyendo aquellas que están conectadas a pixeles con valor 0 se activen. De lo contrario, las neuronas con valor 0 deberán esperar a ser alcanzadas por el efecto onda debido a que el valor que la alimenta en la función F se mantendrá en 0 y este se verá modificado únicamente cuando las neuronas vecinas tengan activación.

Del modelo ICM se obtiene la matriz de tiempo M a partir de una imagen de entrada I y posteriormente normalizada por medio de la ecuación 7 para obtener la matriz de tiempo normalizada $MTNij$. El modelo ICM se ejecuta hasta que la matriz de tiempo este llena o, dicho de otra forma, hasta que todas las neuronas se activen. La matriz de tiempo normalizada está dada por la siguiente ecuación:

$$MTN = \frac{MT - \min(M)}{\max(M) - \min(M)} \qquad (7)$$

Como se muestra en la Figura 2, la matriz de tiempo es la imagen invertida, por lo cual, para poder realizar la suma de los pixeles sin que estos puedan deformar los colores, la imagen de entrada I es invertida de la forma $1 - I$, finalmente se aplica la ecuación 8 para obtener la imagen mejorada $\widehat{IN}$.

$$\widehat{IN}_{ij} = MTN_{ij} + (1 - I_{ij}) \qquad (8)$$

$\widehat{IN}_{ij}$ almacena la imagen final, y debido a que puede tener valores mayores a 1, se necesita normalizar y finalmente des normalizar con el valor máximo que es L-1 o 255 para obtener la imagen final $\hat{I}$ a partir de la siguiente ecuación:

$$\hat{I} = \left(1 - \frac{\widehat{IN} - \min(\widehat{IN})}{\max(\widehat{IN}) - \min(\widehat{IN})}\right)(L - 1) \qquad (9)$$

Este proceso se realiza para cada canal de color del modelo RGB quedando con $\hat{I}_R$, $\hat{I}_G$ y $\hat{I}_B$ que corresponden a cada canal, estos 3 canales se unen nuevamente para formar la imagen a color mejorada.

3. EXPERIMENTACIÓN

El modelo ICM es comparado con Ecualización de Histograma (EH) y Ecualización de Histograma Adaptativo Limitado de Contraste (CLAHE) ambos métodos se encargan de modificar el histograma, sin embargo, EH lo hace de manera global y CLAHE de manera local. Estos métodos se utilizaran para comparar sus resultados en imágenes con iluminación complicada.

Ecualización de Histograma EH: Consiste en el ajuste de intensidades para el mejoramiento de contraste para imágenes con detalles ocultos en regiones oscuras.

Parte del principio de tomar la imagen a escala de grises y normalizar sus pixeles al rango de 0 a L - 1 donde 0 representa el negro y el L - 1 el blanco, L es el número de valores de intensidad posibles, EH se expresa en la ecuación 10 [Gonzalez, 2017], esta misma técnica puede ser utilizada para mejorar

imágenes a color separándola por sus espacios de color RGB y mejorando cada canal por separado [Wahab, 2018].

$$\mathrm{EH} = s_k = (L-1)\sum_{j=0}^{k} p_r(r_j) \quad (10)$$

$$p_r(r_j) = \frac{n_j}{MN} \quad (11)$$

Donde MN está dado el número total de pixeles de la imagen y n_j representa el valor de intensidad r_j.

Ecualización de Histograma Adaptativo Limitado de Contraste CLAHE: Es una modificación directa de Ecualización de Histograma Adaptativo (AHE) [Pizer, 1987], mientras que EH ajusta el contraste de manera global, AHE lo realiza de manera local aplicando EH a pequeñas regiones, aunque esto puede generar ruido al amplificar el contraste en los bordes de las regiones, para evitar esto se limita la amplificación del contraste.

3.1 Criterios de medida

Los resultados fueron medidos utilizando las métricas:

Peak Signal-to-Noise Ratio PSNR: Representa la relación entre la señal máxima y la intensidad de ruido y está dada por la ecuación (12).

$$\mathrm{PSNR} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{\mathrm{MAX}^2}{\mathrm{MSE}}\right) \quad (12)$$

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{\mathrm{MN}}\sum_{i=0}^{M-1}\sum_{j=0}^{N-1}\left(x_{ij} - y_{ij}\right)^2 \quad (13)$$

Donde MAX está representado por la intensidad máxima de la imagen, regularmente 255. MSE representa al error cuadrático medio, que incluso MSE puede considerarse como una métrica propia sin embargo no se utiliza en este artículo.

Structural Similarity SSIM: Representa la medida de similitud entre 2 imágenes y está dada por la ecuación (14) [Wang, 2004].

$$\mathrm{SSIM} = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (14)$$

Donde c_1 y c_2 son variables para estabilizar la división un pequeño denominador. En la experimentación en este artículo, los valores se establecieron de la siguiente manera: $c_1 = (k_1 L)^2$ y $c_2 = (k_2 L)^2$, $k_1 = 0.01$ y $k_2 = 0.03$.

Visual Information Fidelity (VIF): Representa la fidelidad o similitud entre una imagen *perfecta* y la imagen que se está tratando, basándose en el modelado de las características fisiológicas y psicovisuales destacadas del sistema visual humano (HVS) o mediante medidas de fidelidad de señal [Sheikh, 2006].

3.2 Configuración inicial del modelo ICM

El modelo ICM se inicializa con los siguientes parámetros: $f = 0.9, g = 0.8, h = 20$. La matriz de pesos sinápticos w es asignada de la siguiente manera:

$$w = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 0.5 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0.5 & 1 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Estos parámetros están basados en los parámetros ajustados por Ekblad [Ekblad, 2004] donde menciona que estos valores están basados en el algoritmo predecesor, el modelo PCNN.

En la primera iteración, la función de alimentación $F_{ij}[0]$ inicia con los valores de la imagen, por lo tanto la función de alimentación en la primera iteración está dada por la siguiente ecuación:

$$F_{ij}[0] = S_{ij} \quad (16)$$

La función de umbral $T_{ij}[0]$ esta dado de la siguiente ecuación:

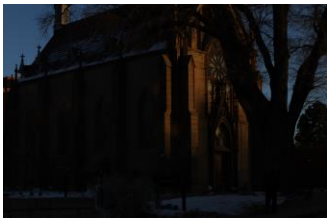
$$T_{ij}[0] = 1 \quad (17)$$

Esto para evitar que todas las neuronas se activen en la primera iteración. Debido a que F_{ij} iniciará con un valor mayor a cero dependiendo de la neurona. De esta manera se asegura que únicamente se activen los pixeles más brillantes en la primera iteración. Por lo tanto, en la iteración 0 el modelo ICM está dado por las ecuaciones 16, 17, 3. Donde la ecuación 3 permanece igual.

Las experimentaciones son realizadas con las imágenes de alto rango dinámico (HDR) de [Sen, 2012], las cuales son imágenes a color de 12 MPx que fueron tomadas utilizando diferentes tiempos de exposición, entre las cuales se puede conseguir tanto imágenes oscuras como brillantes y una imagen de referencia. Las imágenes poseen algunas diferencias respecto a la imagen de referencias, esto debido a que son tomadas en diferentes tiempos, para evitar este problema se utilizan imágenes con estructuras en este caso las imágenes *ChurchInterior* y *Church*, las cuales presentan la menor diferencias.



a) *Church* normal



b) *Church* oscura

 ISSN en trámite

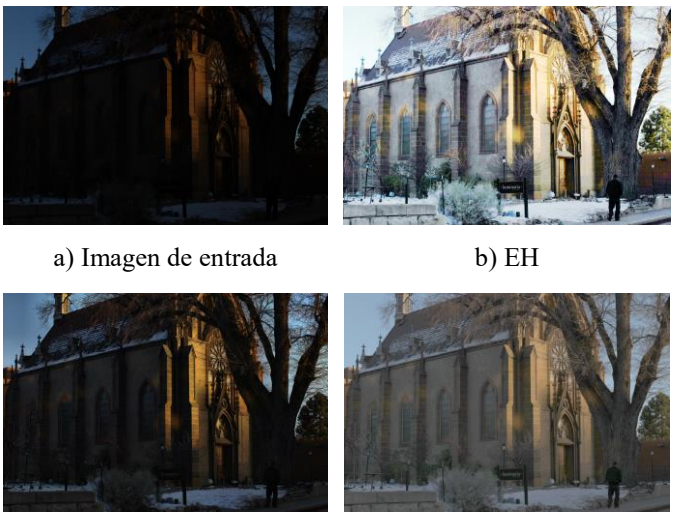


c) ChurchInterior normal d) ChurchInterior oscura

Figura 6. Imágenes HDR del dataset de [Sen, 2012], izquierda imagen original, derecha imagen oscura

4. RESULTADOS

En la Figura 7 se muestran los resultados de mejora de la imagen *Church* con una resolución de 4896 x 3264 utilizando los métodos de EH, CLAHE y ICM medidos con las métricas PSNR, MSSSIM y VIF. Las mejoras fueron realizadas utilizando los espacios de color RGB para cada método. En este caso la imagen de entrada posee una pequeña cantidad de detalles, y esto ocasiona que el método EH y el modelo ICM genere ruido al realizar la mejora, sin embargo, a diferencia de EH el ruido es menos perceptible. En zonas con altos niveles de iluminación el método EH elimina gran cantidad de detalles y arruina el color. Por otra parte, el método CLAHE visualmente genera menor cantidad de ruido, a pesar de que la imagen final sigue siendo visualmente oscura si se compara con la imagen de a) de la Figura 6.



a) Imagen de entrada b) EH

c) CLAHE d) ICM

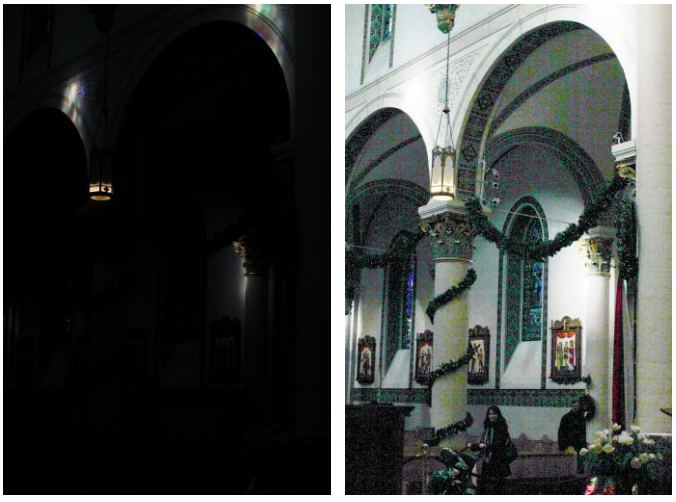
Figura 7. Comparación visual de la mejora de la imagen *Church* con los diferentes métodos

Los resultados objetivos se muestran en la Tabla 1, en donde se muestra que el modelo ICM obtiene mejores resultados con las métricas PSNR y SSIM siendo en promedio un 30% y 67% mejor respectivamente, en el caso de la métrica VIF, el método EH obtuvo un mejor resultado siendo este un 8% mejor, por otra parte, en comparación con CLAHE fue un 13% mejor.

Tabla 1. Resultados de la mejora de la imagen *Church* con los métodos EH, CLAHE y ICM bajo las diferentes métricas

	EH	CLAHE	ICM
PSNR	12.499	10.044	**14.553**
SSIM	0.226	0.231	**0.384**
VIF	**0.0375**	0.030	0.0341

En la Figura 8 se muestran los resultados de mejora de la imagen *ChurchInterior* con una resolución de 3264 x 4896. Esta imagen a diferencia de *Church*, es aún más oscura, visualmente parece ser que tiene zonas completamente en negro sin información aparente. Los resultados tienen un comportamiento similar a la imagen anterior, la diferencia es el ruido, en esta imagen es más evidente, de igual manera CLAHE genera menor ruido, pero con menor iluminación. El resultado de ICM sigue siendo oscura a diferencia de EH, no obstante, EH ha eliminado casi por completo las zonas brillantes a diferencia de ICM o CLAHE. Visualmente la diferencia entre la imagen de entrada y CLAHE es pequeña a diferencia de la imagen anterior en la que de manera visual obtuvo un mejor resultado.



a) Imagen de entrada b) EH



c) CLAHE d) ICM

Figura 8. Comparación visual de la mejora de la imagen *ChurchInterior* con los diferentes métodos

Los resultados de esta imagen se muestran en la Tabla 2. Donde se muestra que el modelo ICM obtiene mejores resultados bajo la métrica SSIM y VIF siendo en promedio un 125% y 40% mejor respectivamente. Bajo la métrica PSNR, ha ganado EH con un 30% de diferencia, pero ICM ha logrado ganar a CLAHE con un 34%.

Tabla 2. Resultados de la mejora de la imagen *ChurchInterior* con los métodos EH, CLAHE y ICM bajo las diferentes métricas

	EH	CLAHE	ICM
PSNR	**11.837**	6.046	8.151
SSIM	0.259	0.093	**0.259**
VIF	0.0171	0.010	**0.0177**

Los resultados obtenidos en la Figura 4, son resultados de experimentaciones que se están realizando, por lo cual no fueron medidos.

De acuerdo a los resultados preliminares del modelo ICM, en la imagen *Church*, entrega mayormente mejores resultados siendo superado únicamente por EH en la métrica VIF similar en la segunda imagen donde ICM es superado en PSNR. De momento se puede afirmar que el modelo ICM tiene resultados equivalentes a EH sin generar una gran cantidad de ruido y sin perder detalles en áreas brillantes. Respecto a CLAHE ambos logran mantener las áreas brillantes sin distorsionarlas.

En este trabajo presenta una primera versión del modelo PCNN que se planea desarrollar para la mejora de imágenes, por lo cual solo se ha podido probar en dos imágenes que se disponían, por lo tanto los resultados obtenidos a pesar de ser buenos, no son concluyentes por la falta de pruebas. Otro inconveniente son los métodos con los que se ha comparado, puesto que son métodos tradicionales, de los más básicos y debería compararse además de estos métodos clásicos con modelos PCNN.

5. CONCLUSIONES

Con los resultados preliminares se puede observar que el modelo ICM y la implementación de la matriz de tiempo podrían ofrecer buenos resultados, aunque solamente se experimentó con 2 imágenes de manera subjetiva se podría decir que tiene mejores resultados que EH debido a que preserva mejor los detalles y respecto a CLAHE recupera más iluminación, aunque visualmente son similares y a menos que se realicen más experimentaciones no se puede considerar que sea mejor que CLAHE. El enfoque presentado para la mejora de la iluminación utilizando la matriz de tiempo se tiene que seguir experimentando y mejorando.

6. TRABAJO A FUTURO

En este artículo se presentan un trabajo preliminar al tema de tesis, el cual es “Mejoramiento de imágenes Mejoramiento de la Calidad de Imágenes Médicas a Color aplicando Redes Neuronales Pulsantes”, por lo cual aún falta mucho por hacer. Hasta el momento solo logra mejorar imágenes oscuras, para hacer la mejora en imágenes brillantes se podría hacer uso del método propuesto por Aguilar en su tesis [Aguilar, 2019], en donde para realizar la mejora utilizando un principio similar al propuesto en este artículo, la imagen es invertida, quedando de esta manera las áreas brillantes como oscuras y posteriormente aplicar el algoritmo de mejora ICM. Una posible forma de reducir el ruido generado es utilizar la función de enlace del modelo PCNN similar a como lo utiliza Zhan [Zhan, 2017] en donde la imagen de entrada pasa por un pre procesamiento y se aplica un filtrado *High Boost*, y restar el resultado con la imagen de entrada quedando un mapa de detalles y este mapa sumarlo a la función de umbral y de esta manera posiblemente reducir el ruido. Sin embargo, para aplicar esta idea es necesario utilizar otro modelo PCNN que incluya la función de enlace. Para tratar el color y evitar las posibles distorsiones que se generas cuando se utiliza el modelo RGB, una posible solución es realizar la mejora utilizando el modelo RGB como lo hace Silpasai [Silpasai, 2018] en donde convierte el modelo RGB en un modelo color utilizado en las antiguas televisiones a color, realizar la mejora en este canal y hacer un pos procesamiento similar a como lo aplica en su artículo. Otra posible solución es aplicar una máscara en 3 dimensiones, un tensor, esto para tomar en cuenta los demás canales y realizar la mejora tomando en cuenta los 3 canales, esto aumentaría considerablemente el tiempo de procesamiento, sin embargo, queda a consideración. Además, se planea realizar experimentaciones más detalladas utilizando diferentes modelos de color como el LAB, en donde toman en cuenta la iluminación o brillo y realizar la mejora en este canal. Como se menciona en este artículo las imágenes con grandes problemas de iluminación tienen problemas al ser mejoradas con esta técnica, por tal motivo, se planea experimentar en imágenes con iluminación no tan drástica, en donde posiblemente tenga mejor resultado. Actualmente se está

utilizando un dataset con imágenes HDR tomadas con diferentes tiempos de exposición, no obstante, algunas tienen diferencias entre imágenes, por lo cual se sigue buscando un dataset con imágenes oscuras y un *Ground truth* o en caso contrario implementar métricas sin referencia y experimentar con el dataset de imágenes oscuras ExDark [Loh, 2018].

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). J. Andrés Arizmendi S. agradece a CONACYT por la beca concedida para la realización de sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

Abràmoff, M.D., Garvin, M. K., and Sonka, M (2010). Retinal Imaging and Image Analysis. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering* (3), 2010, pp. 169-208.

Aguilar, K. S., Mejía, M., Magadán, A. and Reyes, G. (2019). Red Neuronal con Matriz de Tiempo para Mejoramiento de Imágenes. *TecNM/CENIDET.*

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,* volume (2), issue (3), pp. 293-307.

Ekblad, U., Kinser, J. M., Atmer, J., and 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,* volume (525), pp. 392-396.

Gonzalez, R. C., Woods, R. E. (2017). *Digital Image Processing*, Cap 3, p. 133, Pearson.

Jena, M.. and Mishra, S. (2018). Review of neural network techniques in the verge of image processing. *Advances in Intelligent Systems and Computing,* volume (628), pp. 345-361.

Johnson, John L. (2008). Pulse-coupled neural nets: translation, rotation, scale, distortion, and intensity signal invariance for images. *Applied Optics,* volume (33), issue (26), pp. 6239-6253.

Kinser, Jason M. (1999). A Simplified Pulse-Coupled Newal Network. *Applications and Science of Artificial Neural Networks II,* volume (2760), pp. 563-567.

Lindblad,T., Kinser, J. M. (2005). *Image Processing Using Pulse-Coupled Neural Networks*, Springer.

Loh, Y. P., Chan, C. S. (2018). Getting to know low-light images with the Exclusively Dark dataset. *Computer Vision and Image Understanding,* volume (178), pp. 30-42.

Ma, Y., Zhan, K., Wang, Z. (2010). *Applications of Pulse-Coupled Neural Networks*, Springer.

Ortiz, R. (2017). Detección de Ruido Impulsivo o Gaussiano en Imágenes Monocromáticas Mediante Redes Neuronales Artificiales Pulso-Acopladas. *TecNM/CENIDE México.*

Park, J., Lee, H., Kim, B., *et al*. (2019). A Low-Cost and High-Throughput FPGA Implementation of the Retinex Algorithm for Real-Time Video Enhancement. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems,* volume (28), issue (1), pp. 101 - 114.

Pedersen, M., Bonnier, N., Hardeberg, J. Y., and Albregtsen, (2010). Attributes of image quality for color prints. *Journal of Electronic Imaging,* volume (19), issue (1), p. 11016.

Pratt, W. K., (2007). *DIGITAL IMAGE PROCESSING*, 243. John Wiley & Sons, Los Altos, California.

Pizer, S. M., Amburn, E. P, Austin, J. D., *et al.* (1987). Adaptive Histogram Equalization and Its Variations. *Computer vision, graphics, and image processing,* volume (39), issue (3), pp. 355-368.

Sen, P., Kalantari, N. K.,Yaesoubi, M., *et al.* (2012). Robust patch-based HDR reconstruction of dynamic scenes. *ACM Transactions on Graphics,* volume (31), issue (6).

Sheikh, H. R.., and Bovik, A. C. (2006). Image information and visual quality. *IEEE Transactions on Image Processing,* volume (15), issue (2), pp 430-444.

Silpasai, R., Singh, H., Kumar, A. and Balyan, L. K. (2018). Homomorphically Rectified Tile-wise Equalized Adaptive Gamma Correction for Histopathological Color Image Enhancement. *2018 Conference on Information and Communication Technology, CICT 2018,* issue (1), pp. 1-6.

Zheng, R., Guo, Q., Gao, C., and Yu, M. A. (2019). A hybrid contrast limited adaptive histogram equalization (clahe) for parathyroid ultrasonic image enhancement. *Chinese Control Conference, CCC,* volume (2019-July), pp. 3577-3582.

Wahab, A. A., Salim, M. I. M., Yunus, J., and Ramlee, M H. (2018). Comparative evaluation of medical thermal image enhancement techniques for breast cancer detection. *Journal of Engineering and Technological Sciences,* volume (50), issue (1), pp. 40-52.

Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., *et al*. (2004). Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing,* volume (13) issue (4), pp. 600 - 612.

Wu, F. X. (2016). Colour Image Enhancement Method Combined PCNN and PCA Based on NSCT. *Revista de la Facultad de Ingeniería,* volume (31), pp. 233-241.

Zhan, K., Teng, J., Shi, J., *et al.* (2016). Feature-Linking Model for Image Enhancement. *Neural Computation,* volume (28), issue (6), pp 1072-1100.

Zhan, K., Shi, J., Teng, J., *et al.* (2017). Linking synaptic computation for image enhancement. *Neurocomputing,* volume (238), pp. 1-12.

Taxonomía de herramientas de ingeniería dirigida por modelos (MDE), para el desarrollo de aplicaciones embebidas y/o ciber-físicas.

Julio Cesar Bernabe Analco* Moisés González García* Luis Gerardo Vela Valdés* Rene Santaolaya Salgado* Olivia Graciela Fragoso Diaz*.

**Departamento de Ciencias de la Computación Cuernavaca, Morelos. México*
Tecnológico Nacional de México / CENIDET,
Cuernavaca, Morelos. México
(julio.bernabe19ce@cenidet.edu.mx)

Resumen: La Ingeniería Dirigida por modelos (MDE) es una metodología que promueve el uso intensivo de modelos para hacer frente a la complejidad inherente al diseño de aplicaciones, por lo que se requiere combinar las actividades simples de desarrollo con el uso de lenguajes de modelado de dominio específico, transformadores de modelos y generadores de código. En este artículo se presenta una clasificación de las herramientas dirigidas por modelos para el desarrollo de sistemas embebidos y/o ciber-físicos, con el enfoque sistemático de la ingeniería de sistemas basada en modelos (MBSE). Se identifican herramientas que soportan cada etapa de desarrollo desde un modelo de alto nivel de abstracción, transformadores de modelo a modelo, y de modelo a texto, hasta obtener textos del más bajo nivel de abstracción, como el código ensamblador o código C/C++.

Palabras clave: MDA, MDE, MBSE, Sistemas embebidos, Sistemas Ciber-físicos, herramientas.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas ciber-físicos comprenden componentes digitales, análogos, físicos y humanos que interactúan, construidos mediante la ingeniería que integra elementos de lógica (software) y elementos físicos (hardware y otros) (Kewin et. al. 2015). El enfoque principal para construirlos es la Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE) (Cesar et. al. 2013).

La MDE promueve el uso intensivo de modelos para hacer frente a la complejidad inherente al diseño de aplicaciones, por lo que MDE va más allá que las simples actividades de desarrollo, de hecho, combina otras tecnologías como por ejemplo el uso de lenguajes de modelado de dominio específico y generadores o transformadores (Aintzane et. al. 2013).

En el contexto MDE, la Arquitectura Dirigida por Modelos (MDA) es un enfoque de diseño que tiene como objetivo acelerar el desarrollo de aplicaciones, simplificar la integración entre distintas tecnologías y reducir el costo de la migración de aplicaciones a nuevas plataformas (Cesar et. al. 2013).

La clave de MDA es la importancia de los modelos en el proceso de desarrollo de software, es por eso que propone la definición y uso de modelos (modelos visuales) a diferentes niveles de abstracción para guiar todo el proceso de desarrollo (análisis, diseño, mantenimiento e integración), así mismo la posibilidad de generación automática de código (texto) a partir de los modelos definidos y de las reglas de transformación entre dichos modelos (Cuesta et. al. 2009).

Por un lado, los lenguajes de modelado se basan en meta-modelos, que permiten la descripción de la estructura, comportamiento y requisitos de un sistema. Por otro lado, las transformaciones de modelos permiten el análisis de los modelos para la obtención de código (transformaciones de modelo a texto) o la obtención de otros modelos (transformaciones modelo a modelo) (Douglas D. S. 2004).

Así, la Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos (MBSE) es un enfoque sistemático del modelado que se utiliza con frecuencia para soportar las actividades de especificación, diseño, verificación y validación de requisitos de desarrollo de sistemas. Sin embargo, es difícil personalizar el enfoque MBSE para el desarrollo de sistemas embebidos y/o ciber-físicos debido a sus diversos aspectos de comportamiento. Además, la selección adecuada de herramientas para realizar actividades de MBSE en particular es un desafío (Muhammad R. y Aamir M. 2015).

MBSE es un área desafiante debido a la diversidad de características conductuales/temporales de los sistemas embebidos. Es difícil seleccionar técnicas de modelado adecuadas y perfiles UML para modelar los requisitos de los sistemas embebidos (Iván M. R. C. 2011).

Existe una dependencia considerable entre las diferentes actividades de MBSE (es decir, modelado, transformación de modelos, verificación y simulación), y los niveles de abstracción definidos en la MDA para ubicar los modelos requeridos (CIM, modelo independiente de cómputo, PIM, modelo de independiente de plataforma, y PSM, modelo de plataforma específica), que requieren un conocimiento suficiente de todas

las actividades para el desarrollo de sistemas embebidos (Daniela et. al. 2017).

Existen conjuntos de herramientas independientes para cada actividad y la selección de las herramientas adecuadas para el desarrollo de sistemas integrados siempre es problemática, para los investigadores y profesionales (Vicent A. y Sudeep K. 2017) (María et. al. 2012) (Saldaña G. J. A. 2007).

Este artículo presenta una taxonomía de las herramientas de la Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE) para el desarrollo de sistemas embebidos y/o ciber-físicos, relacionadas directamente con las actividades de MBSE. Desde la recopilación de requisitos, la creación de una arquitectura de alto nivel, y demás actividades, utilizando varias transformaciones entre modelos, hasta llegar al más bajo nivel de abstracción, del código C o C++.

Inicialmente, se aborda el tema de la Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos (MBSE), explicando el ciclo de desarrollo mediante las actividades desarrolladas para construir los sistemas embebidos. Posteriormente, se continúa con la clasificación de las herramientas más usadas en la MBSE, para el desarrollo de sistemas embebidos y/o ciber-físicos. Finalmente, se examinan las herramientas más utilizadas actualmente. Para que se realice una experimentación, que permita probarlas, compararlas y deducir cuales son las ventajas y desventajas de las herramientas seleccionadas.

2. METODOLOGÍA

Un sistema embebido es una encapsulación que incluye el hardware y el software en un dispositivo, normalmente en una sola tarjeta, para realizar un propósito específico (Rubén D. S. D. 2013). Mientras que un sistema ciber-físico es una integración de computación con procesos físicos, mediante la fusión orgánica y la coordinación de técnicas como la computación, comunicación y control, funcionando en tiempo real (Yuying et. al. 2012).

MBSE emplea tecnologías basadas en modelos junto con las prácticas de ingeniería de sistemas establecidas. La principal motivación de MBSE es utilizar el modelo como elemento fundamental en la ingeniería de sistemas y asegurar que el modelo se convierta en el sistema real (Saurabh M. y Jose L. R. M. 2013).

MDE proporciona muchas herramientas y prácticas de software que automatizan el desarrollo y la transformación del modelo, facilitando así el uso del modelo como un componente del software real. La diferencia critica entre MBSE y MDE es que la primera se basa en la teoría de los sistemas generales, y MDE se basa en una metodología para desarrollar sistemas por modelos (Saurabh M. y Jose L. R. M. 2013).

En la Figura 1, se presentan el flujo MBSE, donde se inicia desde definición de requerimientos, y el modelado, Donde se utilizan lenguajes como UML, SysML y MARTE. Para obtener los modelos que intervendrán en las transformaciones de modelo a modelo (M2M) o de modelo a texto (M2T), para producir modelos más detallados cada vez (pertenecientes a los niveles de abstracción CIM, PIM y PSM de la MDA).

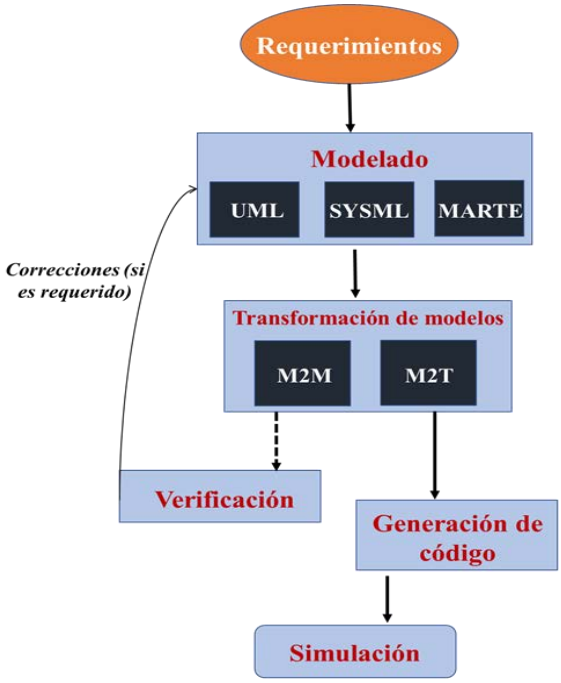


Fig. 1: Elementos principales de MBSE para sistemas embebidos (Muhammad R. y Aamir M. 2015).

Como se observa en la figura 1, los modelos se verifican y se hacen correcciones (si son requeridas) en el modelado y cuando la verificación de los modelos es exitosa, se desarrollan las transformaciones siguientes requeridas, para abarcar los tres niveles de abstracción de la MDA, hasta generar el código (Mario et. al. 2011). Posteriormente se simula, para cerciorarse que se cumple con los requerimientos especificados al inicio del proceso.

Tanto para el modelado como para la transformación de modelo a modelo y de modelo a texto, en MDA, se definen los meta-modelos apropiados que contengan los elementos de los modelos de entrada y de salida a utilizar, la semántica específica del dominio (Cristina V. C. y Diego A. C. 2007). El meta-modelado es el proceso de especificación completa y precisa de un meta-modelo, expresado apegándose a un meta-meta-modelo.

En la mayoría de los enfoques que implementan MDE, uno de ellos es MDA, se definen cuatro meta-niveles: para el modelo (M1), el metamodelo (M2) y el meta-meta-modelado (M3). En el nivel más bajo, M0, se ubican los objetos y datos instancias del modelo (Ej. los clientes, las cuentas, los empleados, etc.). En la figura 2, se muestra el patrón descrito de niveles de meta-modelado de MDA.

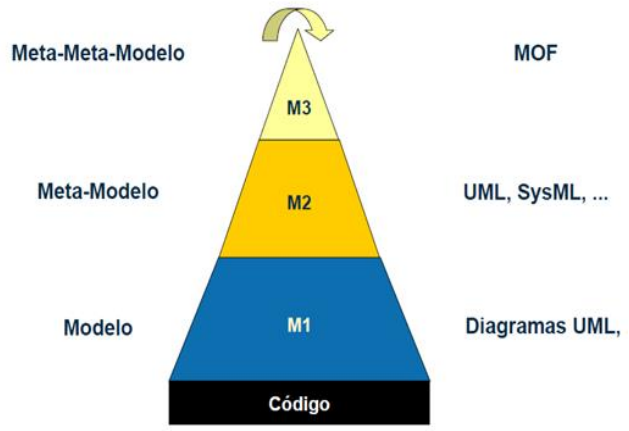


Fig. 2. Patrón de meta modelado (Cristina y Diego 2007).

3. BUSQUEDA DE HERRAMIENTAS MDE.

Se tomó como base el artículo de los repositorios MDA [10], para realizar la primera búsqueda de las herramientas MDE, donde se consultó cada repositorio (descritos en la tabla 1, apartado de URL) descrito en el artículo, verificando que estuviera activo el repositorio para hacer una búsqueda exhaustiva. Producto de esta búsqueda se encontraron 37 herramientas MDE, como primera versión para crear la taxonomía de herramientas.

Los repositorios son sistemas de información que tienen como fin organizar, preservar y difundir, en el modo de acceso abierto, recursos científicos y académicos. Deben ser sustentables a largo plazo, permiten incrementar y fortalecer el acceso a los recursos, cuentan con mecanismos para el depósito de material por el creador u otra persona y una arquitectura para manejar contenidos y metadatos, además de prestar servicios como búsquedas, recuperación, administración, control de acceso y permisos (Gloria et. al. 2019).

Existen varios tipos de repositorios: a) temáticos, los materiales que contiene o abarcan una determinada disciplina, b) nacionales, representan parte de la producción científica de un país, c) de datos, reúnen elementos que formaron parte de investigaciones, d) agregados, unen varios repositorios, y e) institucionales, contienen la producción académica y científica que genera una institución (Gloria et. al. 2019).

En la tabla 1, se presenta una visión general de los repositorios más representativos en el área de desarrollo por modelos. La información incluida en la tabla proviene de los sitios web (URL) incluidos en la tabla. ReMoDD es el repositorio más destacado respecto que ofrece una especie de consulta sobre Modelos, Meta-modelos y Transformaciones y lo complementan 24 herramientas de modelado que básicamente cubren desde la etapa de requisitos hasta la generación de código.

Tabla 1. Una muestra de herramientas de modelado empleadas en repositorios colaborativos (Juri et. al. 2015).

Repositorio	Artefactos administrados	Herramientas encontradas	Herramientas disponibles para modelado	URL
Rational Rhapsody	SysML Modelos UML	1	Rational Architec	www-03.ibm.com
Enterprise Architec	SysML Modelos UML	3	Enterprise Architec, StarUML, AndroMDA.	www.sparxsystems.com.au
Visual Paradigm	Modelos UML	1	Visual paradigm	www.visual-paradigm.com
MagicDraw	Modelos UML	Ninguna herramienta	No encuentra la página, el sitio está en mantenimiento	www.nomagic.com/getting started/solutions
Modelio	Modelos	1	Modelio	www.modelio.org
GenMyModel	Modelos UML	1	Te pide una suscripción por una pequeña cuota para descargar la herramienta	www.genmymodel.com
CDO	Modelos Meta-modelos	1 recurso	EMF	www.eclipse.org/cdo
EMFStore	Modelos Meta-modelos	1	EMFStore (se puede utilizar para instancias de EMF Model existente)	http://eclipse.org/emfstore
MORSE	Modelos	No se encuentra disponible	Ruta no encontrada	www.infosys.tuwien.ac.at/ prototyp/morse
ModelBus	Modelos, Meta-modelos Transformaciones	3 herramientas	Enterprise Architect, Rational Architect, Matlab Simulink,	www.modelbus.org
AMOR	Modelos Meta-modelos	Ninguna herramienta	Página principal de prototipos del repositorio, no menciona herramientas.	www.modelversioning.org
ReMoDD	Modelos, Meta-modelos Transformaciones	24 herramientas	Referencia de la tabla 2 [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 33, 35]	www.cs.colostate.edu/remodd
GME	Modelos Meta-modelos	No se encuentra disponible el sitio	La ruta es la correcta, no se encuentra disponible por mantenimiento	www.isis.vanderbilt.edu/ projects/gme
MDEForge	Modelos, Meta-modelos, Transformacion, editores	1 herramienta	ATL (lenguaje de transformación Atlas)	www.mdeforge.org

El repositorio de ReMoDD, se tomó como base para una segunda búsqueda más a detalle de las herramientas MDE, porque fue el repositorio con más herramientas disponibles para consultar y eran las más activas en el mercado de desarrollo MDE. La prioridad era encontrar herramientas que satisficieran las actividades de MBSE, ya sea que cumplieran con una actividad específica o herramientas que se dedicaran a soportar más de 2 actividades. Si realizaban todo el proceso de MBSE de principio a fin serian mejor, porque no se tendrían problemas de compatibilidad de modelos, al momento de realizar el proceso de MDE.

4. TAXONOMIA DE HERRAMIENTAS MDE

Para realizar la taxonomía se tomaron criterios o características sobre cada herramienta: si es de código abierto (open-source), en que entorno se trabaja (Eclipse IDE), las plataformas de desarrollo (Windows, Linux, MAC), su última versión de descarga, la relación con otras herramientas de la misma taxonomía. Lo más importante es la actividad o etapa que soporta, del enfoque MBSE, pues permite determinar que herramientas se deben elegir cuando se realiza una actividad, o si existen algunas herramientas que soporten el flujo completo de desarrollo de MBSE.

En la tabla 2, se presenta las herramientas MDE estructuradas de acuerdo a una variante de la categoría técnica "funcionalidad específica" (Jon Whittle et. al. 2015). En este caso, funcionalidades para las realizar las actividades de la ingeniería de software dirigida por modelos (MDSE, mostradas en la Fig. 1), en el dominio de sistemas de tiempo real: el modelado, las transformaciones de modelos (M2M, M2T), la verificación de modelos, la generación de código y la simulación. Para facilitar la elección de alguna herramienta considerando su propósito.

La mayoría de las herramientas trabaja con el entorno de desarrollo Eclipse, por lo que se disminuye la posibilidad de tener problemas de compatibilidad de modelos, en todo el desarrollo de las actividades de desarrollo MDE.

El objetivo de esta taxonomía de herramientas de la MDE es facilitar la identificación de herramientas que nos ayuden en el desarrollo de artefactos de los elementos principales de MBSE. Para mejorar la decisión sobre qué herramientas se pueden utilizar para desarrollar un sistema embebido o ciber-físico.

Tabla 2. Taxonomía de herramientas MDE.

No.	***Herramienta***	***Sistema operativo /plataforma***	***Asociación con otras herramientas /lenguajes***	***Última versión***	***Tipo de software***
Modelado (7)					
1	*AndroMDA*	Multiplataforma	Todo tipo de herramientas UML	3.5	libre
2	*Enterprise Architect*	Windows Mac IOS	ActionScript, Ada,C y C++, C#, Java, Delphi, Verilog, PHP, VHDL, Python, System C, VB.Net, Visual Basic	13.5	Versión de prueba
3	*Rational Architect*	Windows Linux Mac OS X	Todo tipo de herramientas UML	9.7	Versión de 30 días, software de paga.
4	*Visual paradigm*	Windows	UML, SysML, BPMN, SoaML	16.0	libre
5	*Modelio*	Windows Linux MAC	UML, BPMN	4.0	Software de paga, versión gratis de 30 días.
6	*StarUML*	Windows Mac Linux	UML, BPMN, C++, C#, java	3.2	libre
7	*Sirius*	Eclipse	EMF, GMF, XML	Paquete libre para instalar	Herramienta de modelado libre
Transformación de modelos (18)					
8	*ATL*	Windows, Mac, Linux, Eclipse IDE.	Motores de transformación como QVTo y QVTd. Relación EMF	4.1	Plugin, complemento de Eclipse
9	*VIATRA*	Windows, Mac, Linux, Eclipse IDE.	Objetos EMF	2.2.1	SDK de consulta de tipo de transformación para Eclipse.
10	*OCL*	Windows, Mac, Linux, Eclipse IDE.	UML, EMF, Papyrus, Xtext y enlaces Ecore	2.4	Conjunto de librerías org.eclipse.ocl. pivot/model/ OCL-2.5.oclstdlib.
11	*MWE*	Eclipse	XML	Versión tipo plugin	Traducción de modelos en lenguaje XML.

12	*QVT*	Windows, Mac, Linux, Eclipse IDE	Complementos de QVT	No especifica	Librerías de QVT
13	*EuGENia*	Windows, Mac, Linux, Eclipse IDE.	Enlaces Ecore, EMF	Versión no disponible	Editor para GMF
14	*Exced*	Windows, Mac, Linux, Eclipse IDE.	Modelos EMF. Combinación con Modelink	versión no disponible	Editor para ver características de modelos EMF.
15	*Modelink*	Windows, Mac, Linux, Eclipse IDE.	Editor Exeed	Versión no disponible	editor que consta de 2-3 editores basados en árbol EMF en paralelo.
16	*Workflow*	Windows, Mac, Linux, Eclipse IDE.	Modelos EMF	0.8.5	Transformación y validación de los modelos EMF
17	*HUTN*	Windows, Mac, Linux, Eclipse IDE.	ETL, EGL, EVL	1.0	Transformaciones de XMI
18	*Concordance*	Eclipse	EMF	No incluye versión	Un marco de gestión de la integridad del modelo
19	*Gemoc Studio*	No especifica.	Xtext, Sirius Animator	No incluye versión	proporciona un enfoque modular para complementar un metamodelo Ecore
20	*GME*	Windows, Mac, Linux	GREAT, UDM, CAPE	18.10 .exe	kit de herramientas configurable para crear entornos de modelado y de dominio.
21	*GREAT*	No especifica	GME, UDM	1.7.8 .exe	reglas de reescritura de gráficos
22	*UDM*	No especifica	GME, GREAT	3.2.15 .exe	archivo de esquema XML (. DTD o .XSD).
23	*CAPE*	plataforma de aprendizaje basada en la web	GME	2.6	representar el diseño de experiencias de aprendizaje en línea
24	*Epsilon*	MAC, Windows, linux	EMF, XMI, OCL, HUTN, Ecore, SIMULINK, XML	1.5.1	Herramientas desde la transformación – generación de código.
25	*MOFScript*	Lenguaje de transformaciones de modelos	Acceleo, JET, Xtend, EMF	No especifica	Plugin de verificación de programas, transformaciones
Generación de código (3)					
26	*Acceleo*	Windows, Mac, Linux	ATL	3.3	Generación de código basada en el estándar MOFM2T de OMG
27	*EGF*	Windows, Mac, Linux	EMF	No especifica	Plugin o complemento de EMF para la generación de código
28	*EMF*	Windows, Mac, Linux, Eclipse	Núcleos EMF	No especifica	Plugin para generar el código
Verificación de modelos (2)					
29	*EUnit*	Eclipse	EMF	No especifica	pruebas unitarias
30	*UPPAAL*	Mac, Windows, linux	Validación y verificación C++, Java	4.1.24	Requiere licencia
Simulación (2)					
31	*SIMULINK*	Mac, Windows, linux	MATLAB, C, C++, HDL	R2019	Modelado y simulación del sistema Prueba gratuita 30 días
32	*CDT*	Eclipse	C, C++	9.10.0	Compilación y depuración
Conjuntos de herramientas que soportan el proceso completo (3)					
33	*Papyrus*	Mac, Windows, Linux, Eclipse	UML, SysML, MARTE	4.6.0	Requerimientos-generación de código.
34	*AutoFocus3*	Mac, Windows, Linux, Apache	C, java	2.16	Requerimientos-simulación

35	*Capella*	Windows, MAC, Linux, Eclipse	UML, SysML, Java, C++	1.4.0	Requerimientos-generación de código

En el contenido de la tabla 2, se evaluaron los campos del tipo de sistema operativo donde trabaja cada heramienta (Windows, Linux, Mac), en el caso de la plataforma la mayoria esta basada en Eclipse IDE, por consecuente se trato de establecer un campo de relación con lenguajes y herramientas donde destacan UML, EMF, C++, entre otros. Otros campos son la ultima versión de la herramienta y si era de software libre, por lo que la mayoria de herramientas cubrio esos requisitos fundamentales para poder realizar dicha taxonomia.

5. DISCUSIÓN

Para la selección de herramientas MDE, se tomaron como prioridades las siguientes características:

- Que las herramientas fuera de código abierto (open-source),
- Que tuvieran una asociación entre herramientas para lograr la meta de valor (abarcar al menos un elemento de la MBSE) para el desarrollo del sistema embebido y las plataformas disponibles.
- Que la última versión esté disponible para utilizarla sin ninguna dificultad,
- Y, por último, que abarque los elementos de MBSE, para la generación de artefactos de los niveles de abstracción de MDA (CIM, PIM y PSM), desde la definición de requerimientos hasta la generación de código.

Los sistemas embebidos y/o ciber-físicos son muy diversos en su desarrollo de principio a fin. Y cambian en su comportamiento e interacción en tiempo real (José I. H. V. 2010).

Se identificaron tres ensambles o conjuntos de herramientas (33 *Papyrus*, 34 *AutoFocus3* y 35 *Capella*), que son candidatos para evaluarse experimentalmente, utilizándose en un caso de estudio sencillo y determinar sus ventajas y desventajas.

Sobre el resto de las herramientas que soportan la funcionalidad requerida para realizan una actividad en específico, se requiere evaluar que herramientas son compatibles en el momento de hacer una transición de una actividad a otra de MBSE, por lo que nos quitaría tiempo en verificar y validar cada una y lo que se busca es el rendimiento y aumentar la productividad del desarrollo para sistemas embebidos y/o ciber-físicos, por lo que las 32 herramientas restantes se podrían utilizar como complementos en caso de no hacer una transición correcta de una actividad a otra.

6. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

El análisis de la taxonomía determina que hay herramientas MDE que soportan la funcionalidad requerida por una actividad de la MBSE, y hay conjuntos de herramientas que abarcan todo el proceso de dicho enfoque.

Se presentaron las herramientas MDE disponibles y que se utilizan en la industria, para desarrollar sistemas embebidos y/o ciber-físicos y que soportan el desarrollo. Sin embargo, la taxonomía de herramientas MDE se tiene que actualizar continuamente. Porque el mercado industrial demanda mejoras y algunas herramientas se van quedando en el camino, por el simple hecho de que no son muy reconocidas por los practicantes o sus desarrolladores no le dan el mantenimiento y las actualizan.

Así, un trabajo futuro es la actualización continua de la taxonomía y abarcar más rasgos o características para una selección segura y mejor de las herramientas MDE.

Se realizará una experimentación con los conjuntos de herramientas seleccionados, para evaluar comparativamente las dificultades y facilidades, ventajas y desventajas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado mediante el programa de becas para estudios de posgrado, que ha hecho posible la investigación para la realización de este artículo.

REFERENCIAS

Aintzane A., Aitor A., Rafael P., Elisabet E., Darío O., Marga M. 2013, “Ingeniería basada en modelos aplicada a sistemas dinámicamente reconfigurables”.

Alberto V. J., Fernando C. R., Rodolfo H. G., Gerardo B., Javier A. 2015, “El control de sistemas ciber-físicos industriales revisión y primera aproximación”.

Cesar C., Laura B., Patricia L. M., José M. D. 2013, “Beneficios que aporta la metodología MDE a los entornos de desarrollo de sistemas de tiempo real”, Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 10, 216-227.

Cristina V. C., Diego A. C. 2007, “Herramientas Eclipse para Desarrollo de Software Dirigido por Modelos" vol. 1, N° 8, Sistedes, ISSN: 1998-3455.

Cuesta M. A., López T. M., Joyanes A. L. 2009, "Comparativo de herramientas MDA", vol 4, págs. 50 - 58.

Daniela G., Letitia L., Ludovic A. 2017, “Model-Driven Performance Evaluation and Formal Verification for Multi-level Embedded System Design”, 5th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development.

Douglas D. S. 2004, "Model Driven Engineering", IEEE Computer Society, pp 25-31, Feb 2006Smith, S.E.

Gloria C. T. S., Magally M. R., Anabelem S. M. 2019, "Repositorios de acceso abierto en las instituciones de educación superior en Mexico – Una revision inicial mediante la metodología SCOT", ISSN 1514-8327 (impresa) / ISSN 1851-1740, Información, cultura y sociedad /40.

Iván M. R. C. 2011, "Automatic generation of software applications from standard MDA standard based on the method of artificial intelligence and expert systems", Gerenc. Tecnol. inform., vol. 10, N° 26.

Jon W., Mark R., John H., Håkan B. 2015, "A taxonomy of tool-related issues affecting the adoption of model-driven engineering", Software and Systems Modeling.

José I. H. V. 2010, "El software Embebido y los retos que implica su desarrollo", Conciencia tecnológica No. 40.

Juri D. R., Davide D. R., Ludovico I., Alfonso P. 2015, "Collaborative Repositories in Model-Driven Engineering", en IEEE SOFTWARE.

Kewin J. S. C., Federico P. T., Fernández A. A., David J. M. A., Luis A. C. S. 2015, "Sistema Ciber-físico de una CNC para la producción de circuitos impresos.", Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco Cartagena, Colombia.

Maria S., Florian H., David T. 2012, "Verified System Development with the AutoFocus Tool Chain", 2nd Workshop on Formal Methods in the Development of Software.

Mario R. N., Jose A. C., Francisco H. T. 2011, "Automatic Code Generation from Finite State Machines", ISSN 1405-5546, Computación y Sistemas Vol. 14 No 4, pp 405-421.

Muhammad R., Aamir M. K. 2015, "Towards the Tools Selection in Model Based System Engineering for Embedded Systems - A Systematic Literature Review", Journal of Systems and Software.

Ruben D. S. D. 2013, "State of the art of embedded systems from an integrated perspective between hardware and software", revista colombiana de tecnologias de avanzada.

Saldaña G. J. A. 2007, "Caracterización de Imágenes en Movimiento: Correr y Caminar", Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación. CENIDET.

Saurabh M., Jose L. R. M. 2013, "Model-driven Systems Engineering for netcentric system of systems with devs unified process", Winter Simulation Conference.

Vicent A., Sudeep K. 2017, "Tool Support for Live Formal Verification", ACM/IEEE 20th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems.

Yuying W., Xingshe Z., Dongfang L. 2012, "Study on Integrated Modeling Methods toward Co-simulation of Cyber-Physical System", IEEE 14th International Conference on High Performance Computing and Communications.

Sistema de Servicios para la Medición de la Modularidad de Arquitecturas de Software

Marisol Ramírez Cruz* René Santaolaya Salgado* Olivia G. Fragoso Díaz*
Nelida Barón Pérez*.

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico /CENIDET, Depto. Ciencias Computacionales, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.*
(Tel: 01(777) 362-7770; e-mail: marisol.ramirez19ce@cenidet.edu.mx, rene.ss@cenidet.tecnm.mx, olivia.fd@cenidet.tecnm.mx, nelida.baron18ca@cenidet.edu.mx).

Resumen: En Ingeniería de Software el proceso de desarrollo de productos de software debe ser controlable. Los proyectos futuros pueden beneficiarse de mediciones realizadas a proyectos anteriores con características similares y así tener medidas ajustadas. Así mismo, las mediciones pueden servir para la corrección de código desagradable por medio de métodos de re-factorización, lo cual disminuye el concepto de deuda técnica. Las métricas, en general, tienen por objetivo evaluar diferentes características de calidad de las diferentes entidades de software, como, la robustez y la facilidad de mantenimiento, entre otras. En esta investigación se describe la implementación de cuatro métricas en un sistema para medir el factor de modularidad de arquitecturas orientadas a objetos, dos encontradas en la literatura (COF, LCOM*) y otras dos propuestas por los autores de este artículo (FR, CrCU).

*Palabras clave***:** métrica, coherencia, cohesión, acoplamiento, modularidad, responsabilidad, medición, re-factorización.

1. INTRODUCCIÓN

Los inicios de la medición datan de los años 60's, en donde solo se realizaban medidas sencillas como la cantidad de líneas de código (LOC) de los módulos y el tiempo dedicado en cada etapa del ciclo de vida. Posteriormente en los años 70's algunos modelos intentaron establecer una relación entre el tamaño de los programas y el esfuerzo necesario para el desarrollo y mantenimiento (Boehm, 1984). Aparecieron las normas ISO 9000 y los modelos CMM (Paul, Curtis and Beth, 2009). En los años 90s el desarrollo de métricas se centró en clasificar, estudiar y validar las métricas del software (Fenton and Bieman, 1991).

En el desarrollo de proyectos actuales surgen cuestiones como el cálculo del tiempo estimado para el desarrollo, los costos de mantenimiento, entre otros. Pero estas no son resueltas sin la ayuda de la medición. En proyectos de desarrollo de software la medición mediante el uso de métricas juega un papel importante debido a que permite el control y mejora de su calidad.

Según De Marco, "No se puede controlar lo que no se puede medir" (De Marco, 1982), por otro lado Fenton y Bieman (Fenton and Bieman, 1991)mencionan que "No se puede predecir lo que no puede ser medido". En Ingeniería de software el proceso de desarrollo y la calidad de los productos de software deben ser controlables. Las métricas en general tienen por objetivo evaluar diferentes características de calidad de los sistemas de software como la robustez y la facilidad de mantenimiento, entre otras.

Los proyectos futuros pueden beneficiarse de mediciones realizadas en proyectos anteriores con características similares y así tener medidas mejor ajustadas. Así mismo, las mediciones pueden servir para la corrección de código desagradable por medio de métodos de re-factorización, lo cual disminuye el concepto de deuda técnica.

De acuerdo a lo anterior y tomando en cuenta que las métricas permiten evaluar las características que mejoren desarrollos de proyectos futuros y se aumente su calidad de los productos existentes, en este artículo se describe la implementación de cuatro métricas para realizar la medición del factor de modularidad de arquitecturas de software orientadas a objetos: dos métricas encontradas en la literatura y dos métricas propuestas resultantes de la investigación de los autores y que son sustentadas bajo la teoría de la medición.

2. MARCO TEORICO

2.1 Acoplamiento

Se refiere al grado de interdependencia entre módulos. El grado de acoplamiento se puede utilizar para evaluar la calidad del diseño de un sistema. Es preciso minimizar el acoplamiento entre módulos, es decir, minimizar su interdependencia. El criterio de acoplamiento es una medida para evaluar cómo un sistema ha sido modularizado (Joyanes Aguilar, 2008). A menor acoplamiento de una entidad de software, ésta tendrá más completitud y suficiencia para cumplir con su objetivo o meta de valor para el usuario.

2.2 Coherencia

A nivel de clase, la coherencia se define como el grado de relación funcional de las responsabilidades en la clase, o módulos, o paquete de programa. Esta métrica tiene cierta relación con el principio de una única responsabilidad "Single *Responsibility Principle"* por sus siglas en inglés (SRP) (C. Martin and Martin, 2006). Diferentes subconjuntos de funciones relacionadas significan que la entidad de software tiene más de una responsabilidad, lo cual contradice el principio de única responsabilidad. Lo deseable es que cada entidad de software tenga una única responsabilidad, lo que significa que en cada unidad de software debe haber un único conjunto de funciones, las cuáles todas participan para alcanzar el objetivo de la entidad de software o la meta de valor para el usuario.

2.3 Cohesión

El término cohesión tiene su origen en el diseño estructural y se refiere a la relación entre los diversos elementos de una clase o módulo de software. Es un indicador importante de la calidad del diseño de software y su modularidad. Un alto valor de cohesión de un módulo indica que proporciona una funcionalidad casi única, mientras que un valor inferior impide la reutilización de un módulo de software (Rathee and Chhabra, 2018).

2.4 Teoría de la medición

Se ha sugerido que la teoría de la medición debería servir de base para desarrollar, razonar y aplicar métricas de ingeniería de software (Briand, El Emam and Morasca, 1996). Para clasificar una métrica como de escala ordinal, se deben cumplir los requisitos del axioma de orden débil, los cuales son: que $\bullet\geq$ sea una relación binaria completa y transitiva. Las propiedades de transitividad y completitud, son las siguientes (Zuse, 1992):

1. Transitividad: $P \bullet\geq P', P' \bullet\geq P'' \rightarrow P \bullet\geq P''$

2. Completitud: $P \bullet\geq P'$ o $P' \bullet\geq P$

Para todo P', P" Ɛ P, donde P es un conjunto y $\bullet\geq$ es una relación empírica binaria como "igual o más compleja que". Supóngase que **(P,** $\bullet\geq$**)** es un sistema relacional empírico, donde P es un conjunto contable no vacío y $\bullet\geq$ es una relación binaria en P. Luego existe una función μ: P → $\mathfrak{R}$, con:

$\mathbf{P'} \bullet\geq \mathbf{P''} \leftrightarrow \mu(\mathbf{P'}) \geq \mu(\mathbf{P''})$.

Para todo P', P" Ɛ P, sí y sólo sí, $\bullet\geq$ es de orden débil. Si tal homomorfismo existe, entonces, ((P, $\bullet\geq$), ($\Re \geq \mu$) es una escala ordinal. Un homomorfismo es una función que preserva las operaciones definidas en los objetos de la función. Este término proviene de las palabras griegas para mismo (homos) y forma (*morphe*). La medida μ en una escala es un homomorfismo.

3. MÉTRICAS EXISTENTES

3.1 COF

Esta métrica mide la proporción entre el número real de acoplamientos no imputables a herencia y el máximo número posible de acoplamientos en el sistema (1). Es decir, indica la comunicación entre clases (Brito e Abreu, Goulão and Esteves, 1995; Vázquez Escudero, Moreno García and García Peñalvo, 2001).

$$COF = \frac{\sum_{i=1}^{TC}\left[\sum_{j=1}^{TC} es_cliente(C_i, C_j)\right]}{TC^2 - TC} \quad (1)$$

Donde:

TC es el total de clases

TC^2 - TC es el máximo número de acoplamientos en un sistema con TC clases.

$$es_cliente(Cc,Cs) = \begin{cases} 1 \text{ si y solo si } Cc \rightarrow Cs \wedge Cc \neq Cs \\ 0 \text{ en caso contrario} \end{cases}$$

La relación cliente-servidor (Cc → Cs) significa que Cc (la clase cliente) contiene al menos una referencia no basada en la herencia a una característica (método o atributo) de la clase Cs (clase servidora). Algunas de estas relaciones cliente-servidor pueden verse como comunicaciones entre instancias de clase.

*3.2 LCOM**

LCOM es una medida de la carencia de cohesión de una clase, mide el número de atributos comunes usados por diferentes métodos e indica la calidad de la abstracción hecha en la clase (Jain and Gupta, 2015). El cálculo de la métrica (2) se realiza a nivel de clase.

$$LCOM^* = \frac{\left(\frac{1}{a}\sum_{j=1}^{a}\mu(A_j)\right) - m}{1 - m} \quad (2)$$

Donde:

a = número de atributos de clase existentes en la misma.

m = número de métodos existentes en la clase.

Esta métrica considera un grupo de métodos {Mi} (i=1, …, m) accediendo a un conjunto de atributos {Aj} (j=1, …, a) y el número de métodos que acceden a cada atributo como μ(Aj). Esta métrica sólo puede calcularse cuando m>1. Cuando todos los métodos acceden a todos los atributos, entonces Σμ(Aj) = m*a, y por lo tanto LCOM* = 0.

4. METRICAS PROPUESTAS

4.1 Métrica CrCU (Coherencia de casos de uso)

Esta métrica mide la cantidad de funciones que interactúan para satisfacer una responsabilidad en relación al número total de funciones de la clase que los contiene, y se refiere a una secuencia interactiva de métodos implicados para cumplir con un caso de uso (Gallardo Vera, 2018). El cálculo de la métrica (3) se realiza a nivel de clase, módulo o paquete de programa, cuando un caso de uso está implementado en cada una de estas entidades de software.

$$CrCU = \frac{n}{m} \qquad (3)$$

Donde:

n = Total de métodos en una secuencia interactiva de métodos o funciones.

m = Total de métodos o funciones del caso de uso (clase. módulo o paquete).

4.1.1 Métrica CrCU como escala ordinal

Con respecto al sustento teórico de la propuesta de esta métrica se tiene el siguiente sistema relacional empírico:

1. P es la cantidad de funciones que interactúan para satisfacer una responsabilidad en relación al número total de funciones de la clase que los contiene.

2. •≥ es una relación empírica entre arquitecturas de clases la cual describe si existe mayor o igual número de métodos participantes en la secuencia.

3. $\mathfrak{R}$ denota el conjunto de números reales.

4. ≥ "mayor o igual que" es una relación binaria entre números.

Entonces ((P,•), ($\mathfrak{R}$,≥), CrCU) es una escala ordinal si, y solo si, se cumplen las siguientes condiciones:

1. La relación binaria •≥, es de orden débil

2. P1 •≥ P2↔ CrCU (Arquitectura A) ≥ CrCU(Arquitectura B)

4.1.2 Calculo automático y sustento de la métrica

El cálculo automático se realiza mediante la implementación de la ecuación de la métrica. Para el caculo y la comprobación se tiene la siguiente información, tres arquitecturas A, B y C de las cuales se extrae la información de las Tablas 1, 2 y 3 respectivamente para realizar el cálculo y la verificación con los valores obtenidos al aplicar la métrica.

Tabla 1. Datos de la arquitectura A.

Clase	Secuencia interactiva de métodos
Cliente	m1->m4->m7
A	m1->m2->m3
B	m4->m5->m6
C	m7->m8->m9

Se tiene una secuencia interactiva donde participan diez métodos de los diez existentes en la arquitectura, por lo tanto, el resultado del cálculo automático es el siguiente:

$$CrCU = \frac{n}{m} = \frac{10}{10} = 1$$

Tabla 2. Datos de la arquitectura B.

Clase	Secuencia interactiva de métodos
Cliente	m1->m5
A	m1->m2->m3->m4
B	m5->m6->m7

Se tiene una secuencia interactiva donde participan ocho métodos de los nueve existentes en la arquitectura, por lo tanto, el resultado del cálculo automático es el siguiente:

$$CrCU = \frac{n}{m} = \frac{8}{9} = 0.888$$

Tabla 3. Datos de la arquitectura C.

Clase	Secuencia interactiva de métodos
Cliente	m1->m5

A	m1->m2
B	m4->m5

Se tiene una secuencia interactiva donde participan cinco métodos de los siete existentes en la arquitectura, por lo tanto, el resultado del cálculo automático es el siguiente:

$$CrCU = \frac{n}{m} = \frac{5}{7} = 0.714$$

Para comprobar que la relación binaria es de orden débil, tiene que cumplir con las propiedades de transitividad y completitud.

4.1.3 Transitividad

P1 ≥ P2, P2 ≥ P3 → P1 ≥ P3 ↔ CrCU (Arquitectura A) ≥ CrCU (Arquitectura B) & CrCU (Arquitectura B) ≥ CrCU (Arquitectura C) → CrCU (Arquitectura A) ≥ CrCU (Arquitectura C)

Al sustituir los valores resultantes se tiene que:

1.0 ≥ 0.875 & 0.888 ≥ 0.714 → 1.0 ≥ 0.714

Como se observa, la Arquitectura A tiene un valor de CrCU mayor a la Arquitectura B. Este a su vez tiene un valor de CrCU mayor al de la Arquitectura C. Concluyendo que la relación binaria ≥ cumple con la propiedad de transitividad.

4.1.4 Relación Total

Si se tienen las arquitecturas A y B, se debe poder decir que la Arquitectura A "tiene mayor o igual valor de CrCU que" la Arquitectura B, o viceversa. Es decir:

1.0 ≥ 0.888 ó 0.888 ≥ 1.0

Calculando el valor de CrCU en las Arquitecturas A y B, siempre fue posible determinar cuando existía mayor o igual valor de CrCU.

4.1.5 Homomorfismo

La segunda condición quedaría de la siguiente forma:

La Arquitectura A "tiene mayor o igual valor de CrCU que" la Arquitectura B, es decir, 1 ≥ 0.714

4.1.6 Conclusión

La relación binaria "tiene mayor o igual valor de CrCU" de la métrica CrCU, cumple con las condiciones de orden débil y además es un homomorfismo. Por lo cual, se concluye que la métrica es de escala ordinal (Zuse, 1992).

4.2 Métrica Factor de responsabilidad (FR)

FR es una medida que indica el factor de responsabilidades existente en una clase, un módulo, o un paquete de programa (4). Esta métrica está basada en el principio de una única responsabilidad *"Single Responsibility Principle"* por sus siglas en inglés (SRP), el cual indica que: "una clase o módulo debe tener uno y sólo un motivo para cambiar" (C. Martin and Martin, 2006). Cada responsabilidad se encuentra dada por una secuencia de métodos iniciada por un método con calificador de alcance *"public"*.

$$FR = \left(1 \Big/ \left(\left(\sum_{i=1}^{NC} \mathrm{Re}sp_i\right) \Big/ NC\right)\right) \qquad (4)$$

Donde:

FR = Factor de responsabilidades

NC = Número total de clases en la arquitectura que contienen métodos con implementación.

Resp = Responsabilidad

El valor deseable de esta métrica es 1, el peor valor es 0. Se considera el total de clases de la arquitectura a aquellas clases que tienen una secuencia de métodos iniciadas por un método con calificador *"public"*.

4.2.1 Métrica FR como escala ordinal

Con respecto a la métrica propuesta se tiene el siguiente sistema relacional empírico:

1. P es el conjunto de secuencias secuencia de métodos iniciada por un método con calificador de alcance *"public"*.

2. •≥ es una relación empírica entre arquitecturas de clases la cual describe si existe mayor o igual Factor de responsabilidad.

3. $\mathfrak{R}$ denota el conjunto de números reales.

4. ≥ "mayor o igual que" es una relación binaria entre números.

Entonces ((P,•), ($\mathfrak{R}$,≥), FR) es una escala ordinal si, y solo si, se cumplen las siguientes condiciones:

1. La relación binaria •≥, es de orden débil.

2. P1 •≥ P2↔FR (Arquitectura A) ≥ FR (Arquitectura C)

4.2.2 Calculo automático y verificación de la métrica

El cálculo automático se realiza mediante la implementación de la ecuación de la métrica. Para el caculo y la comprobación se tiene la siguiente información, tres arquitecturas A, B y C de las

cuales se extrae la información de las Tablas 5, 6 y 7 respectivamente para realizar el cálculo y la verificación con los valores obtenidos al aplicar la métrica.

Tabla 5. Datos de la arquitectura A.

Clase	Secuencia de métodos	Responsabilidades
Cliente	main	1
Clase A	m1->m2->m3	1
Clase B	m1->m2->m3	1

Se tienen tres secuencias iniciadas por un método con calificador *"public"* de un total de tres clases en la arquitectura, por lo tanto, el resultado del cálculo automático es el siguiente:

$$FR = \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^{NC}(1+1+1)}{3}} \qquad FR = 1$$

Tabla 6. Datos de la arquitectura B.

Clase	Secuencia de métodos	Responsabilidades
Cliente	main	1
Clase A	m1->m2->m3 m4->m5->m6	2
Clase B	m1->m2->m3	1

Se tienen cuatro secuencias iniciadas por un método con calificador *"public"* de un total de tres clases en la arquitectura, por lo tanto, el resultado del cálculo automático es el siguiente:

$$FR = \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^{NC}(1+2+1)}{3}} \qquad FR = 0.75$$

Tabla 7. Datos de la arquitectura C.

Clase	Secuencia de métodos	Responsabilidades
Cliente	main	1
Clase A	m1->m2->m3 m4->m5->m6 m7->m8->m9	3
Clase B	m1->m2->m3	1

Se tienen cinco secuencias iniciadas por un método con calificador *"public"* de un total de tres clases en la arquitectura, por lo tanto, el resultado del cálculo automático es el siguiente:

$$FR = \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^{NC}(1+3+1)}{3}} \qquad FR = 0.6$$

De los cálculos manuales y automáticos realizados para las arquitecturas se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados obtenidos del cálculo.

	Calculo automático
Arquitectura 1	1.0
Arquitectura 2	0.75
Arquitectura 3	0.6

Para comprobar que la relación binaria es de orden débil, tiene que cumplir con las propiedades de transitividad y completitud.

4.2.3 Transitividad

$$P1 \geq P2, P2 \geq P3 \rightarrow P1 \geq P3 \leftrightarrow FR\ (\text{Arquitectura A}) \geq FR\ (\text{Arquitectura B}) \ \&\ FR\ (\text{Arquitectura B}) \geq FR\ (\text{Arquitectura C}) \rightarrow FR\ (\text{Arquitectura A}) \geq FR\ (\text{Arquitectura C})$$

Al sustituir los valores resultantes se tiene que:

$$1.0 \geq 0.75\ \&\ 0.75 \geq 0.6 \rightarrow 1.0 \geq 0.6$$

Como se observa, la Arquitectura1 tiene un valor de Factor de Responsabilidad mayor a la Arquitectura dos. Este a su vez tiene un valor de Factor de Responsabilidad mayor al de la Arquitectura tres. Concluyendo que la relación binaria ≥ cumple con la propiedad de transitividad.

4.2.4 Relación Total

Si se tienen las arquitecturas uno y dos, se debe poder decir que la Arquitectura uno "tiene mayor o igual Factor de responsabilidades que" la Arquitectura dos, o viceversa. Es decir:

$$1.0 \geq 0.75 \text{ o } 0.75 \geq 1.0$$

Calculando el valor de FR en las Arquitecturas uno y dos de la Fig. 1, siempre fue posible determinar cuando existía mayor o igual Factor de Responsabilidad.

4.2.5 Homomorfismo

Comprobando la segunda condición quedaría de la siguiente forma:

La Arquitectura uno "tiene mayor o igual Factor de responsabilidades que" la Arquitectura dos $\leftrightarrow 1 \geq 0.6$

4.2.6 Conclusión

La relación binaria "tiene mayor o igual Factor de responsabilidades" de la métrica FR, cumple con las condiciones de orden débil y además es un homomorfismo. Por lo cual, se concluye que la métrica es de escala ordinal (Zuse, 1992).

5. PRUEBAS Y RESULTADOS PRELIMINARES

Se probaron en total cuatro arquitecturas diferentes, una para cada métrica obteniendo los siguientes resultados:

5.1 COF

Se tiene una arquitectura A conformada por cuatro clases A, B, C y Cliente, de la cual se extrae la información mostrada en la Tabla 9.

Tabla 9. Datos de la arquitectura A.

Clase	Relaciones
Cliente	Clase A, Clase B
Clase A	Clase C
Clase B	Ninguna
Clase C	Ninguna

Se tienen tres relaciones en una arquitectura conformada por cuatro clases, por lo tanto, el resultado del cálculo automático es:

$$COF = \frac{\sum_{i=1}^{4}[\sum_{j=1}^{4} 1+1+1]}{4^2-4} = \frac{3}{12} = 0.25$$

De acuerdo al resultado obtenido se observa que en esta arquitectura se tiene un valor de COF de 0.25, como se observa las clases Cliente y clase B, tienen un acoplamiento con otras clases, esto indica que puede que estas clases sean complicadas de reutilizar en un futuro por otros sistemas. Un valor de acoplamiento entre más bajo sea aumenta la posibilidad de reutilización de código.

*5.2 LCOM**

Se tiene una clase A de la cual se extrae la información mostrada en la Tabla 10.

Tabla 10. Datos de la clase A.

Métodos	Atributos accedidos
m1	a, b
m2	a, b
m3	a, b

Se tiene una clase con dos variables y tres métodos. Los tres métodos acceden a todas las variables de clase, por lo tanto, el resultado del cálculo automático es:

$$LCOM^* = \frac{\left(\frac{1}{2}(6)\right)-3}{1-3} = \frac{0}{-2} = 0$$

De acuerdo al resultado obtenido en el cálculo de la métrica para esta arquitectura, se representa que todos los métodos de la clase hacen uso de todos los atributos de la misma, indicando una correcta abstracción de la clase y esto favorece a la futura reutilización de código.

5.3 CrCU

Se tiene una arquitectura A conformada por tres clases A, B y Cliente, de la cual se extrae la información mostrada en la Tabla 11.

Tabla 11. Datos de la arquitectura A.

Clase	Secuencia interactiva de métodos
Cliente	m1->m2
A	m1->m2->m3
B	m4->m5->m6

Se tiene una secuencia interactiva donde participan siete métodos de los siete existentes en la arquitectura, por lo tanto:

$$CrCU = \frac{n}{m} = \frac{7}{7} = 1$$

De acuerdo al valor obtenido en el cálculo se indica que el total de métodos en la secuencia interactiva está en la misma proporción que el número total de funciones del caso de uso. Este valor es el deseado para esta métrica, si el valor se encuentra por debajo de 1 indica que existen métodos que no colaboran en la secuencia del caso de uso, por lo tanto, son métodos que sobran y que afectan la calidad del código.

5.4 Factor de responsabilidad (FR)

Se tiene una arquitectura A conformada por tres clases A, B y Cliente, de la cual se extrae la información mostrada en la Tabla 12.

Tabla 12. Datos de la arquitectura A.

Clase	Secuencia de métodos	Responsabilidades
Cliente	main	1
Clase A	m1->m2->m3 m4->m5->m6	2
Clase B	m7->m8->m9	1

Se tienen cuatro secuencias iniciadas por un método con calificador *"public"* de un total de tres clases en la arquitectura, por lo tanto:

$$FR = \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^{NC}(1+2+1)}{3}} \qquad FR = \quad 0.75$$

De acuerdo al resultado obtenido se observa que en la arquitectura existen clases con más de una responsabilidad, por lo tanto, se rompe con el principio de única responsabilidad, es decir, que en algunas clases existe más se una secuencia iniciada por un método con calificador de alcance *"public"*. Esto indica que no se protege el código frente cambios, ya que implicaría que no solo existe motivo por el que modificar esta clase, contrario a lo que se explica en el principio de única responsabilidad.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se mostraron cuatro métricas relacionadas para medir la modularización de los sistemas de software. Dos métricas se encontraron en la literatura y dos son propuestas bajo el sustento de la teoría de la medición. Estas métricas tienen por objetivo que se evalúen características de los sistemas de software a nivel de modularidad como, el acoplamiento, la coherencia, la cohesión y las responsabilidades existentes en una arquitectura.

El uso de estas métricas conduce a aplicar métodos de re-factorización para la mejora de la calidad de productos existentes y la disminución de la deuda técnica, así mismo nos ayuda a desarrollar proyectos nuevos en relación a proyectos exitosos anteriores con la búsqueda de que se aumente la calidad.

REFERENCIAS

Boehm, B. W. (1984) 'Software engineering economics', *Software Engineering: Barry W. Boehm'S Lifetime Contributions to Software Development, Management, and Research*, (1), pp. 117–149. doi: 10.1109/9780470187562.ch2.

Briand, L., El Emam, K. and Morasca, S. (1996) 'On the application of Measurement Theory in Software Engineering', *Agro Food Industry Hi-Tech*, 28(1), pp. 3030–3032.

Brito e Abreu, F., Goulão, M. and Esteves, R. (1995) 'Toward the design quality evaluation of object-oriented software systems', *Proceedings 5th Int'ernatianal Conference Software Quality*, (October), pp. 44–57. Available at: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.14.6468&rep=rep1&type=pdf.

C. Martin, R. and Martin, M. (2006) *SWA Agile Principles, Patterns, and Practices in CSharp*. Prentice Hall.

Fenton, N. and Bieman, J. (1991) 'Software Metrics. A Rigorous Approach', *Journal of Information Technology*, 6(3–4), pp. 237–238. doi: 10.1057/jit.1991.45.

Gallardo Vera, S. (2018) *Generador de Servicios Web desde Marcos Orientados a Objetos con el Enfoque de Clases Internas*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Jain, V. and Gupta, A. (2015) 'Lack of conceptual cohesion of methods : A new alternative to Lack of Cohesion of methods', *ACM International Conference Proceeding Series*, 18-20-Febr, pp. 110–119. doi: 10.1145/2723742.2723753.

Joyanes Aguilar, L. (2008) *Fundamentos de Programación. Algoritmos, estructura de datos y objetos*. Cuarta edi. Madrid: McGraw Hill.

De Marco, T. (1982) 'Controlling Software Projects, Management Measurement & Estimation'.

ISSN en trámite

Paul, M. C., Curtis, B. and Beth, M. (2009) 'Capability Maturity Model', *Information Security Management Metrics*, pp. 201–203. doi: 10.1201/9781420052862.axf.

Rathee, A. and Chhabra, J. K. (2018) 'Improving Cohesion of a Software System by Performing Usage Pattern Based Clustering', *Procedia Computer Science*. Elsevier B.V., 125, pp. 740–746. doi: 10.1016/j.procs.2017.12.095.

Vázquez Escudero, P. J., Moreno García, M. N. and García Peñalvo, F. J. (2001) 'Métricas Orientadas a Objetos', *Departamento de Informática y Automática*, pp. 2–4.

Zuse, H. (1992) 'Properties of software measures', *Software Quality Journal*, 1(4), pp. 225–260. doi: 10.1007/BF01885772.

Métricas para la Disminución de Deuda Técnica Originada por la Carencia de Protección Modular en Arquitecturas Orientadas a Objetos

Nelida Barón Pérez* René Santaolaya Salgado*
Juan C. Rojas Pérez * Marisol Ramírez Cruz*.

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos. México (Tel: 01(777)362-7770; e-mail: nelida.baron18ca@cenidet.edu.mx, rene.ss@cenidet.tecnm.mx, juan.rp@cenidet.tecnm.mx, marisol.ramirez19ce@cenidet.edi.mx).*

Resumen: En este documento se propone un marco de métricas para la medición del grado de deuda técnica originado por código desagradable que se caracteriza por contar con bajos niveles de protección modular en diferentes entidades de software orientadas a objetos. En programas escritos bajo el paradigma orientado a objetos, la protección modular se aplica tanto para atributos como para métodos. En este artículo MMPM se refiere al marco de métricas para el cálculo de protección modular originado por la aplicación de reglas de visibilidad en las funciones (métodos) de software orientado a objetos. El marco está compuesto por cinco métricas cada una de ellas sustentadas en la teoría de la medición. Los factores que se miden son: protección modular de funciones privadas, protección modular de funciones protegidas, protección modular de funciones amistosas, protección modular y total de protección modular a nivel de sistema. Los resultados obtenidos al aplicar el MMPM a tres aplicaciones diferentes indican que las métricas son capaces de proporcionar una evaluación correcta del grado de protección de los detalles internos de información que presenta una aplicación de software, lo cual puede ser útil para determinar si el principio de ocultamiento de datos está siendo aplicado de manera correcta y prevenir la manipulación inadvertida de los detalles internos de las entidades de software desde agentes externos, lo cual de suceder se manifestaría en fragilidad de estas entidades.

Palabras Clave: Ocultamiento de Datos, Protección Modular, Datos Públicos, Datos amistosos, Datos Protegidos y Datos Privados.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de software con calidad nos lleva a analizar los principales problemas que se pueden presentar en el desarrollo de aplicaciones orientadas a objetos, que originan deuda técnica. Entre estos problemas está ignorar el criterio de protección modular e ignorar el principio de ocultamiento de datos en base a las reglas de visibilidad, que previenen el diseño correcto de las diferentes entidades de software, ya sean éstas métodos, clases de objetos, módulos de programa o paquetes. Diseños incorrectos con carencia de protección modular están expuestos a la manipulación inadvertida de agentes externos, lo cual puede originar fragilidad en las entidades de software por la propagación de defectos de un módulo hacia otros módulos.

En este artículo se presenta el diseño e implementación de cinco métricas para la protección modular aplicando las reglas de visibilidad a las funciones integradas en clases de objetos. Nos referimos a este marco con la abreviatura MMPM. Adicionalmente a la descripción y funcionamiento de las métricas también se presentan los resultados de tres pruebas en tres aplicaciones diferentes de software orientado a objetos. Estas pruebas demuestran que el MMPM es capaz de evaluar el grado de protección modular de aplicaciones de software orientadas a objetos, en cuatro niveles de visibilidad: funciones privadas (private), estas funciones son las más protegidas puesto que solamente son utilizadas por otras funciones dentro de la misma clase; funciones protegidas (protected), aquellas funciones que son utilizadas por otras funciones de la misma clase o de clases derivadas; funciones amistosas (“friendly”), aquellas que son utilizadas por otras funciones de cualquier clase integradas dentro del mismo paquete; y las funciones públicas (public), estas funciones son las más permisivas puesto que pueden ser utilizadas por otras funciones de cualquier clase en el sistema aplicación de software.

El documento se encuentra organizado de la siguiente manera: La sección 2 describe el marco teórico y conceptual; la sección 3 el sustento de cada una de las métricas de protección modular (PM), su expresión matemática, funcionamiento y elementos. La sección 4 muestra el análisis de los resultados obtenidos. Las conclusiones se describen en la sección 5. Por último se muestran las referencias consultadas.

2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 principio de ocultamiento de datos

Toda la información acerca de un módulo deberá de ser privada a ese módulo, a menos que esta sea declarada como pública

2.2 Criterio de protección modular

Un método satisface el criterio de protección modular, cuando éste resulta en arquitecturas en las que los efectos anormales que ocurren en tiempo de ejecución de un módulo estén confinados a ese único módulo, o cuando mucho se propague a algunos pocos módulos vecinos.

2.3 Fragilidad

Cuando se realiza un cambio, partes inesperadas del sistema dejan de funcionar. Ante cambios en los requerimientos iniciales o por la extensión de nuevos requerimientos pueden surgir nuevos problemas en áreas que aparentemente no tienen relación conceptual con el área que sufrió un cambio. Tal fragilidad decrementa enormemente la credibilidad del personal de diseño y mantenimiento.

2.4 Teoría de la medición

La medición tiene como objetivo obtener una descripción numérica de los objetos / eventos / personas del mundo real por medio de un sistema para la medición. La medición es usada como una forma clave para obtener información de alta calidad del mundo real, en todas las disciplinas (Stevens, 1946).

La medición es definida como el proceso de asignación empírica y objetiva de símbolos a los atributos de objetos y eventos del mundo real, de manera tal que estos los represente o describa. Sobre los principios de la representación, la teoría de la medición proporciona la base para una ciencia de medición de aplicación universal.
La medición es un proceso inherente y consustancial a toda investigación, sea ésta cualitativa o cuantitativa. Principalmente se miden variables, lo que demanda considerar tres elementos básicos: 1) el instrumento de medición, 2) la escala de medición y 3) sistema de unidades de medición. La validez, consistencia y confiabilidad de los datos medidos dependen, en buena parte, de la escala de medición que se adopte. De aquí la importancia de profundizar en el tema de las escalas de medición (Finkelstein, 2009).

2.5 Escalas o niveles de medición

Una asociación que se establece entre el mundo real y valores de medida se suele denominar **escala de medición** (Calero, 2002). La teoría de la medición permite formalizar la relación entre dos escalas de medición con esta definición (Gary, 1993): *"Sea (A, B, μ) una escala, donde el conjunto de objetos en B es el conjunto de los números reales. Sea que la notación μ(A) significa que el conjunto de todos los números reales que son mediciones de algún objeto en A. Esto es que μ(A) es el conjunto de medidas de los objetos en A. (En matemáticas, a esto se la llama el rango de μ.) Luego un mapeo t: μ (A) → B se define como una transformación admisible, si y solo si, (A, B, t°μ) también es una escala"* (Gary, 1993).

Se pueden describir cinco tipos de escalas que se caracterizan por sus transformaciones admisibles (Gary, 1993):

- **Escalas Nominales:** Las escalas nominales simplemente dan "nombres" numéricos a los objetos. (La palabra nominal se deriva del latin nomin, que significa nombre). Cualquier numeración es tan buena como cualquier otra, así que cualquier función uno-a-uno de t, es una transformación admisible.

- **Escalas Ordinales:** Asignan números a objetos en un orden particular, pero cualquier número que mantiene ese orden es igualmente bueno. Cualquier función estrictamente creciente de t, es una transformación admisible.

- **Escalas de Intervalo:** Asignan números a los objetos, de tal manera que el intervalo entre dos valores medidos es significativo en todo el rango de valores. Solo las funciones lineales positivas t(x) = ax + b son transformaciones admisibles.

- **Escalas de ratio (Proporción, Razón):** Asignan valores, de tal manera que la relación de dos medidas es significativa. Las únicas transformaciones admisibles son funciones lineales positivas, de la forma t(x) = ax.

- **Escalas absolutas**: tienen solo una forma de medir objetos y, por lo tanto, la única transformación admisible es la identidad t(x) = x.

2.6 Métrica como una escala ordinal

Para clasificar una métrica como una escala ordinal, debe cumplir los requisitos del **axioma de orden débil**, los cuales son: que $\bullet\geq$ *es* una relación binaria completa y transitiva. Las propiedades de transitividad y completitud son las siguientes (Zuse, 1995):

1. Transitividad: P $\bullet\geq$ P', P' $\bullet\geq$ P" => P $\bullet\geq$ P"
2. Completitud: P $\bullet\geq$ P' o P' $\bullet\geq$ P

Para todo P', P" Ɛ P, donde P es un conjunto y $\bullet\geq$ es una relación empírica binaria como **"igual o más compleja que"**. Supóngase que (P, $\bullet\geq$) es un sistema relacional empírico, donde P es un conjunto contable no vacío y $\bullet\geq$ es una relación binaria en P. Luego existe una función μ: P → ℜ, con: P' $\bullet\geq$ P" ↔ μ(P') ≥ μ(P") para todo P', P" Ɛ P, sí y sólo sí, $\bullet\geq$ es de orden débil. Si tal homomorfismo existe, entonces, ((P, $\bullet\geq$), (ℜ, ≥), μ) es de escala ordinal.

3. SUSTENTO TEÓRICO DE LAS MÉTRICAS MMPM

En esta sección se presenta el sustento teórico en la que se fundamenta el diseño y aplicación de las cinco métricas del MMPM que se proponen en este trabajo de investigación. El sustento teórico esta fundamentado en la teoría de la medición descrita en (Zuse, 1995) (Gary, 1993)

3.1 Factor de Protección Modular de Funciones Privadas (PMFP)

Se definió la métrica PMFP para medir el grado de protección modular con respecto a las funciones que han sido declaradas con el calificador de alcance "private". Esta métrica consiste en detectar en cada una de las clases las funciones que han sido declaradas como "private" y realizar una suma de todas estas funciones, entre el número total de funciones, posteriormente realizar una suma de todos los valores obtenidos y dividirlo entre el número total de clases.

La métrica PMFP se define formalmente como:

$$PMFP = \frac{\sum_{ci=1}^{ci=n} \left(\frac{\sum_{fi=0}^{fi=m} FP}{FTC} \right)}{NTC} \quad (1)$$

Donde:

FP	Funciones con calificador "private".
Fi	"i-esima" función.
FTC	Número total de funciones de la clase.
Ci	"i-esima" clase.
NTC	Número total de clases.
PMFP	Factor de protección modular por funciones privadas.

A medida que esta razón tienda a 1 se indica que hay una tendencia a tener funciones "private" y por lo tanto se presenta una alta protección de la información.

Una medida que tienda al 0 indica que hay pocas funciones "private", por lo que la protección de la información es permisiva, es decir que se encuentra con un nivel bajo de protección modular. El mejor valor será el 1, el peor valor será 0.

3.1.1 Factor de Protección Modular (PMFP) como escala ordinal

Se tiene el siguiente sistema relacional empírico:

1.- P es el conjunto de funciones con calificador de alcance "private".
2.- ●≥ es una relación empírica entre el número de funciones privadas la cual describe si existe menor o mayor grado de protección de la información con respecto al calificador de alcance "private".
3.- ℝ es el conjunto de números reales.
4.- ≥ "mayor o igual que" es una relación binaria entre números.

Entonces la métrica PMFP será considerada como una escala ordinal si:

1. La relación binaria •≥, es de orden débil

2. P1 ●≥ P2 => PMFP (Arquitectura C) ≥ PMFP (Arquitectura B).

3.1.2 Comprobación

Sea una arquitectura A con un valor de PMFP = 0, una arquitectura B con un valor de PMFP = 0.03 y una arquitectura C con un valor de PMFP = 0.15 se tiene que:

3.1.2.1 Comprobación formal es una relación binaria transitiva:

0.15 ≥ 0.03, 0.03 ≥ 0 <=> 0.15 ≥ 0

Se puede observar que la arquitectura C presenta mayor grado de protección modular por funciones "private" debido al mayor número de funciones privadas que presenta. Mientras que la arquitectura A presenta un grado de protección menor, concluyendo que la métrica PMFP es una relación binaria transitiva.

3.1.2.2 Comprobación formal es una relación binaria completa

Dado que la arquitectura C con valor de PMFP = 0.15 y la arquitectura B con valor de PMFP = 0.03 se tiene que: PMFP (arquitectura C) ≥ PMFP (arquitectura B), por lo tanto, se concluye que la métrica PMFP es una relación binaria completa.

3.1.2.3 Orden de clasificación

El homomorfismo entre los sistemas relacionales empírico y numérico por el orden de los objetos, se denota de la siguiente manera: P1 ●≥ P2 <=> PMFP (arquitectura C) ≥ PMFP (arquitectura B).

El orden que se crea por la métrica PMFP debe ser el mismo que el orden creado empíricamente mediante experimentación, o viceversa.

3.1.2.4 Comprobación formal de un homomorfismo

Sea una clase con un total de 4 funciones tenemos que:

(4 funciones "private") ●≥ (3 funciones "private") ●≥ (1 función "private")

⇕ Equivalente a:

$$1 \geq 0.75 \geq 0.25$$

Se puede observar que al aplicar los valores a la métrica PMFP se obtiene el mismo comportamiento. Concluyendo que la métrica PMFP es un homomorfismo.

Al cumplirse las condiciones (i) la relación ●≥ es de orden débil (es una relación binaria que es transitiva y completa), y (ii) es un homomorfismo (P1 ●≥ P2 => PMFP (arquitectura C) ≥ PMFP (arquitectura B)). Se concluye que la métrica PMFP es de escala ordinal.

3.2 Factor de Protección Modular de Funciones Protegidas (PMFPr)

Se definió la métrica PMFPr para medir el grado de protección modular con respecto a las funciones que han sido declaradas con el calificador de alcance "protected". Esta métrica consiste en sumar las funciones que han sido declaradas "protected" de cada una de las jerarquías entre el número total funciones, posteriormente realizar la suma de todos los valores obtenidos y dividirlo entre el número total de jerarquías.

La métrica PMFPr se define formalmente como:

$$\text{PMFPr} = \frac{\sum_{ji=1}^{ji=n} \left(\frac{\sum_{fi=0}^{fi=m} \text{FPr}}{\text{NTF}} \right)}{\text{NTJ}} \quad (2)$$

Donde:

FPr	Funciones con calificador "protected".
Fi	"i-esima" función protected de la jerarquía.
NTF	Número total de funciones de la jerarquía.
ji	"i-esima" jerarquía.
NTJ	Número total de jerarquías.
PMFPr	Factor de protección modular de funciones protected.

A medida que esta razón tienda al 1 se indica que hay una tendencia a tener funciones "protected" y por lo tanto se presenta un cierto grado de protección de la información.
Una medida que tienda al 0 indica que hay pocas funciones "protected", por lo que la protección de la información se encuentra con un nivel bajo. El mejor valor será el 1, el peor valor será 0.

3.2.1 Nivel de Protección Modular de Funciones Protegidas (PMFPR) como escala ordinal

Se tiene el siguiente sistema relacional empírico:

1.- P es el conjunto de funciones con calificador de alcance "protected".

2.- ●≥ es una relación empírica entre el número de funciones protegidas la cual describe si existe menor o mayor grado de protección de la información con respecto al calificador de alcance "protected".
3.- ℟ es el conjunto de números reales.
4.- ≥ "mayor o igual que" es una relación binaria entre números.

Entonces la métrica PMFPr será considerada como una escala ordinal si:
1. La relación binaria •≥, es de orden débil

2. P1 ●≥ P2 => PMFPr (arquitectura C) ≥ PMFPr (arquitectura B).

3.2.2 Comprobación:

Sea una arquitectura A con un valor de PMFPr = 0, una arquitectura B con un valor de PMFPr = 0.01 y una arquitectura C con un valor de PMFPr = 0.05 se tiene que:

3.2.2.1 Comprobación formal es una relación binaria transitiva:

$0.05 \geq 0.01, 0.01 \geq 0 <=> 0.05 \geq 0$

Se puede observar que la arquitectura C presenta mayor grado de protección debido a que más funciones han sido declaradas como "protected", mientras que la arquitectura A presenta menos protección de la información. Concluyendo así, en que la métrica PMFPr es una relación binaria transitiva.

3.2.2.2 Comprobación formal es una relación binaria completa

Dado que la arquitectura C con valor de PMFPr = 0.05 y la arquitectura B con valor de PMFPr = 0.01 se tiene que: PMFP (arquitectura C) ≥ PMFPr (arquitectura B), por lo tanto, se concluye que la métrica PMFPr es una relación binaria completa.

3.2.2.3 Orden de clasificación

El homomorfismo entre los sistemas relacionales empírico y numérico por el orden de los objetos, se denota de la siguiente manera: P1 ●≥ P2 <=> PMFPr (arquitectura C) ≥ PMFPr (arquitectura B).

El orden que se crea por la métrica PMFPr debe ser el mismo que el orden creado empíricamente mediante experimentación, o viceversa.

3.3.3.4 Comprobación formal es un homomorfismo

Para la comprobación de este caso se toma que el número total de jerarquías es uno, con un total de 4 funciones.

3 funciones “protected”) ●≥ (2 funciones “protected”) ●≥ (1 función “protected”)

⇕Equivalente

$0.75 \geq 0.5 \geq 0.25$

Se puede observar que entre mayor sea el número de funciones protected, dentro de una jerarquía mayor será la protección modular en cuanto al calificador de alcance “protected”, de igual manera se puede observar que al aplicar los valores a la métrica PMFPr se obtiene el mismo comportamiento. Concluyendo que la métrica PMFPr es un homomorfismo.
Al cumplirse las condiciones (i) la relación ●≥ es de orden débil (es una relación binaria que es transitiva y completa), y (ii) es un homomorfismo (P1 ●≥ P2 => PMFPr (arquitectura C) ≥ PMFPr (arquitectura B)). Se concluye que la métrica PMFPr es de escala ordinal.

3.3 Factor de Protección Modular de Funciones friendly (PMFF)

Se definió la métrica PMFF para medir el grado de protección modular con respecto a las funciones que han sido declaradas con el calificador de alcance “friendly”. Esta métrica consiste en sumar las funciones que han sido declaradas “friendly” entre el número total funciones.

La métrica PMFF se define formalmente como:

$$PMFF = \frac{\sum_{i=0}^{i=n} \mathrm{FF}}{\mathrm{NTF}} \quad (3)$$

Donde:

FF	Funciones con calificador “friendly” o default.
i	“i-esima” función.
NTF	Número total de funciones.
PMFF	Factor de protección modular de funciones “friendly”.

A medida que esta razón tienda al 1 se indicara que hay una tendencia a tener funciones “friendly” y por lo tanto se presenta una alta protección de la información en cuanto funciones “friendly”

Una medida que tienda al 0 indica que hay pocas funciones “friendly”, por lo que la protección de funciones “friendly” se encuentra con un nivel bajo. El mejor valor será el 1, el peor valor será 0.

3.3.1 Nivel de Protección Modular de Funciones friendly (PMFF) como escala ordinal

Se tiene el siguiente sistema relacional empírico:

1.- P es el conjunto de funciones con calificador de alcance “friendly”

2.- ●≥ es una relación empírica entre el número de funciones “friendly” que describe si existe menor o mayor grado de protección (uso del calificador de alcance “friendly”).
3.- $\mathbb{R}$ es el conjunto de números reales.
4.- ≥ “mayor o igual que” es una relación binaria entre números.

Entonces la métrica PMFF será considerada como una escala ordinal si:

1. La relación binaria •≥, es de orden débil

2. P1 ●≥ P2 => PMFF (Arquitectura C) ≥ PMFF (Arquitectura B).

3.3.2 Comprobación

Sea una arquitectura A con un valor de PMFF = 0, una arquitectura B con un valor de PMFF = 0.04 y una arquitectura C con un valor de PMFF = 0.16 se tiene que:

3.3.2.1 Comprobación formal es una relación binaria transitiva:

$0.16 \geq 0.04, 0.04 \geq 0 <=> 0.16 \geq 0$

Se puede observar que la arquitectura C presenta un mayor grado de protección modular de funciones “friendly” a diferencia de la arquitectura A el cual presenta un menor grado de protección. Concluyendo siempre fue posible determinar cuándo se presentaba un mayor o igual grado de protección modular de funciones “friendly”, por lo que la métrica PMFF es una relación binaria completa.

3.3.2.2 Comprobación formal es una relación binaria completa

Dado que la arquitectura C con valor de PMFF = 0.16 y la arquitectura B con valor de PMFF = 0.04 se tiene que: PMFF (arquitectura C) ≥ PMFF (arquitectura B), por lo tanto, se concluye que la métrica PMFF es una relación binaria completa.

3.3.2.3 Orden de clasificación

El homomorfismo entre los sistemas relacionales empírico y numérico por el orden de los objetos, se denota de la siguiente manera: P1 ●≥ P2 <=> PMFF (arquitectura C) ≥ PMFF (arquitectura B)

El orden que se crea por la métrica PMFPF debe ser el mismo que el orden creado empíricamente mediante experimentación, o viceversa.

3.3.2.4 Comprobación formal es un homomorfismo

arquitectura C (4 funciones friendly) $\bullet\geq$ arquitectura B (1 función friendly) $\bullet\geq$ arquitectura E (0 Funciones friendly)

Equivalente a:

$$0.16 \geq 0.04 \geq 0$$

Se puede observar que entre mayor sea el número de funciones "friendly" mayor será la protección modular de funciones "friendly". Al aplicar la métrica en las arquitecturas A, B y C se obtiene el mismo comportamiento. Concluyendo que la métrica PMFF es un homomorfismo.

Al cumplirse las condiciones (i) la relación $\bullet\geq$ es de orden débil (es una relación binaria que es transitiva y completa), y (ii) es un homomorfismo (P1 $\bullet\geq$ P2 => PMFF (arquitectura C) $\geq$ PMFF (arquitectura B)). Se concluye que la métrica PMFF es de escala ordinal.

3.4 Protección Modular (PM)

Se ha definido una métrica para medir el grado de protección modular de un software legado. Esta métrica consiste en, la suma de las funciones que han sido declaradas con el calificador de alcance diferente a "public", entre el número total de funciones.

La métrica PM se define formalmente como:

$$PM = \frac{\sum_{i=0}^{i=n} \text{FNP}}{\text{TF}} \quad (4)$$

Donde:

FNP	Funciones que no son "public".
n	"i-esima" función.
pM	Nivel de protección modular.

A medida que esta razón tienda a 0 mayor es el problema, indicaría que hay una tendencia a tener muchas funciones públicas que no inician capacidades o requerimientos, por lo tanto, tienen poca protección modular y un encapsulamiento incorrecto.

Una medida que tienda al 1 indica que hay pocas funciones públicas que no son iniciadoras de requerimientos o capacidades, por lo tanto, tienden a tener más capacidad de protección modular y mejor nivel de encapsulamiento. El mejor valor será de 1, el peor valor será de 0.

3.4.1 Nivel de Protección Modular (PM) como escala ordinal

Se tiene el siguiente sistema relacional empírico:

1.- P es el conjunto de funciones con calificador de alcance diferente a "public".

2.- $\bullet\geq$ es una relación empírica entre el número de funciones públicas que describe si existe menor o mayor grado de protección de la información.

3.- $\mathbb{R}$ es el conjunto de números reales.

4.- $\geq$ "mayor o igual que" es una relación binaria entre números.

Entonces la métrica PM será considerada como una escala ordinal si:

1. La relación binaria $\bullet\geq$, es de orden débil

2. P1 $\bullet\geq$ P2 => PM (Arquitectura C) $\geq$ PM (Arquitectura B).

3.4.2 Comprobación

Sea una arquitectura A con un valor de PM = 0, una arquitectura B con un valor de PM = 0.28 y una arquitectura C con un valor de PM = 0.56 se tiene que:

3.4.2.1 Comprobación formal es una relación binaria transitiva:

$0.56 \geq 0.28, 0.28 \geq 0 \Rightarrow 0.56 \geq 0.28$

En base a los resultados obtenidos se puede observar que entre mayor número de funciones no publicas la protección modular aumenta, en el caso de la arquitectura A se puede observar que todas las funciones con "public" por lo que tiene una total ausencia de protección de la información. Concluyendo así, en que la métrica PM es una relación binaria transitiva.

3.4.2.2 Comprobación formal es una relación binaria completa

Dado que la arquitectura C con valor de PM = 0.56 y la arquitectura B con valor de PM = 0.28 se tiene que: PM (arquitectura C) $\geq$ PM (arquitectura B), por lo tanto, se concluye que la métrica PM es una relación binaria completa.

3.4.2.3 Orden de clasificación

El homomorfismo entre los sistemas relacionales empírico y numérico por el orden de los objetos, se denota de la siguiente manera: P1 $\bullet\geq$ P2 <=> PM (arquitectura C) $\geq$ PM (arquitectura B).

El orden que se crea por la métrica PM debe ser el mismo que el orden creado empíricamente mediante experimentación, o viceversa.

3.4.2.4 Comprobación formal es un homomorfismo

 ISSN en trámite

Arquitectura C (14 funciones $\overline{public}$) $\bullet\geq$ Arquitectura B (7 funciones $\overline{public}$) $\bullet\geq$ Arquitectura A (0 Funciones $\overline{public}$)

Equivalente a:

$0.56 \geq 0.28 \geq 0$

Se puede observar que entre mayor número de funciones no "public" ("private", "protected", "friendly") la protección modular es mayor, de igual forma se puede observar que al introducir los valores en la métrica PM, se observa el mismo comportamiento que en la experimentación. Concluyendo así, en que la métrica pM es un homomorfismo.

Al cumplirse las condiciones (i) la relación $\bullet\geq$ es de orden débil (es una relación binaria que es transitiva y completa), y (ii) es un homomorfismo (P1 $\bullet\geq$ P2 => PM (arquitectura C) $\geq$ PM (arquitectura B)). Se concluye que la métrica PM es de escala ordinal.

3.5 Total Protección Modular (TPM)

Se ha definido una métrica para medir el grado total de protección modular que tiene una arquitectura de clases. Esta métrica consiste en la suma de PMFP, PMFPr y PMFF entre tres.

La métrica TPM se define formalmente como:

$$TPM = \frac{(\text{PMFP} + \text{PMFPr} + \text{PMFF})}{3} \quad (5)$$

Donde:

PMFP Factor de protección modular por funciones "private".
PMFPr Factor de protección modular de funciones "protected".
PMFF Factor de protección modular de funciones "friendly".
TPM Nivel total de protección modular.

3.5.1 Nivel de Total Protección Modular (TPM) como escala ordinal

Se tiene el siguiente sistema relacional empírico:

1.- P es el conjunto de funciones con calificador de alcance diferente a "public".
2.- $\bullet\geq$ es una relación empírica entre el número de no públicas que describe si existe menor o mayor grado de protección de la información.
3.- $\mathbb{R}$ es el conjunto de números reales.
4.- $\geq$ "mayor o igual que" es una relación binaria entre números.

Entonces la métrica TPM será considerada como una escala ordinal si:

1. La relación binaria $\bullet\geq$, es de orden débil

2. P1 $\bullet\geq$ P2 => TPM (Arquitectura C) $\geq$ TPM (Arquitectura B).

3.5.1.2 Comprobación

Para llevar a cabo la comprobación de las condiciones anteriormente establecidas y poder considerar TPM como una escala ordinal, se procede a realizar los cálculos tomando la información obtenida por las métricas PMFP, PMFPr y PMFF.

Caso 1	Caso 2	Caso 3
PMFP = 0 PMFPr = 0 PMFF = 0	PMFP = 0.03 PMFPr = 0.01 PMFF = 0.04	PMFP = 0.15 PMFPr = 0.05 PMFF = 0.16

Por lo que la arquitectura A presenta una TPM = 0, la arquitectura B una TPM = 0.02 y la arquitectura C una TPM = 0.12.

3.5.1.2.1 Comprobación formal es una relación binaria transitiva:

$0.12 \geq 0.02, 0.02 \geq 0 \Rightarrow 0.12 \geq 0$

3.5.1.2.2 Comprobación formal es una relación binaria completa

Dado que la arquitectura C con valor de TPM = 0.12 y la arquitectura B con valor de TPM = 0.02 se tiene que: TPM (arquitectura C) $\geq$ PM (arquitectura B), por lo tanto, se concluye que la métrica TPM es una relación binaria completa.

3.5.1.2.3 Orden de clasificación

El homomorfismo entre los sistemas relacionales empírico y numérico por el orden de los objetos, se denota de la siguiente manera: P1 $\bullet\geq$ P2 <=> TPM (arquitectura C) $\geq$ TPM (arquitectura B).

El orden que se crea por la métrica PM debe ser el mismo que el orden creado empíricamente mediante experimentación, o viceversa.

3.5.1.2.4 Comprobación formal es un homomorfismo

Arquitectura C (14 funciones no "*public*") $\bullet\geq$ Arquitectura B (7 funciones no *public*) $\bullet\geq$ Arquitectura A (0 Funciones no *public*)

Equivalente a:

$0.12 \geq 0.02 \geq 0$

Se puede observar que entre mayor sea el número de funciones no publicas mayor será el grado de protección modular. Al aplicar la métrica a las arquitecturas A, B y C se obtiene el

mismo comportamiento. Concluyendo que la métrica TPM es un homomorfismo.

Al cumplirse las condiciones (i) la relación $\bullet\geq$ es de orden débil (es una relación binaria que es transitiva y completa), y (ii) es un homomorfismo (P1 $\bullet\geq$ P2 => TPM (arquitectura C) $\geq$ TPM (arquitectura B). Se concluye que la métrica TPM es de escala ordinal.

4. RESULTADO DE LAS PRUEBAS

Los datos empíricos fueron recopilados al aplicar el MMPM a tres sistemas desarrollados en lenguaje java: 1) DBLista con identificador AP1, 2) PSP Cenidet con identificador AP2 y 3) Marco estadístico con identificador AP3, cada uno con diferente objetivo:

- AP1: Realizar funciones con listas, como son: insertar, eliminar, recorrer, etc.
- AP2: Medir y controlar los tiempos que una persona utiliza en realizar tareas específicas.
- AP3: Realizar cálculos estadísticos automáticamente (media, moda, mediana, etc.).

La tabla 1 muestra como esta conformada cada una de las aplicaciones.

Tabla 1. Composición de los sistemas AP1, AP2 y AP3.

	P1	P2	P3
No. clases	9	47	254
No. total de métodos	78	151	5480
No. métodos privados	1	0	1714
No. métodos protegidos	0	0	7
No. métodos default	21	0	400
No. métodos públicos	56	151	3359

Como se puede observar en la Tabla 1 cada sistema se compone de un número diferente de clases y métodos, de igual forma se muestra que cada sistema cuenta con un número diferente de métodos privados, protegidos, amistosos y públicos. La Tabla 2 muestra los datos recopilados al aplicar el MMPM al sistema AP1.

Tabla 2. Resultados de la evaluación de AP1.

Aplicación	PMFP	PMFPr	PMFF	PM	TPM
P1	0.009	0	0.269	0.282	0.093

La AP1 cuenta con mas del 50% de sus métodos declarados con calificador de alcance public por lo que su grado de protección es bajo, así lo indica el resultado de la métrica PM en donde el valor tiende a cero, el valor de la PMFP y PMFPr son los más cercanos a cero, ya que como se puede observar en la Tabla 1 que AP1 cuenta con solo un método declarado con el calificador de alcance "private" por lo que la protección a este nivel es muy baja. Para la métrica PMFPr que tiene un valor de cero, la AP1 no cuenta con ningún método declarado como "protected" por lo que el grado de protección en este nivel es completamente nulo. La métrica PMFF arroja un valor más alto que las métricas PMFP y PMFPr, obsérvese que la AP1 tiene un mayor número de métodos con calificador de alcance "friendly", por lo que presenta un mayor grado de permisibilidad en comparación con los valores de PMFP y PMFPr. La AP1 al tener la mayoría de sus métodos declarados como públicos, cuenta con un grado muy bajo de protección modular TPM a nivel general.

La Tabla 3 muestra los datos recopilados al aplicar el MMPM al sistema AP2.

Tabla 3. Resultados de la evaluación de AP2.

Aplicación	PMFP	PMFPr	PMFF	PM	TPM
P2	0	0	0	0	0

Como se puede apreciar todas las métricas obtuvieron un resultado de cero, ya que AP2 no cuenta con ningún método declarado con un calificador de alcance diferente al de public. La AP2 tiene el 100% de sus métodos declarados con el calificador de alcance public, por lo que su nivel de protección es completamente nulo en todos los niveles, el cual se ve reflejado en los resultados obtenidos por las métricas PM mostrados en la Tabla 2.

La Tabla 4 muestra los datos recopilados al aplicar el MMPM al sistema AP3.

Tabla 4. Resultados de la evaluación de AP3.

Aplicación	PMFP	PMFPr	PMFF	PM	TPM
P3	0.249	0.02	0.073	0.387	0.115

La AP3 cuenta con el 61% de sus métodos declarados con calificador de alcance public indicando un grado de protección bajo, la PM y TPM también reflejan el nivel de protección presentando resultados que tienden a cero. Los valores de la PMFPr y la PMFF son los resultados más bajos ya que AP3 solo presenta siete métodos declarados con calificador protected equivalente al 0.12% del total de los métodos presentando en este nivel un grado bajo de protección, en cuanto a la PMFF presenta un valor un poco mayor a la PMFPr debido a que el 7.29% de los métodos tiene un calificador de alcance defult. El nivel de métodos privados, aunque no fue muy alto, en comparación con las demás métricas del MMPM fue el nivel con mejor grado de protección en la AP3.

5. Conclusiones

ISSN en trámite

El MMPM es útil para medir el grado de protección modular y en consecuencia el grado de fragilidad de arquitecturas orientada a objetos. La medición de estas métricas conduce a la corrección del código desagradable por su fragilidad. Como trabajo futuro se plantea la corrección automática de los calificadores de alcance aplicables tanto a funciones como a atributos de clases de objetos, de esta manera podrá corregirse la fragilidad de los módulos de programa y disminuir la deuda técnica.

REFERENCIAS

Calero, C. (2002). Métricas para la Calidad de los Sistemas de Información.

Finkelstein, L. (2009). widely-defined measurement – an analysis of challenges.

Gary, F. (1993). Measurement Theory for Software Engineers. En Lecture Notes on Engineering Measurement for Software Engineers.

Llinás, L. F. G. (2010). *Programación orienta a objetos en Java*.

Stevens, S. S. (1946). On the Theory of Scales of Measurement.

Zuse, H. (1995). Properties of Object-Oriented Software Measures.

Implementación del backend de un sistema informático para el seguimiento y control del mantenimiento de infraestructura y equipo en el ITSM

Ing. Rogelio Ramírez Silva*, M.C. Francisco Javier Gutiérrez Mata **,
M.I.D.S. Alma Delia De Jesús Islao *, M.C. Eloy Cadena Mendoza ******

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Acapulco,*
(Tel: 74-41-66-29-77; e-mail: rrasilva18@gmail.com).
***Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Acapulco,*
(e-mail: fcmata84@hotmail.com).
**** Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Acapulco,*
(e-mail: alma.islao.ita@gmail.com).
***** Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Acapulco,*
(e-mail: eloy_cadena@yahoo.com).

Resumen: En el presente artículo, se plasma el trabajo interdisciplinario de la Maestría en Sistemas Computacionales con apoyo del **CONACyT**, impartida en el Instituto Tecnológico de Acapulco. El objeto de este artículo es, presentar la implementación de la herramienta informática SISCMIE, la cual es un sistema informático destinado a dar seguimiento y control del mantenimiento de infraestructura y equipo en el Instituto Tecnológico de San Marcos (ITSM), programada la parte del backend en **NodeJS** en una versión web que permite a los usuarios tener acceso desde cualquier punto geográfico con acceso a internet. Este artículo forma parte de una serie de trabajos siendo el segundo de estos, el cual da seguimiento a un artículo previo titulado: **Propuesta de diseño de un sistema de información web para el seguimiento y control del mantenimiento de infraestructura y equipo**, escrito por los mismos autores y que fue presentado y publicado en el congreso de Academia Journals Puebla 2019.

Palabras claves: NodeJS, Backend, Mantenimiento, MVC.

1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías para el desarrollo de aplicaciones web, móviles y de escritorio han aumentado considerablemente, surgiendo herramientas que ayudan a la industria del desarrollo de software profesional, actualmente las tecnologías para el desarrollo de aplicaciones web se dividen en dos grandes intereses, los cuales son; Backend y Frontend.

En el backend se ejecutan las tecnologías que por lo general realizan el trabajo más pesado como el de procesar la información y persistirla en la base de datos, algunas de las tecnologías backend son, por mencionar algunas; Asp.Net Core, Ruby, Java y JavaScript. Las tecnologías ejecutadas del lado del Frontend son herramientas que se utilizan para renderizar la información almacenada en las bases de datos y que ayudan al usuario final a tener una experiencia agradable al introducir o extraer información.

Para la implementación del backend de la herramienta mencionada en este artículo se hará uso del framework NodeJS, el cual es un entorno JavaScript de código abierto que le permite ejecutar JavaScript en el lado del servidor. Esto permite utilizar el mismo lenguaje para ejecutar código tanto en el cliente como ahora en el servidor. Node utiliza una colección de módulos. Los módulos conforman la funcionalidad central de Node y le permiten hacer cosas como trabajar con el sistema de archivos, con protocolos de red (HTTP, TCP, DNS), datos binarios y la capacidad de comunicarse con la base de datos, es importante mencionar que fue diseñado para construir aplicaciones en red escalables (1).

El lenguaje que se utiliza para el desarrollo de la implementación es JavaScript el cual es un lenguaje de script interpretado que utilizando NodeJs se obtiene la capacidad de hacer cosas como hacer solicitudes desde una base de datos y responder a solicitudes HTTP y crear archivos. Otra característica muy importante por mencionar del lenguaje es que en tiempo de ejecución es multiplataforma, asíncrono, con E/S de datos en una arquitectura orientada a eventos y basado en el motor V8 de Google (2).

La base de datos utilizada para persistir la información del sistema es **mongodb**, el cual almacena datos en documentos flexibles similares a JSON, haciendo uso de este tipo de bases de datos NoSQL que rompen los paradigmas de las bases de datos relacionales las cuales dictan ciertas características que debe cumplir una base de datos, es importante resaltar que la información almacenada en las bases de datos NoSQL se

recuperan mucho más rápido que una base de datos relacional (3).

2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal que se pretende lograr con la implementación del software SISCMIE es gestionar la información de las anomalías y fallos que presentan los equipos e infraestructuras del ITSM.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL BACKEND DE LOS MÓDULOS DE SISCMIE

A partir de esta sección, se presenta la implementación de los módulos del sistema que trata este artículo, en la figura 1 se observa el diagrama de clases, el cual da soporte al desarrollo de SISCMIE haciendo uso de la tecnología NodeJS. Las clases en las cuales se basó el desarrollo de la implementación son las siguientes: Catalogo, Articulo, Ticket, DetalleTicket, Plan.

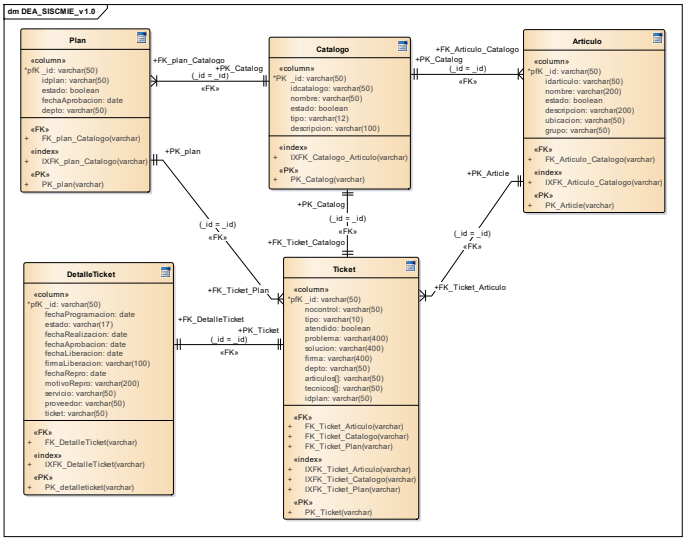


Figura 1. Diagrama de clases de SISCMIE.

La primera funcionalidad que se implementó en el API REST (Aplicación ejecutada en el servidor) de SISCMIE con NodeJS fue la de dar de alta departamentos, servicios, proveedores y grupos que se utiliza para clasificar los equipos e infraestructuras por tipo.

3.1 Módulo Artículos

Este módulo gestiona la parte de los artículos que el sistema administra. Es por lo que en este apartado se presenta la implementación del método para agregar un artículo al sistema, siendo este uno de los más importantes a mencionar debido a que si un artículo no existe en la base de datos no se puede realizar ninguna otra operación sobre sus datos. Las demás funcionalidades que permiten actualizar, buscar y eliminar, si fueron implementadas, aunque en el sistema no se eliminan artículos, más bien cambian de estado, los cuales pueden ser dos, activo o inactivo y al realizar esta operación se utiliza el método para actualizar. En las siguientes líneas de código se muestran la funcionalidad de agregar.

En forma local se envían los datos a la siguiente dirección http://localhost/article, los datos son enviados utilizando la aplicación postman para simular un cliente ingresando datos al sistema.

```
app.post('/article', (req, res) => {
  var body = req.body;

  var articulo = new Articulo({
    idarticulo: body.idarticulo,
    nombre: body.nombre,
    estado: body.estado,
    descripcion: body.descripcion,
    ubicacion: body.ubicacion,
    grupo: body.grupo
  });
  articulo.save((err, articuloGuardado) => {
    if(err) {
      return res.status(400).json({
        ok: false,
        mensaje: 'Error al crear artículo',
        errors: err
      });
    }
    res.status(201).json({
      ok: true,
      articulo: articuloGuardado
    });
  });
});
```

Como se observa en el código anterior se obtiene a través de la URL un objeto de tipo Json en el mismo orden que lo dicta el Objeto de tipo Articulo, los datos son recibidos a través del protocolo HTTP y almacenados en la base de datos, si hubiera un error este sería tratado y enviado al cliente que consume el backend, avisando del error ocurrido.

3.2 Módulo tickets

El módulo de tickets permite gestionar las solicitudes de mantenimiento correctivo que los jefes de cada departamento del ITSM realizan por alguna situación imprevista, también es importante mencionar que este mismo módulo se utiliza para realizar el procedimiento de verificación de infraestructuras que se menciona en el primer artículo (4).

Para este módulo se implementaron cuatro métodos que corresponden a un CRUD (Create, Read, Update y Delete) que se utilizan para crear tickets, obtener tickets de la base de datos, actualizar tickets y eliminar tickets. Los cuales se pueden acceder a través de los **ENDPOINT** o métodos que brindan la funcionalidad dependiendo del verbo (post, put, get y delete) que brinda el **API REST**. El endpoint para acceder a estas funcionalidades ejecutando la aplicación de forma local es http://localhost:3000/ticket

```
app.post('/ticket', (req, res) => {
   var body = req.body;

   var ticket = new Ticket({
   });
   ticket.save((err, ticketGuardado) => {
      if(err) {
         return res.status(400).json({
            ok: false,
            mensaje: 'Error al crear ticket',
            errors: err
         });
      }
      res.status(201).json({
         ok: true,
         ticket: ticketGuardado
      });
   });
});
```

Las líneas de código anterior se muestra el endpoint para crear tickets, el cual recibe a través del protocolo HTTP el cuerpo de tipo Json con la información a persistir en la base de datos los datos son obtenidos del cuerpo de la petición y mapeados al objeto de tipo Ticket y posteriormente con el método **save** se guarda la información, en caso de existir un error al guardar la información se envía un error de tipo 400 (se utiliza para indicar al usuario que no está enviando la información correctamente) con un mensaje indicando que ocurrió un error al guardar el ticket y si la persistencia de la información se realiza con éxito, se envía la información que se almacenó en formato Json para que la persona que realizó la operación realice la tarea que sea necesaria.

Cuando se realiza una verificación que es un procedimiento que se lleva a cabo en la revisión de infraestructuras y equipo del cual se habla en el primer artículo (4), se obtienen un conjunto de datos los cuales son iguales a si realizaras una solicitud de mantenimiento correctivo, es por eso que se optó por utilizar el método de ticket para realizar este procedimiento y almacenarlo en la misma tabla, la única diferencia es que, si se realiza una verificación, el campo tipo, almacena un valor indicando que es una verificación y si es una solicitud se almacena el valor solicitud, posteriormente se reprograma la fecha en que se realizará dicho trabajo y es ahí donde se utiliza el método que se llama DetalleTicket el cual me permite almacenar un detalle de dicha solicitud o verificación.

```
app.post('/', (req, res) => {
   var body = req.body;

   var detalleticket = new Ticket({
      fechaProgramada: body.fechaProgramada,
      estado: body.estado,
      fechaRealizacion: body.fechaRealizacion,
      fechaAprobacion: body.fechaAprobacion,
      firmaAprobacion: body.firmaAprobacion,
      fechaLiberacion: body.fechaLiberacion,
      firmaLiberacion: body.firmaLiberacion,
      fechaReprogramada: body.fechaReprogramada,
      motivoReprogramada: body.motivoReprogramada,
      servicio: body.servicio,
      proveedor: body.proveedor,
      ticket: body.ticket
   });
   detalleticket.save((err, detalleticketGuardado) => {
      if(err) {
         return res.status(400).json({
            ok: false,
            mensaje: 'Error al crear detalleticket',
            errors: err
         });
      }
      res.status(201).json({
         ok: true,
         detalleticket: detalleticketGuardado
      });
   });
});
```

El código mostrado a anteriormente corresponde a la funcionalidad que permite agregar detalle a las solicitudes o verificaciones de infraestructuras, los datos que envía el cliente son la fecha en que se programa la atención de la anomalía encontrada o mantenimiento correctivo a resolver, así como el servicio que se realizará, el proveedor que atenderá el servicio si es externo o interno y el identificador único de la solicitud que le corresponde dicho detalle.

La información es recibida por el servidor y almacenada en caso de ser correcta, en caso de que suceda un error al intentar almacenar la información, el servidor enviará un mensaje

indicando el error al cliente que realiza la operación en el API REST NodeJS.

3.3 Módulo Plan

La implementación del módulo plan consiste en gestionar información de la base de datos, como estado del plan, los cuales pueden ser en **proceso** o **cerrado**, fecha de aprobación del plan y departamento que creó el plan, esta información está relacionada con el módulo de solicitudes, debido a que en el proceso de verificación se hacen solicitudes de los mantenimientos que se realizarán como parte del plan de mantenimiento preventivo que se realizarán durante el semestre en curso en el ITSM. La finalidad de este módulo es asignarle solicitudes de mantenimiento preventivo que posteriormente se le asignarán fecha para ser realizadas.

Los métodos implementados para este módulo son: creación, obtención, actualización y eliminación. La dirección en modo local para acceder a dichos métodos es http://localhost:3000/plan, haciendo uso de esta dirección se puede manipular la información de los planes que son creados y están en proceso.
El código mostrado a continuación permite crear un plan, donde los datos se obtienen a través del protocolo HTTP enviados con el verbo post desde el cliente, la información se obtiene del lado del API REST en NodeJS y se almacena si no existe ningún error y si existe algún problema se notifica al cliente que está realizando la operación y se envía un error 400 el cual indica que los datos no se están enviando correctamente.

```
app.post('/plan', (req, res) => {
  var body = req.body;

  var plan = new Plan({
    idplan: body.idplan,
    estado: body.estado,
    fechaAprobacion: body.fechaAprobacion,
    depto: body.depto
  });
  plan.save((err, planGuardado) => {
    if(err) {
      return res.status(400).json({
        ok: false,
        mensaje: 'Error al crear plan',
        errors: err
      });
    }
    res.status(201).json({
      ok: true,
      ticket: planGuardado
    });
  });
});
```

4. RESULTADOS

En este apartado se presenta el resultado de la implementación del API REST en NodeJS.


```
{
    "ok": true,
    "articulo": {
        "estado": true,
        "_id": "5e5f2178960e4f0838b03f00",
        "idarticulo": "9723645718263",
        "nombre": "Laptop acer",
        "descripcion": "Computadora acer con memoria ram de 2GB,
        "ubicacion": "5e5707c75e6c334d046891be",
        "grupo": "5e5809fe8281f9637ccb8fad",
        "createdAt": "2020-03-04T03:33:12.376Z",
        "updatedAt": "2020-03-04T03:33:12.376Z",
        "__v": 0
    }
}
```


Figura 2. Datos devueltos al crear un artículo

Para hacer las peticiones al Backend se utilizó la aplicación postman para no tener que desarrollar un cliente que consuma los datos por el momento. Como se observa en la figura 2, al crear un artículo el servidor devuelve los datos que se almacenaron en la base de datos, los datos mostrados ya están listos para ser utilizados por cualquier cliente que quiera hacer uso de ellos, es decir, desarrolladores para una aplicación móvil u otra aplicación web que requiera información de los equipos almacenados.


```
{
    "ok": true,
    "ticket": {
        "tipo": "Solicitud",
        "atendido": false,
        "articulos": [
            "5e583f4898f23361a414bfa4",
            "5e5888d9e567b853e86a8ff0"
        ],
        "tecnicos": [
            "5e46fc2b191de933a4abbf1d"
        ],
        "_id": "5e5f20ff960e4f0838b03eff",
        "nocontrol": "6",
        "problema": "Reparación",
        "createdAt": "2020-03-04T03:31:11.834Z",
        "updatedAt": "2020-03-04T03:31:11.834Z",
        "__v": 0
    }
}
```


Figura 3. Datos devueltos al crear una solicitud o al crear una verificación de infraestructura o equipo

La información en formato Json que se muestra en la figura 4, es el resultado devuelta por el servidor SISCMIE al crear un plan, a partir de ese momento la información puede ser mostrada en tablas o manipula de la manera que mejor convenga.

 ISSN en trámite


```
{
    "ok": true,
    "plan": {
        "estado": true,
        "_id": "5e5f273bb172d11d407e13ca",
        "idplan": "0104032020",
        "depto": "5e57074e5e6c334d046891bc",
        "createdAt": "2020-03-04T03:57:47.477Z",
        "updatedAt": "2020-03-04T03:57:47.477Z",
        "__v": 0
    }
}
```


Figura 4. Datos devueltos al crear un plan

La información mostrada en la figura 5, corresponde a los datos devueltos cuando se ingresan datos al catálogo general del sistema, en este catálogo se registran departamentos, proveedores, grupos y servicios, en este caso se registró un departamento.


```
{
    "ok": true,
    "catalogo": {
        "estado": true,
        "tipo": "DEPARTAMENTO",
        "_id": "5e5f22c1960e4f0838b03f02",
        "idcatalogo": "depto-20",
        "nombre": "Rercursos Materiales y Servicios",
        "descripcion": "Jefatura del departamento de materiales",
        "createdAt": "2020-03-04T03:38:41.599Z",
        "updatedAt": "2020-03-04T03:38:41.599Z",
        "__v": 0
    }
}
```


Figura 5. Datos devueltos al ingresar información al catálogo general

Los campos de los departamentos, proveedores, grupos y servicios son los mismos, lo único que cambia en cada uno de ellos son los datos que se registran, es por eso que se optó por implementarlo de esta manera, es decir, diferenciarlos por un campo llamado tipo.

5. COMENTARIOS FINALES

5.1 *Conclusiones*

En este artículo, se presentó la implementación del backend haciendo uso de la tecnología JavaScript y NodeJS, los cuales son tecnologías fáciles de utilizar y de fácil acceso, pero, sobre todo, tecnologías de uso libre, es decir con licencias que permiten desarrollar aplicaciones que no te penalizan por hacer uso personal o comercial con productos finales desarrollados con dichas herramientas. NodeJS es una tecnología con la que se pueden desarrollar servicios web rápidos y fáciles, es decir, levantar un servicio se realiza en un tercio del tiempo que llevaría realizarlo con otras tecnologías como Asp.Net Core o Java. Es importante recalcar que NodeJS es una tecnología que tiene buena seguridad y que es respaldada por NPM una biblioteca de librerías online que da soporte a dicho framework.

Hasta este punto la información ya se puede utilizar para hacer pruebas o en su defecto también se puede hacer uso de dicha información para consumirla con una aplicación móvil y desarrollar aplicativos que realicen otras funciones como consultar información de solicitudes pendientes o notificar que no se ha realizado una solicitud que está atrasada, a partir de este punto ya se puede comenzar a utilizar el sistema y darle el rumbo que el cliente considere apropiado.
Es importante mencionar que toda la información almacena esta protegida haciendo uso de web tokens, es decir, si alguna otra persona ajena el ITSM quisiera consumir la información del sistema esta debe proporcionarles la clave con la que se desencripta el token que se envía en cada petición que se realiza para realizan cualquier operación sobre el API REST como Crear, Actualizar, Obtener o Eliminar datos de dicho sistema.

5.2 *Trabajos a futuro*

El presente artículo forma parte de una serie de trabajos que reflejan el progreso del proyecto de tesis de maestría, donde el trabajo a futuro es desarrollar la parte del frontend, es decir, una interfaz intuitiva con la que el usuario final pueda interactuar de una manera sencilla, esto es debido a que actualmente en el sistema solo está desarrollada la parte que procesa los datos con base a las reglas de negocio y la arquitectura propuesta en el primer artículo (4).

REFERENCIAS

1. **Ferguson, Russ.** Beginning JavaScript. The Ultimate Guide to Modern JavaScript Development*: Apress 2019.*

2. **Kiessling, Manuel.** ayllusolar. [En línea] 29 de 1 de 2015. [Citado el: 3 de 3 de 2020.] http://ayllusolar.cl/wp-content/uploads/2016/08/node_js_Guia_Principiantes.pdf.

3. **Zorrilla, Marta.** Universidad de Cantabria. [En línea] 3 de 2017.[Citado el: 3 de 3 de 2020.] https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2396/course/section/2473/NoSQL_Tema2_MongoDB.pdf.

4. *Propuesta de diseño de un sistema de información web para el seguimiento y control del mantenimiento de infraestructura y equipo.* ***Ramírez Silva Rogelio*****, y otros.** 6, Puebla: Academia Journals, 2019, Vol. 11.

Algoritmo para la medición no invasiva de objetos a pequeña escala

Bruno Antonio García Avendaño* Jorge Luis Camas Anzueto*
Rubén Grajales Coutiño* Madaín Pérez Patricio*

** Tecnológico Nacional/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carr. Panamericana 1080 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Tel: 9612489764; brunoo_garciia@hotmail.com; jcamas@ittg.edu.mx; rgrajales@ittg.edu.mx; mperez@ittg.edu.mx).*

Abstract: Existen objetos que su espesor es demasiado pequeño y que no se logra ser medido con métodos y dispositivos convencionales, esto conlleva a buscar métodos no invasivos para realizar la medición de dicho espesor. Al ser un método no invasivo se logra que la medición se realice continuamente llegando a monitorear el cambio que sufre el objeto micrométrico.

Uno de los métodos que no necesita intervenir con el objeto es a través de dispositivos de visión, dependiendo el tipo de dispositivo de adquisición de imagen y el tipo de procesamiento que se le aplique se logra obtener diferentes tipos de información de una imagen adquirida.

Para este estudio se utiliza una serie de procesamientos que abarca desde la adquisición de imágenes hasta localizar pixeles específicos pasando por un proceso de calibración, escala de grises, filtración y binarización.

El desarrollo experimental se basa en poner un objeto de dimensiones conocidas para la parte de calibración, una vez calibrado ir variando su espesor y que el algoritmo sea capaz de dar la medición localizando los bordes e identificando la distancia entre ellos.

Keywords: Adquisición de imagen, procesamiento de imagen, medición de espesores, objetos milimétricos, bordes.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la medición es un proceso fundamental para la industria y para la investigación, existe una gran variedad de procesos e instrumentos para obtener diferentes magnitudes físicas, las cuales pueden ser: temperatura, vibración, presión, densidad, longitud, entre otros. Algunas magnitudes se logran obtener de forma directa y otras de forma indirecta esto dependerá del entorno y las condiciones en las que se encuentre la magnitud que se desea obtener.

La finalidad es enfocarse en lo que son las mediciones a micro escala, al ser una magnitud de longitud a escala pequeña su medición es difícil de obtener por métodos o equipos convencionales, en consecuencia, se necesita de métodos indirectos y dispositivos especiales para obtener una medición más exacta y precisa.

En la industria existen situaciones donde detener algún proceso lleva a pérdidas de tiempo y recursos, un ejemplo de ello es al momento de desbastar en un torno (Che, 2018), esto quiere decir que si se necesita realizar una medición de algún producto mientras se encuentra en dicho proceso no sería posible por lo que se busca alternativas. Una de las alternativas es utilizar técnicas de procesamientos de imágenes por permitir la interpretación de la información visual obtenida a través de un dispositivo de adquisición de imágenes (Guerrero González, 2006).

Existen diferentes procesos donde conocer el espesor de cierto objeto es indispensable, no solamente en las piezas que se van a desbastar, tambien en la herramienta de desbaste (Alhadeff, et al., 2019) cuando se quiere conocer el espesor del revestimiento que cubren a estas herramientas (Tamborrino, et al., 2019). Algunos procesos donde se trabaja con fluidos suele quedar residuos llamados películas que afectan a la transferencia de calor del recipiente donde se encuentran asi que es necesario conocer el espesor de la película para controlar la transferencia de calor (Han & Shikazono, 2009), (Han, et al., 2015).

En el área de las investigaciones biotecnológicas se utilizan diferentes métodos como son penetración de aguja, tomografía micro-computarizada e histología por mencionar algunas para medir el espesor del cartílago que cubre la articulación temporomandibular (Mirahmadi, et al., 2017). La tomografía es usada en el área de la medicina ya que permite observar objetos solidos que se encuentran dentro del cuerpo humano, usando este proceso es posible obtener los grosores que tienen los tejidos duros adyacentes a los implantes dentales (Yen, et al., 2019).

 ISSN en trámite

En este trabajo se presente el desarrollo de un método de medición de espesores utilizando técnicas no invasivas para objetos pequeños en los procesos donde se requiera.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Procesamiento de imágenes.

Se identificó que uno de los métodos no invasivos más utilizados son los sistemas relacionados con adquisición de imágenes, porque al obtener la imagen de algún objeto no es necesario que el dispositivo de adquisición tenga contacto físico con el objeto.

Los objetos a medir al ser pequeños son indispensables dispositivos especiales de adquisición de imágenes, por ejemplo, los microscopios digitales. Estos tienen la ventaja de crear una imagen digital y esta mandarla directamente a algún ordenador que será el encargado de aplicar los procesos esenciales a la imagen según se requiera.

Las imágenes en los ordenadores son conjuntos de píxeles que son representados con matrices (Aguirre Dobernack, 2003), (Kumar & Verma, 2010), donde cada pixel se representa como una función y que contiene información que dependiendo lo que se quiera obtener es la técnica que se le aplicará (fig. 1).



Fig. 1. Objeto a medir.

Se diseñó e imprimió en 3D una galga de espesores donde la parte más pequeña mide 0.5 mm. y la parte más grande mide 10 mm. con escalones que incrementan en 0.5 mm. (fig. 2), con el fin de tener un objeto con diferentes medidas conocidas.

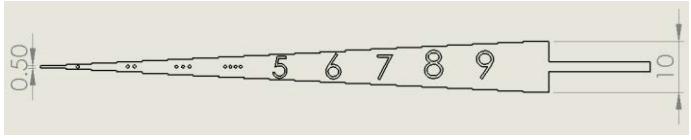


Fig. 2. Diseño de la galga de espesores.

2.2 Escala de grises.

Se realizó un proceso a la imagen a color que consiste en transformarla en una imagen en escala de grises, es un proceso común para el procesamiento de imágenes, ya que facilita la obtención de información de una imagen (Ardila Urueña, et al., 2011) y a su vez es representado como un campo escalar ya que no posee un campo tridimensional como es el RGB (Burger & Burge, 2009), los datos adquiridos se encuentran en un rango de 0 (negro) a 1 (blanco) (McAndrew, 2004) (fig. 3).

La ecuación (1) describe la conversión de una imagen RGB a escala de grises (Kumar & Verma, 2010).

$$I_y = 0.333F_R + 0.5F_G + 0.1666f_B \quad (1)$$

Donde las F's son valores de intensidad de cada coordenada de las matrices e Iy es el valor de intensidad en la escala de grises.

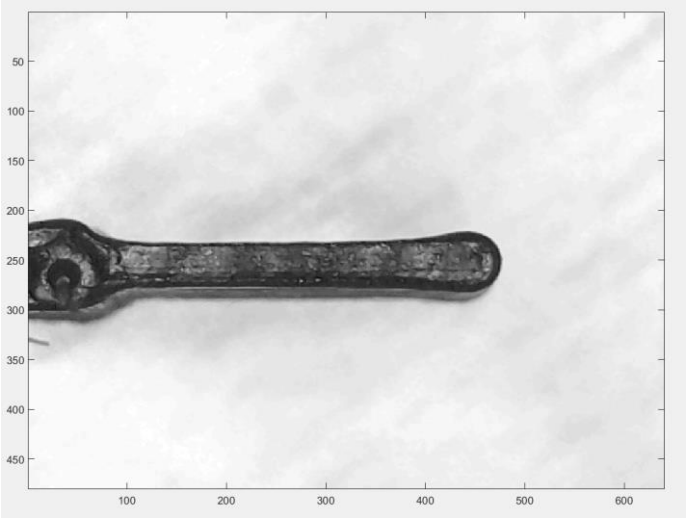


Fig. 3. Ejemplo de una imagen a escala de grises.

2.3 Filtro.

Después se aplicó un filtro gaussiano, este permitió una suavización de la imagen original con el propósito de que la imagen filtrada sea más fácil de realizarle ciertos tipos de procesos, mejorando los resultados como es el caso de la binarización de imágenes, este filtro es uno de los mejores y más utilizado (Vives Garnique, et al., 2014) (fig. 4).

 ISSN en trámite

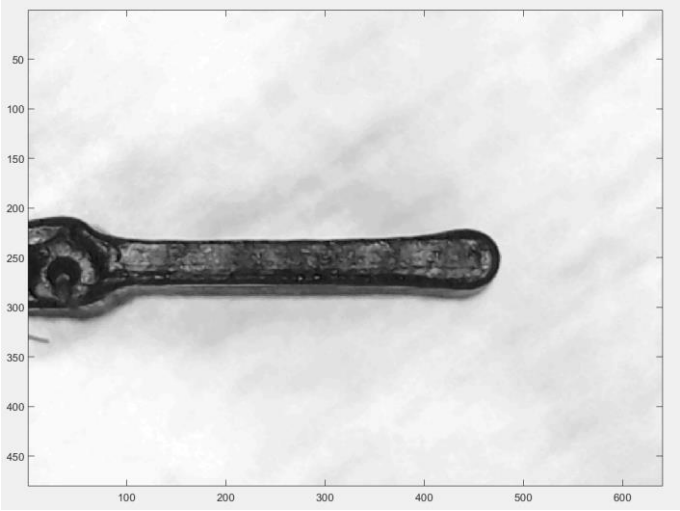


Fig. 4. Ejemplo de una imagen filtrada.

2.4 Binarización.

Por último, se empleó un proceso llamado binarización, que consiste en transformar imágenes en escala de grises a imágenes binarias (blanco y negro) (Molina, et al., 2017), asignándoles valores de 0 y 1 a los pixeles de una imagen dependiendo del umbral (McAndrew, 2004), obteniendo asi imágenes simples y resaltando los objetos que se encuentran en la imagen (fig. 5).

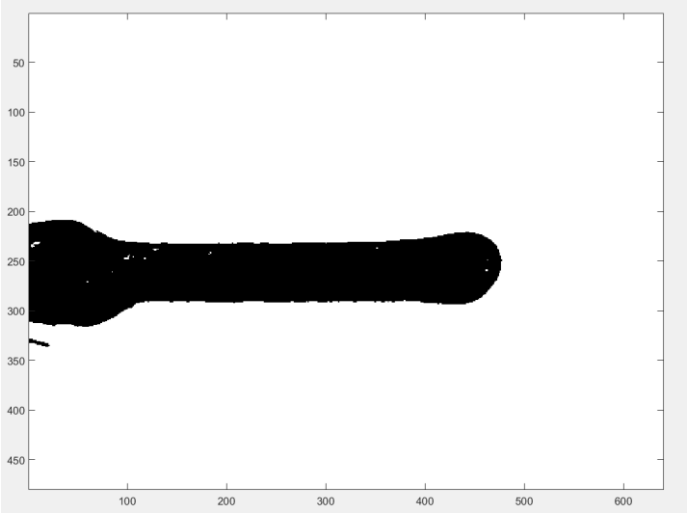


Fig. 5. Ejemplo de una imagen binarizada.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Toma de datos.

El objeto a medir, en este caso la galga, se coloca de forma que quede lo más paralelamente posibles a los márgenes superior e inferior de la imagen, esto para obtener unas mediciones más confiables.

3.2 Identificación de pixels.

Como ya se ha mencionado antes cada pixel de una imagen se considera una función f(x,y) (McAndrew, 2004), la información que se requiere para este trabajo es conocer la ubicación de algunas funciones en específico y el valor binario que tiene. Como se trabajó con una imagen binarizada solo se tiene dos posibles resultados de la función que es equivalente al objeto o al fondo.

Para encontrar la ubicación de la función se analizó solo una columna de pixeles de la imagen, es donde se encuentro el punto de interés al medir del objeto. Se examinó fila por fila el valor que asumió cada función, de la primera hasta la última, la ubicación de interés se halló donde el valor de la función cambio, es decir, en ese punto se convirtió del blanco al negro o contrariamente, por lo tanto, se localizó el borde superior del objeto, se repitió el procedimiento, pero esta vez de la última fila a la primera para encontrar el borde inferior del objeto, en ambos casos se almacenó la posición de las funciones donde hubo el cambio de valor.

Con la posición encontrada de cada borde se procedió a obtener la diferencia, el valor obtenido equivale a la distancia en cantidad de pixeles. Todo este proceso se observa en la fig. 6.

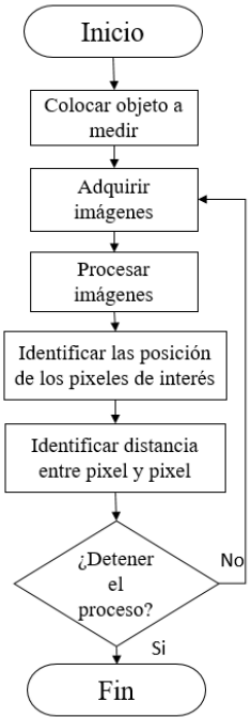


Fig. 6. Diagrama de flujo del proceso de medición.

ISSN en trámite

4. RESULTADOS

Los datos obtenidos utilizando como objeto a medir la galga de espesores se observan en la figura 7, las mediciones se realizaron con incrementos de 0.5 milímetros.

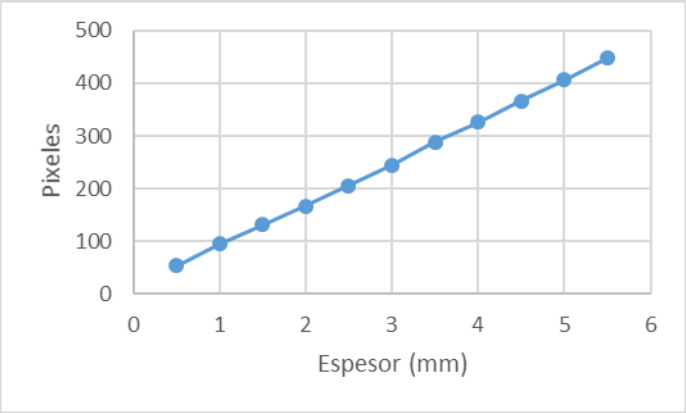


Fig. 7. Pixeles obtenidos con la galga.

Con los datos obtenidos se encontró un polinomio que representa el comportamiento de la medición (2).

$$y = -2E^{-6}x^2 + 0.0136x - 0.2362 \qquad (2)$$

Donde x es la cantidad de pixeles obtenido e y es el valor en milímetros. Haciendo varias mediciones y metiendo los datos al polinomio se observa su comportamiento con respecto al valor original (fig. 8).

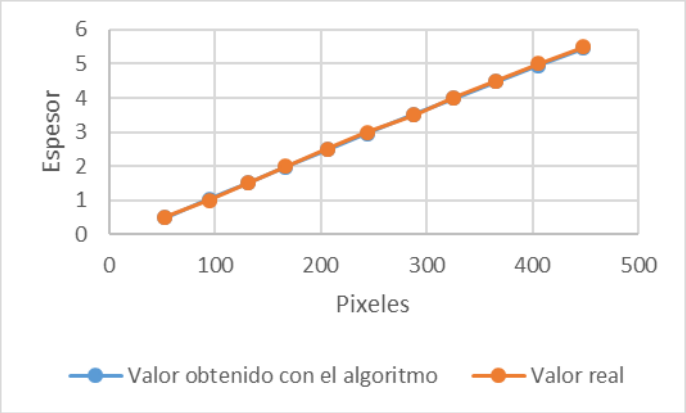


Fig. 8. Comparación de la medición real con la medición del algoritmo.

5. CONCLUSIONES

El algoritmo demostró ser capaz de obtener la medición del espesor de objetos pequeños en tiempo real, permitiendo llevar a cabo un proceso eficiente en la medición donde no existe posibilidad de interactuar directamente con el objeto a medir.

REFERENCES

Aguirre Dobernack, N., 2003. Implementación de un sistema de detección de señales de tráfico mediante visión artificial basado en FPGA (Tesis), Sevilla: s.n.

Alhadeff, L., Marshall, M., Curtis, D. & Slatter, T., 2019. Protocol for tool wear measurement in micro-milling. Wear, pp. 54-67.

Ardila Urueña, W., Cortés Osorio, J. A. & Mendoza Vargas, J. A., 2011. Técnicas alternativas para la conversión de imágenes a color a escala de grises en el tratamiento digital de imágenes. Scientia et technica, pp. 207-212.

Burger, W. & Burge, M. J., 2009. Principles of Digital Image Processing. s.l.:Springer, Londres.

Che, J. y. R. M., 2018. Real-time monitoring of workpiece diameter during turning by vision method. Measurement.

Guerrero González, N., 2006. Segmentación de imagenes empleando el espacio de escala gaussiano (Trabajo de grado), Manizales: s.n.

Han, Y., Kanno, H., Ahn, Y.-J. & Shikazono, N., 2015. Measurement of liquid film thickness in micro tube annular flow. International Journal of Multiphase Flow, pp. 264-274.

Han, Y. & Shikazono, N., 2009. Measurement of the liquid film thickness in micro tube slug flow. International Journal of Heat and Fluid Flow, pp. 842-853.

Kumar, T. & Verma, K., 2010. A Theory Based on Conversion of RGB image to Gray. International Journal of Computer Applications.

McAndrew, A., 2004. Introduction to digital image processing with MATLAB. Melbourne: Thomson.

Mirahmadi, F. y otros, 2017. Ex vivo thickness measurement of cartilage covering the temporomandibular joint. Journal of Biomechanics, pp. 165-168.

Molina, E., Diaz, J., Hidalgo-Silva, H. & Chávez, E., 2017. Algoritmos de Binarización Robusta de Imágenes con Iluminación No Uniforme. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, pp. 1-10.

Tamborrino, R., D'Accardi, E., Galietti, D. P. & Galietti, U., 2019. A thermographic procedure for the measurement of the tungsten carbide coating thickness. Infrared Physics & Technology, pp. 114-120.

Vives Garnique, L. A., Mejía Cabrera, H. I., Vilcherrez Chavarry, K. L. & Vassallo Barco, M. J., 2014. Visión artificial: Aplicación de filtros y segmentación en imágenes de hojas de café. Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación, pp. 71-81.

Desarrollo de un sistema embebido de visión artificial multiespectral para la estimación de la humedad en productos agrícolas.

Eluiser Toledo Arguello* Madaín Pérez Patricio**
José Armando Fragoso Mandujano***

Tecnológico Nacional/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carr. Panamericana 1080 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Tel: 9613535129; toledo.195@hotmail.com*; mperez@ittg.edu.mx jose.fragoso@ittuxtlagutierrez.edu.mx***).*

Abstract: Los métodos de ensayos no destructivos (END) se focalizan en utilizar técnicas no invasivas para identificar, caracterizar y determinar la integridad física de los materiales. En la agricultura, durante la post cosecha los productos con alto contenido de humedad representan elevadas pérdidas por descomposición, el alto contenido de humedad acelera las actividades enzimáticas que favorecen al deterioro. Para procurar la preservación; el producto agrícola se deshidrata y con ello reduce la actividad del agua preservando propiedades organolépticas y proteínicas del producto durante un prologando periodo para tener una disponibilidad para su consumo fuera de temporada. Para estimar las propiedades intrínsecas durante el secado del producto agrícola los métodos de inspección suelen ser invasivos realizando apreciaciones indirectas sobre su sabor, estado de madurez o tiempo de conservación, empleando los sentidos. Lo que no garantiza una calidad acertada acerca del nivel de humedad del producto. El objetivo del estudio es el desarrollo de un sistema de cámara multiespectral embebido a bajo costo que permita la captura y procesamiento de imágenes para obtener el índice de vegetación de diferencia normalizada mediante la fusión de las imágenes termográficas-rgb. Identificar el nivel de deshidratado para la preservación de los productos agrícolas con mayor producción en la región del sureste mexicano.

Keywords: Visión artificial, termografía, sistemas embebidos, procesamiento de imágenes, cámara multiespectral.

1. INTRODUCCIÓN

En la región sureste mexicano el sector agrícola es la principal fuente de ingresos económicos. Los productos con mayor producción de la región (plátano, papaya, mago) son altamente perecederos, con frecuencia se producen perdidas en la post cosecha debido al deterioro notable que las actividades enzimáticas y microbianas producen, combinado con los cambios climáticos y una manipulación inadecuada durante el transporte y almacenamiento (Babu et al., 2018). La deshidratación es un proceso de reducción de la humedad a niveles muy bajos dentro de un límite seguro para preservar alimentos altamente perecederos, especialmente frutas y hortalizas, cuyo contenido de agua es típicamente superior al 90%. Una manera de preservar los productos es mediante el secado; consiste en reducir el contenido de humedad de los alimentos, lo cual disminuye su actividad enzimática y la capacidad de los microorganismos para desarrollarse sobre el alimento (Ochoa-Reyes et al., 2013). Durante el proceso de secado convencional los cultivos se exponen directamente al sol donde la incapacidad de controlar adecuadamente el proceso de secado es un problema habitual que propicia productos con poca calidad (Singh et al., 2018) y su mercado potencial de venta se reduce al local, al no cumplir con las expectativas de control de calidad deseada por los compradores. Para poder garantizar la calidad, los productos deben conservar la mayoría de sus propiedades nutricionales y organolépticas, una correcta inspección durante el deshidratado mejora la palatabilidad, digestibilidad, color, sabor y apariencia de un alimento, prolongan la vida durante el embalaje, manipulación y transporte (Jayas, 2016). Los métodos tradicionales de inspección en su mayoría son invasivos con el uso de instrumentos de medición manuales interrumpiendo el proceso de secado, las inspecciones visuales en su mayoría el control se basa en apariencias externa las cuales han demostrado carencias en los tiempos excesivos en el monitoreo de líneas continuas de producción (Mayor & Sereno, 2004). Estudios anteriores han demostrado la viabilidad al utilizar técnicas de visión artificial, utilizando termografía infrarroja se puede estudiar de manera precisa el efecto secado en tomates (Ochoa-Reyes et al., 2013), La combinación de múltiples imágenes como técnica de procesamiento tienen el potencial de mejorar el rendimiento, no se han desarrollado estudios de captura y procesamiento de imágenes multiespectrales como método de ensayo no destructivo para medir la humedad en productos agrícolas. Estudios anteriores se han enfocado para detectar la madurez en cítricos (Kuzy & Li, 2017); La fusión de imágenes es la combinación de dos o más imágenes de una escena para mejorar la percepción visual o la

extracción de características (Bulanon et al., 2009). Sin embargo, en el estudio del estado del arte, no se han encontrado técnicas de inspección multiespectrales durante la deshidratación en productos agrícolas y es lo que motiva la investigación. Se ha demostrado que al utilizar imágenes multiespectrales mejoraron la detección de frutos en un 74% en comparación del uso de la imagen térmica sola (Wachs et al., 2010). La fusión del color y las imágenes térmicas mejoraron efectivamente la detección de cítricos verdes inmaduros con una tasa de precisión de 95.5 % (Kuzy et al., 2018).
El objetivo del trabajo es desarrollar un sistema embebido que permita capturar y procesar imágenes multiespectrales, utilizar el sistema de visión artificial como método de inspección no destructiva. Obtener información a partir del procesamiento de imágenes durante el proceso de secado como los gradientes de temperatura durante la actividad de deshidratado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sistema de Visión Artificial.

Se utilizó Hardware de código abierto, específicamente una placa raspberry pi 3b, el estudio propone combinar dos cámaras comerciales que adquieren imágenes en distintas ondas del espectro electromagnético formando una cámara multiespectral, para aplicaciones integradas. El diseño se ha implementado para cumplir en la medida posible las restricciones SWaP(tamaño, peso y potencia) (Doering et al., 2016) cumple con el diseño de un sistema embebido con orientación a la portabilidad. El sistema se explica en la figura 2:

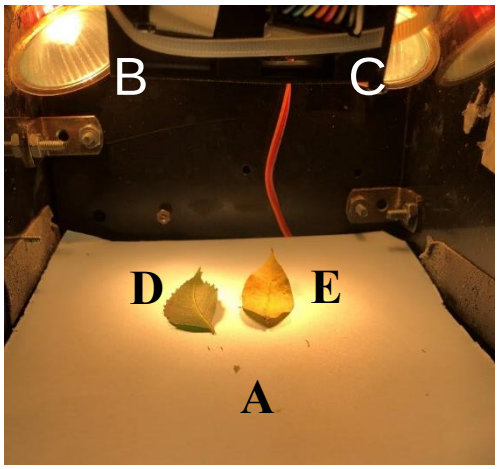


Figura 1. Componentes físicos del sistema de termografía pulsada. (A) base de la muestra; (B) pulso de calor con lámparas, (C) cámara multiespectral infrarroja – RGB; (D) hoja hidratada; (E) hoja totalmente seca.

El sistema propuesto, para el análisis de productos agrícolas, presentado en la figura 1. Conformado por cuatro paredes de acrílico de 15×15 centímetros con 2 centímetros de grosor, utiliza una base de vidrio para evitar el calentamiento no deseado con una cubierta de color uniforme para obtener fotogramas donde puedan distinguirse fácilmente el fondo del espécimen. Un relevador es operado desde la raspberry pi para activar y desactivar el pulso de calor producido con lámparas de halógeno Tishman de 130 volts; con un ángulo de apertura de 38° a una distancia de 10 cm desde la base y con captación de 9150 luxes. Se produce un pulso de calor de 5º Celsius que es alcanzado en un lapso de tiempo de 10 segundos. La termografía pulsada como medio de estimulación térmica utiliza las diferencias en la difusividad térmica y la conductividad para identificar las diferencias entre temperaturas de los objetos, se aplica un impulso de dirac como medio de estimulación térmica al objetivo (Kuzy et al., 2018). El tiempo en alcanzar la temperatura de equilibrio (temperatura ambiental) se define como tiempo de equilibrio (Sripragash & Sundaresan, 2017). Durante el tiempo de descanso se determina la difusividad térmica del material. El análisis termográfico está en la relación entre la radiación emitida por el objeto y la temperatura del mismo (Maldague, 2001), se rige por la ley de Stefan-Boltzmann, de la ecuación 1:

$$P/A = \varepsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

donde P es la radiación total emitida en watts, A es el área de la superficie emisora en metros cuadrados, ε es la emisividad del objeto adimensional, σ es la constante de Stefan-Boltzmann en $W/m^2 \cdot K^4$, T es la temperatura absoluta en °K y K es la unidad de temperatura kelvin (Kuzy et al., 2018).
El sistema propuesto, figura 2, consiste en una placa raspberry pi 3B (CPU + GPU: Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC @ 1.4GHz. RAM: 1GB LPDDR2 SDRAM.). Una placa otorga la suficiente potencia de procesamiento y energía para ambas cámaras reduciendo el peso (Doering et al., 2016). La cámara utilizada es FLIR LEPTON® 3.5 con módulo de cámara infrarroja de onda larga (LWIR) de radiometría, con un obturador de 160 x 120 pixeles en un rango espectral de 8 micrómetros (µm) a 14 micrómetros, la segunda cámara es la mini raspberry cam de 5mp 1080p a 30fps, presentado en la figura 2. El diseño del soporte para la batería, cámaras y placa de procesamiento fue impreso en PLA, con soportes laterales que permiten las modificaciones en trabajos futuros sin necesidad de remover las cámaras.

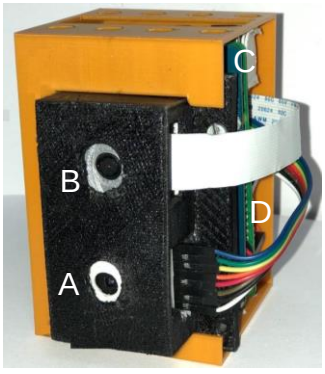


Figura 2. Cámara Multi – Espectral. (A) Cámara infrarroja rango de 8 µm a 14 µm; (B) Cámara RGB 400 nanómetros – 700 nanómetro; (C) Batería de 5 V 3000Ma; (D) Raspberry pi 3 como placa de adquisición de video.

2.2 Diseño de la plataforma embebida para la adquisición de datos.

Todos los videos recolectados siguen un solo formato, 1 segundo para la corrección de campo plano (flat-field correction), 10 segundos de estimulación con lámparas, 24 segundos de enfriamiento y 1 segundo de cierre para evitar errores en las grabaciones.
Se realizaron múltiples sesiones con un total 36 videos, uno por cada muestra. En los fotogramas aparecen ciertas áreas de pixeles agrupados entre sí, dichos pixeles presentan propiedades o características comunes; estas son las regiones de interés útiles para el procesamiento de datos. La técnica utilizada para la extracción de propiedades de dichas regiones es la umbralización. Cuando la región fue delimitada se realiza una operación algebraica que consiste en la sumatoria de los valores de los pixeles de la región de interés. La codificación a cargo de la automatización del sistema de captura y procesamiento se realizó en el lenguaje de python versión 3, consiste en cuatro tareas realizadas en paralelo (figura 3):

1. Apertura y cierre del servo motor como Corrección de campo plano (flat-field correction). Esta es una calibración de compensación que generalmente se realiza al encender, cuando la cámara cambia de temperatura y periódicamente durante el funcionamiento. Esta calibración compensa ciertos errores que se acumulan durante el funcionamiento de la cámara.
2. Activación y desactivación de la lampara, para crear el pulso de calor durante 10 segundos exactos.
3. Activación de la cámara térmica para la captura de 35 segundos exactos de videos, 10 segundos de pulso térmico y 25 segundos de enfriamiento a una velocidad de 20 fps.
4. Activación de la cámara RGB durante 10 segundos, para la captura de datos.
5. Gestión de memoria para la adquisición de videos rápidamente sin perdidas de fotogramas.

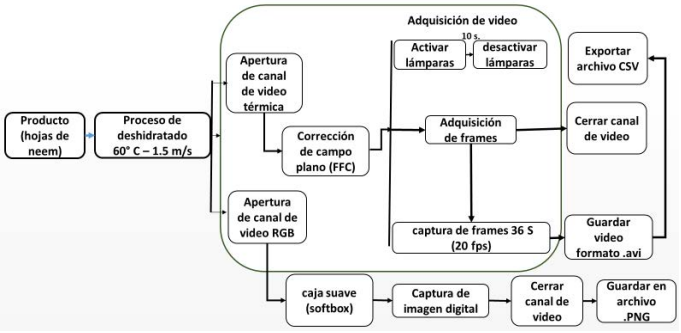


Fig. 3. Automatización de la captura de fotogramas termográfico - RGB.

3. CARACTERIZACIÓN DEL DESHIDRATADO.

Por disponibilidad de muestras en el centro de investigación, se utilizaron 36 de hojas de neem (Azadirachta indica) con geometría similar de 5 centímetros de diámetro. El análisis de humedad se realizó con el peso de cada hoja con una báscula digital de precisión ± 0.01 gramos. Las 36 muestras se extendieron en una sola capa de la rejilla de una secadora comercial Hamilton Beach 32100A (fig.4) de convección forzada con flujo de aire constante a una velocidad de 1.5 m/s a 60° Celsius. Se tomaron muestras de ponderación cada 15 minutos sin interrumpir el proceso, la diferencia de masa se fue registrando en cada lapso de tiempo de 15 minutos. El proceso de secado se continuo a 60° Celsius durante 2:00 horas y 0:30 minutos hasta alcanzar un peso constante. Se realizaron todos los experimentos de secado por triplicado.



Fig. 4. Secadora de convección forzada con muestras de hojas de neem utilizadas en este estudio.

3.1 Método de secado: Convección forzada con flujo paralelo.

La transmisión de calor por convección ocurre entre el fluido y una superficie en virtud del movimiento relativo de las partículas del fluido, es decir por transferencia de masa, la transferencia de calor por convección depende de la capacidad de la superficie y de su resistencia del flujo de energía. la convección se clasifica según el tipo de flujo al cual el objeto se somete, si las variaciones de densidad tienen relación a los gradientes de temperatura se conoce como convección natural, cuando es causado por un agente externo como un ventilador en el caso de estudio que se presenta; se le denomina convección forzada. Cuando la diferencia de temperatura entre la superficie del cuerpo y la temperatura del ambiente no es demasiado grande el calor transferido hacia el cuerpo en relación al tiempo es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el medio externo y esté definido por la ley de enfriamiento de Newton.

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha S(T - Ta) \qquad (2)$$

Donde α es el coeficiente de intercambio de calor y S es el área en metros cuadrados del cuerpo. T es la temperatura en grados kelvin del cuerpo y Ta es la temperatura del ambiente. La teoría predice que la velocidad de evaporación por convección de una superficie saturada de agua es constante si las condiciones externas (temperatura, humedad y velocidad del aire) son constantes (Manzur & Cardoso, 2015).

 ISSN en trámite

4. RESULTADOS

El sistema podrá ser utilizado para tomar datos experimentales de cualquier producto agrícola con alto contenido de humedad, la figura 5 muestra las imágenes de la cámara RGB e Infrarroja. Las pruebas se realizaron en hojas hidratadas y totalmente deshidratadas, para poder identificar y cuantificar los niveles de humedad respectivos.

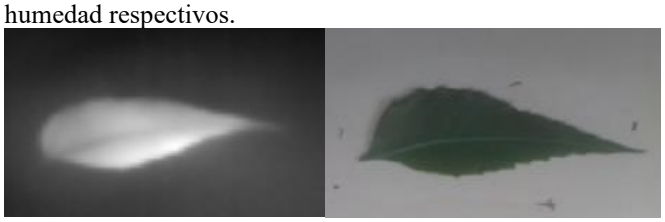


Figura 5. Imágenes Capturadas con el sistema propuesto, Infrarrojo (izquierda) y RGB (derecha).

4.1 Estimación de la humedad del producto.

Para evaluar y estimar el nivel de humedad de los productos agrícolas, se caracterizó el proceso y se describió anteriormente en el artículo. Los resultados obtenidos se aprecian como curvas de secado donde se expresan el contenido de humedad respecto al tiempo como se muestra en la figura 6. Estas mediciones se obtienen directamente del peso perdido de las muestras durante el tiempo de secado (MR); Se describe en la ecuación 3 (Grumezescu & Holban, 2018).

$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (3)$$

Donde X_0 es el contenido inicial de humedad en miligramos, X_{eq} es el contenido de la humedad en equilibrio, esto sucede cuando no existe humedad en el cuerpo, el cual representa un valor muy pequeño con relación a X_0, la ecuación 3 es simplificada a la ecuación 4.

$$MR = \frac{X}{X_0} \quad (4)$$

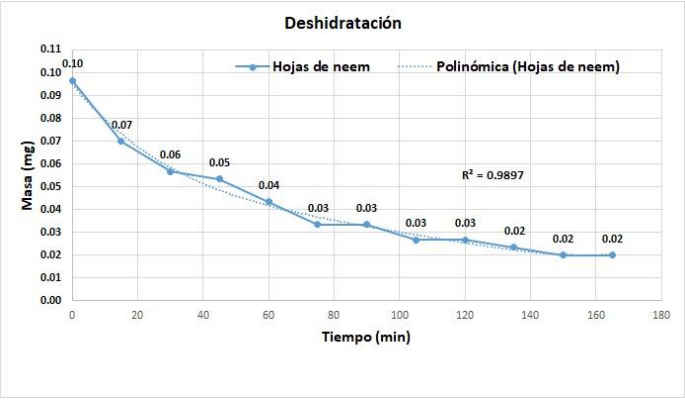


Figura 6. Caracterización del deshidratado de neem en secador convectivo a 60° Celsius con un ajuste polinomial de orden 4.

4.2 Procesamiento de imagines para la obtención del NDVI.

El cómputo para la obtención del NDVI con el uso del dispositivo multiespectral es regido por la ecuación 5:

$$NDVI(x,y) = \frac{(NIR(x,y) - VIS(x,y))}{(NIR(x,y) + VIS(x,y))} \quad (5)$$

Donde el NIR es la imagen termográfica obtenida por la cámara infrarroja (A), VIS es la información obtenida de la cámara RGB (B), presentadas en la figura 3, (x, y) son coordenadas del pixel en la imagen, realizando la operación algebraica a ambas imágenes se obtiene el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Es el indicador de detección remota ampliamente utilizado para el monitoreo del crecimiento de los cultivos, el manejo de tierras agrícolas y la predicción de producción de cultivos (Pino V., 2019).

Para utilizar los datos de ambas cámaras es necesario una sincronización pixel a pixel, tal sincronización se realiza mediante técnicas de transformación geométrica, permite modificar las coordenadas espaciales de la imagen para poder analizar la región de interés (Pajares Martinsanz & Cruz García, 2001). Con uso de la técnica de desplazamiento, los pixeles (i, j) de la imagen RGB (figura 5) se desplazaron hasta alcanzar la posición $(i + i_d, j + j_d)$ para sustituir el valor de intensidad pixel en $(i + i_d, j + j_d)$ por el correspondiente (i, j) de la imagen original, tomando (i_d, j_d) como coordenadas de la región de interés de la imagen termográfica (figura 5), se consideran los métodos de calibración estereoscópicas como trabajos futuros debido a los factores intrínsecos y extrínsecos de la cámara.

El análisis y obtención del NDVI se realizó con software especializado en el Analís de imágenes multiespectrales de código abierto QGIS. En un tiempo máximo de 150 minutos, las hojas se encuentran totalmente deshidratadas (figura 6), se experimentaron con 22 muestras de hojas de neem para comparar el comportamiento de los valores de índice de vegetación normalizada respecto a la curva de deshidratación presentada en la figura 6, los valores obtenidos a partir del cálculo del índice de vegetación (ecuación 5), se presentan en la figura 8. Se realizó un promedio de cada grupo en cada índice de valor obtenido y se presenta en la tabla 1:

Tabla1.- Valores cuantificables del índice de humedad obtenidos mediante el procesamiento de imágenes NDVI.

Valores NDVI	Hoja Hidratada	Hoja Deshidratada
	-0.644692129	-0.77463237
	0.35721515	-0.1757225
	0.41682983	0.29906704
	0.67644452	0.58591677
	0.93463376	0.87276609
	1.19567379	1.1596098

La interpretación para el análisis de los datos obtenidos con las imágenes multiespectrales se realiza con bandas de colores, el color más cercano al azul representa las cantidades de humedad, dentro de los márgenes verdes se puede apreciar la deshidratación como se ejemplifica en la figura 7.

 ISSN en trámite

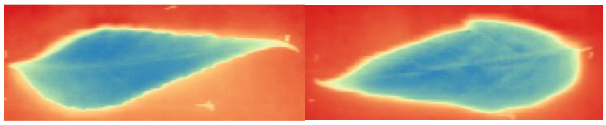


Figura 7. Ejemplo de una muestra, cálculo del NDVI; hoja totalmente hidratada a la izquierda, hoja deshidratada en la derecha.

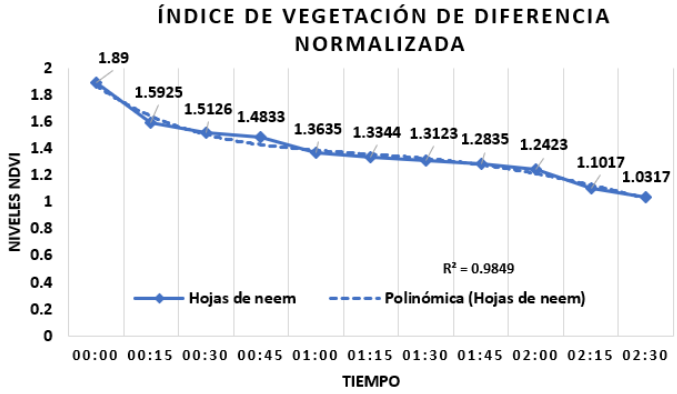


Figura 8. Caracterización del deshidratado de hojas de neem con valores de niveles de NDVI.

Los valores de los niveles de NDVI obtenido de las 22 muestras, presentan un comportamiento similar a la curva descendente de deshidratado obtenida en la figura 6. La fusión de imágenes térmicas-RGB ofrecen resultados evaluados en diferentes longitudes de ondas del espectro electromagnético, lo cual permite una evaluación e interpretación más acertada respecto al nivel de hidratación de los productos agrícolas.

5. CONCLUSIONES

El sistema de visión artificial multiespectral propuesto demostró ser efectivo en la estimación de niveles de humedad mediante una correcta adquisición y procesamiento de imágenes, la fusión de imágenes multiespectrales como método de evaluación no destructiva nos ayudan a identificar propiedades intrínsecas del producto, mejorando la calidad de la interpretación humana. Es un sistema de bajo costo con relación a las cámaras comerciales, que nos permite el desarrollo de nuevos trabajos con diferentes técnicas para extraer información multiespectral para su análisis e interpretación, la metodología propuesta de evaluación es aplicable a cualquier producto agrícola con un alto contenido de humedad.

6. REFERENCIAS

Babu, A. K., Kumaresan, G., Raj, V. A. A., & Velraj, R. (2018). Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 90, 536–556. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.04.002

Bulanon, D. M., Burks, T. F., & Alchanatis, V. (2009). Image fusion of visible and thermal images for fruit detection. Biosystems Engineering, 103(1), 12–22. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.009

Doering, D., Vizzotto, M. R., Bredemeier, C., da Costa, C. M., Henriques, R. V. B., Pignaton, E., & Pereira, C. E. (2016). MDE-based Development of a Multispectral Camera for Precision Agriculture. IFAC-PapersOnLine, 49(30), 24–29. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.117

Grumezescu, A. M., & Holban, A. M. (2018). Natural and artifiial flavoring agents and food dyes: Handbook of food bioengineering. In Natural and Artifiial Flavoring Agents and Food Dyes: Handbook of Food Bioengineering (Vol. 7). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/C2016-0-00380-7

Jayas, D. S. (2016). Food Dehydration. In Reference Module in Food Science. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.02913-9

Kuzy, J., & Li, C. (2017). A Pulsed Thermographic Imaging System for Detection and Identification of Cotton Foreign Matter. Sensors, 17(3), 518. https://doi.org/10.3390/s17030518

Kuzy, J., Jiang, Y., & Li, C. (2018). Blueberry bruise detection by pulsed thermographic imaging. Postharvest Biology and Technology, 136, 166–177. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.10.011

Maldague, X. (2001). Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing.

Manzur, A., & Cardoso, J. (2015). Velocidad de evaporación del agua. In EDUCATION Revista Mexicana de Física (Vol. 61).

Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. Journal of Food Engineering, 61(3), 373–386. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4

Ochoa-Reyes, E., Ornelas-Paz, J. D. J., Ruiz-Cruz, S., Ibarra-Junquera, V., Pérez-Martínez, J. D., Guevara-Arauza, J. C., & Aguilar, C. N. (2013). TECNOLOGÍAS DE DESHIDRATACIÓN PARA LA PRESERVACIÓN DE TOMATE (Lycopersicon esculentum Mill.). BIOtecnia, 15(2), 39. https://doi.org/10.18633/bt.v15i2.148

Pajares Martinsanz, G., & Cruz García, J. M. de la. (2001). Visión por computador: imágenes digitales y aplicaciones.

Pino V., E. (2019). Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología. Idesia (Arica), ahead, 0–0. https://doi.org/10.4067/s0718-34292019005000402

Singh, P., Shrivastava, V., & Kumar, A. (2018). Recent developments in greenhouse solar drying: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 3250–3262. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.10.020

Sripragash, L., & Sundaresan, M. (2017). Non-uniformity correction and sound zone detection in pulse thermographic nondestructive evaluation. NDT & E International, 87, 60–67. https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2017.01.006

Wachs, J. P., Stern, H. I., Burks, T., & Alchanatis, V. (2010). Low and high-level visual feature-based apple detection from multi-modal images. Precision Agriculture, 11(6), 717–735. https://doi.org/10.1007/s11119-010-9198-x

Algoritmo de transformación espacial de imágenes para reducción de bits aplicado a estimación de movimiento

José C. Velasco Álvarez*. Madaín Pérez Patricio* Yair González-Baldizón*
Jorge L. Camas Anzueto* Rubén Grajales Coutiño*

*Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
Carr. Panamericana 1080, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, C. P. 29050, México
(e-mail: jcvelalva@outlook.com, mperez@ittg.edu.mx, yair.gonzales@ittuxtlagutierrez.edu.mx, jcamas@ittg.edu.mx, rubngc@gmail.com)

Resumen: La reducción o simplificación de datos es una necesidad importante en el procesamiento de imágenes debido a la minimización de operaciones a realizar y a la aceleración del procesamiento. En este trabajo se propone un algoritmo que transforma una región cuadrada de la imagen en un vector único que representa a un plano, este vector se compara con el vector de la imagen o fotograma siguiente situado en las mismas coordenadas, realizando el cálculo del ángulo entre ellos, si el resultado es diferente a 0° entonces hubo un cambio en la posición marcada. El desempeño del algoritmo es evaluado contra el de los métodos encontrados en la literatura, tomando como consideración el tiempo que tarda el algoritmo en procesar cierto número de fotogramas.

Keywords: Algorithms, computer vision, digital images, image processing, least squares, motion estimation, moving objects.

1. INTRODUCCIÓN

En el procesamiento de imágenes existe una rama dedicada a la codificación y compresión de video que emplea ampliamente los algoritmos de coincidencia de bloques para eliminar la redundancia temporal en una secuencia de video Xiong et al. (2015) Kerfa et al. (2016). La coincidencia de bloques consiste en dividir los fotogramas de una secuencia en bloques generalmente cuadrados denominados macrobloques (MB) y detectar el movimiento entre fotogramas con base a los MB que los conforman.

Los bloques del fotograma actual se comparan con los bloques del fotograma anterior en una región de búsqueda establecida según el contexto de cada escena. Los criterios de comparación más utilizados en este tipo de algoritmos son la suma de diferencias absolutas (SAD) y suma de diferencias al cuadrado (SSD) Richardson (2004), el procedimiento para realizar la comparación es el siguiente:

Paso 1. Tomar un bloque del fotograma actual

Paso 2. Tomar un conjunto de bloques de las mismas dimensiones, pero ahora del fotograma de referencia.

Paso 3. Realizar la resta pixel por pixel del bloque del fotograma actual con los bloques del fotograma de referencia y guardar el absoluto (SAD) y el cuadrado (SSD) de estas diferencias.

Paso 4. Realizar la sumatoria de las diferencias obtenidas en el paso anterior.

Paso 5. Elegir la sumatoria de menor valor, lo que indica una coincidencia con el bloque correspondiente.

La elección de las dimensiones de los bloques y la región de búsqueda es una parte importante para el coste computacional del algoritmo, mientras más grandes sean las ventanas utilizadas mayor será el coste computacional.

Se propone un algoritmo capaz de reducir directamente el coste computacional disminuyendo el número de operaciones a realizar tomando en cuenta los criterios de la coincidencia de bloques.

2. AJUSTE DE PLANO CON MINIMOS CUADRADOS

Las imágenes digitales son representaciones en 2D de una escena capturada de un entorno en 3D, por lo tanto, cada pixel en una imagen tiene coordenadas (x, y). Cuando se habla de imágenes a escala de grises, se entiende que cada pixel tiene un nivel de gris con un valor comprendido entre 0 y 255 Manna (2016). Si se toma el nivel de gris como una tercera dimensión

 ISSN en trámite

en las imágenes a escala de grises, se consideraría a cada pixel como un punto en el espacio 3D.

Partiendo de la idea anterior, tomamos un conjunto de pixeles en un arreglo cuadrado de lado *n* (Fig. 1).

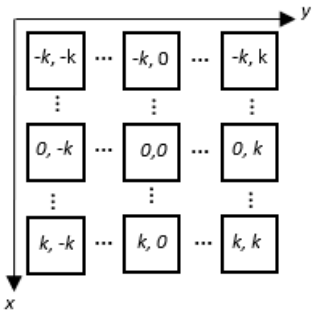


Fig. 1. Distribución de las coordenadas del plano de referencia XY de la ventana propuesta.

$$k = (n-1)/2 \tag{1}$$

Donde *k* (1) es el número de píxeles en los extremos de la ventana, por ejemplo, si *n=3*, *k= (3-1) /2=1*.

Dado un conjunto de puntos:

$$\{(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^{m} \tag{2}$$

Donde $m=n^2$

Si la ecuación del plano es:

$$z = ax + by + c \tag{3}$$

Buscamos una función que mejor aproxime los puntos muestreados Eberly (2000), disminuyendo el error:

$$d_i = ax_i + by_i + c - z_i \tag{4}$$

$$f(a,b,c) = \sum_{i=1}^{m} (ax_i + by_i + c - z_i)^2 \tag{5}$$

Con la condición:

$$\partial f/\partial a = 0, \qquad \partial f/\partial b = 0, \qquad \partial f/\partial c = 0 \tag{6}$$

Nuestro sistema de ecuaciones queda de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^{m} ax_i^2 + \sum_{i=1}^{m} bx_i y_i + \sum_{i=1}^{m} cx_i = \sum_{i=1}^{m} x_i z_i \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{m} ax_i y_i + \sum_{i=1}^{m} by_i^2 + \sum_{i=1}^{m} cy_i = \sum_{i=1}^{m} y_i z_i \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^{m} ax_i + \sum_{i=1}^{m} by_i + m = \sum_{i=1}^{m} x_i z_i \tag{9}$$

Sustituyendo los valores de *x* e *y* (Fig. 1) en (7), (8) y (9), y suponiendo que *n=3* tenemos las soluciones del sistema como sigue:

$$a = \begin{pmatrix} -1/6 & -1/6 & -1/6 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1/6 & 1/6 & 1/6 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{pmatrix} \tag{10}$$

$$b = \begin{pmatrix} -1/6 & 0 & 1/6 \\ -1/6 & 0 & 1/6 \\ -1/6 & 0 & 1/6 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{pmatrix} \tag{11}$$

$$c = \begin{pmatrix} 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{pmatrix} \tag{12}$$

La forma de estas soluciones indica una operación de convolución en toda la imagen para obtener su transformación, con esto, cada bloque de 3x3 pixeles se reduce a un vector *[a, b, c]* y, aunque el tamaño de la ventana aumentara, el vector resultante seguiría siendo de las mismas dimensiones.

Para ventanas más grandes se genera un kernel de convolución dependiente del valor de *n*.

$$\vec{k} = [-k, \ldots, 0, \ldots, k] \tag{13}$$

$$p = n(\vec{k} \cdot \vec{k}) \tag{14}$$

$$\ker A = \vec{k}^t \begin{pmatrix} 1/p \\ 1/p \\ \vdots \\ 1/p \end{pmatrix}^t_{nx1} \tag{15}$$

$$\ker B = \vec{k} \begin{pmatrix} 1/p \\ 1/p \\ \vdots \\ 1/p \end{pmatrix}_{nx1} \tag{16}$$

$$\ker C = \begin{pmatrix} 1/n & \dots & 1/n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/n & \cdots & 1/n \end{pmatrix}_{nxn} \quad (15)$$

Una vez obtenido este vector, se aprecia que los valores de *a* y *b* no están en el mismo rango de los valores de *c*, es necesario normalizar estos valores para trabajar con ellos sin ningún problema. Observamos que el valor de *c* no es más que la media de los valores de la ventana, entonces, debemos normalizar a un rango de 0 a 255, ya que trabajamos con pixeles de 8 bits.

$$norm_8 = \frac{x_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \cdot 255 \quad (16)$$

Donde x_i es el valor de *a* o *b* que se desea normalizar y *X* es todo el rango de valores que toman *a* y *b*.

3. CRITERIO DE COMPARACIÓN

Después de haber transformado nuestras imágenes correspondientes al fotograma actual y al fotograma de referencia lo siguiente es comparar los bloques.

La manera más sencilla de hacer esta comparación consiste en calcular el ángulo entre los vectores resultantes de la transformación de cada bloque en la misma posición, si el ángulo es diferente de cero, indicaría que hubo movimiento en los pixeles, para un cálculo más rápido se realiza el coseno del ángulo para el cual cos(0°) = 1 y cos(90°) = 0.

$$\cos\theta = \left(\frac{\vec{v_1} \cdot \vec{v_2}}{\left\|\vec{v_1}\right\| \cdot \left\|\vec{v_2}\right\|} \right) \quad (13)$$

Comparado con los métodos mencionados en la sección 1, esta coincidencia se basa en una decisión binaria con respecto a un solo bloque, si (13) es diferente de uno, entonces el pixel central del bloque correspondiente en la imagen resultante toma el valor de 255 (totalmente blanco) lo que indica que hubo movimiento, caso contrario tomará el valor de 0.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El algoritmo se programó en el software Matlab en una PC portátil con procesador Intel® Core™ i7-9750H @2.60GHz y se utilizó un dataset (Fig. 2) obtenido por estudiantes del TecNM/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.



Fig. 2. Imagen proveniente del dataset.

El primer paso es obtener imágenes a escala de grises (Fig. 3) para luego realizar la transformación, el método de conversión a escala de grises utilizado es el de Luminosidad Urueña et al. (2011), Este método es la versión ponderada del método común del promedio. Los valores de cada componente (R, G, B) presentan un valor teniendo en cuenta la percepción humana.

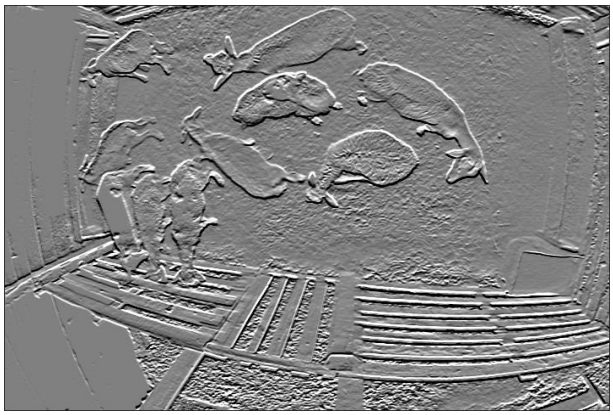


Fig. 3. Imagen a escala de grises por el método de la Luminosidad.

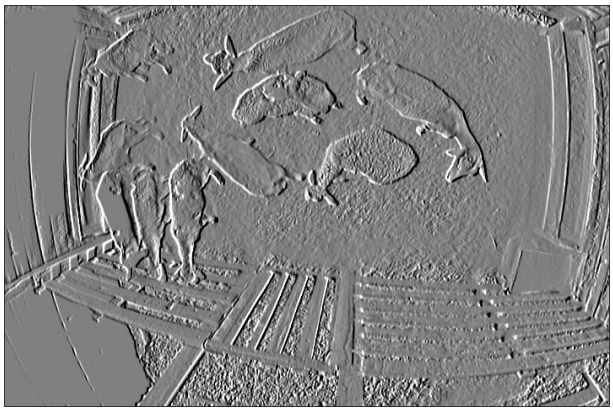
Usando una ventana de 3x3 se obtienen tres capas de imágenes (Fig. 4), una para cada componente del vector resultante, con este tamaño de ventana se aprecian a *a* y *b* como si se tratase de un filtro para la detección de bordes Germade (2010), para lograr esta apreciación fue necesaria la normalización mencionada en (16), por último, la componente *c* no es más que un filtro de la media que suaviza la imagen.

Si juntamos las tres capas de imágenes en una solo como si fuese una imagen RGB quedaría como en (Fig. 5), según el color correspondiente se observan los bordes en las combinaciones entre rojo y verde (*a* y *b* respectivamente).

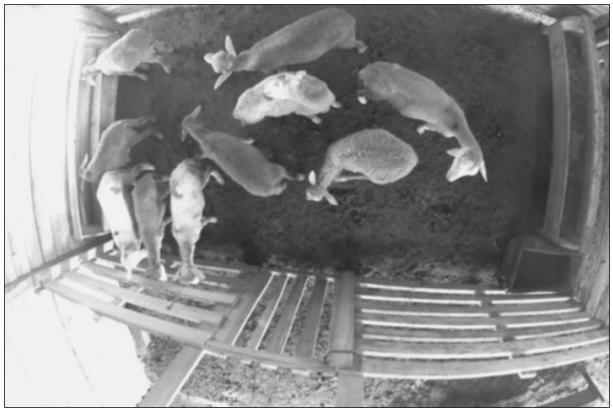
 ISSN en trámite



a)



b)



c)

Fig. 4. Imágenes resultantes de la transformación, a) componente *a*,b) componente *b* y c) componente *c*.

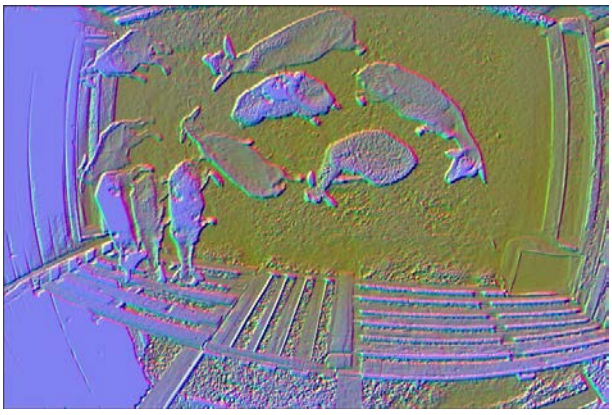


Fig. 5. Imagen resultante de la unión de (Fig. 4a,b y c).

La respuesta de la comparación entre fotogramas puede verse como una imagen binaria (Fig. 6) que muestra los puntos en los que se presenta movimiento en los pixeles con respecto al tiempo, para este caso se utilizaron ventanas de 25x25 para evitar falsos positivos y reducir el ruido presente en la imagen.



Fig. 6. Imagen binaria de la comparación entre fotogramas.

Para demostrar el movimiento existente, se rodea la zona en movimiento con un rectángulo que toque los extremos de los pixeles blancos (Fig. 7).

Para el cálculo del coseno del ángulo se utilizaron valores con tres cifras decimales para evitar confundirse con los cambios mínimos debidos a la iluminación, cuando no se redondean las cifras, el algoritmo falla y le da valor de 255 a todos o casi todos los pixeles en la imagen binaria lo (Fig. 8 y 9).

Se realizaron pruebas disminuyendo el número de cifras decimales hasta llegar al resultado deseado y se puede observar como una cifra decimal influye en la toma de decisiones en el algoritmo (Fig. 10 y 11).

ISSN en trámite



Fig. 7. Zona de movimiento marcada en el fotograma de salida.

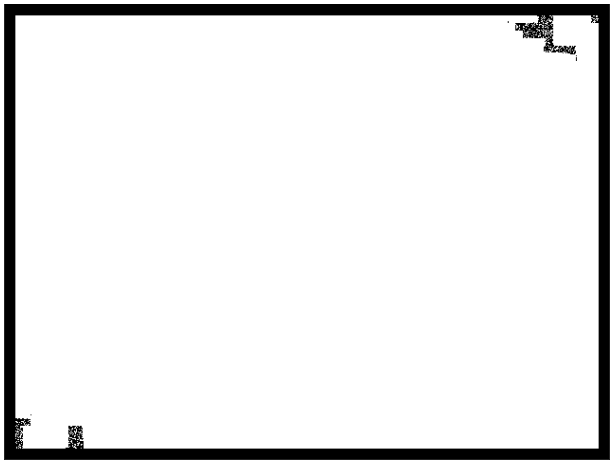


Fig. 8. Error en el algoritmo debido al no redondeo de cifras.



Fig 9. Recuadro de las zonas de movimiento debidas al error.

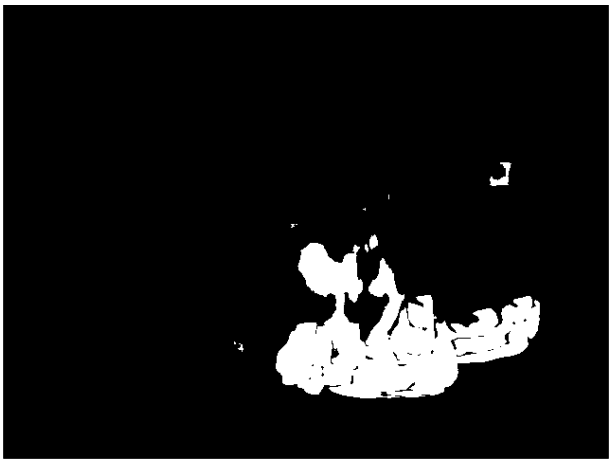


Fig. 10. Imagen binaria usando 4 cifras decimales para el cálculo del coseno del ángulo.

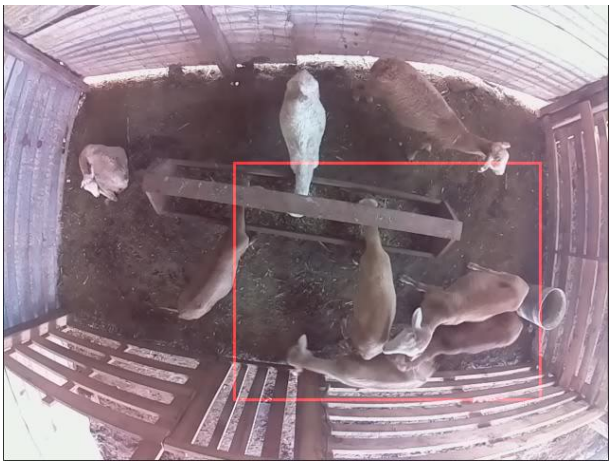


Fig. 11. Recuadro de la zona de movimiento con 4 cifras decimales.

Se comparó el método propuesto con el algoritmo SAD integrado en el software Matlab, con una secuencia de 100 imágenes haciendo el mismo comparativo pixel a pixel, o en este caso, vector a vector. La respuesta del método propuesto fue de 0.0926 fps y la respuesta del SAD fue de 0.0206 fps, con esto se demuestra la eficacia de la reducción lograda con la transformación de la imagen.

Como futuras mejoras en el algoritmo se está trabajando en la adaptación del método al contexto de algoritmos de estimación de movimiento, empleando esquemas de un solo candidato y multiples candidatos para una búsqueda optima de la coincidencia y conocer los vectores de movimiento presentes en cada secuencia.

ISSN en trámite

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo, se presenta un nuevo algoritmo para la coincidencia de bloques pensando en la minimización de las operaciones realizadas por el computador, se probaron diferentes tamaños de ventanas dando como resultado una detección de movimiento real con respecto a la secuencia de imágenes elegida.

El algoritmo propuesto presenta mejores resultados en cuanto a velocidad de procesamiento comparado con los criterios de coincidencia de bloques mencionados en la literatura y se espera mejorar hasta lograr procesar imágenes en tiempo real con la implementación en una arquitectura hardware como una tarjeta FPGA o una GPU que logren paralelizar las operaciones.

REFERENCES

Eberly, D. (2000). Least squares fitting of data. Chapel Hill, NC: Magic Software.

Germade, Y. A., Morales, E. B., & Ramirez, O. R. (2010). Filtrado digital en el procesamiento de imágenes empleando matlab. *Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura.*

Kerfa, D., Belbachir, M.F. (2016). Star diamond: an efficient algorithm for fast block matching motion estimation in H264/AVC video codec. *Multimed Tools Appl*, 75, 3161–3175.

Manna, A. (2016). *Introducción al Procesamiento de Imágenes con Matlab 1era Parte*. Buenos Aires.

Richardson, I. E. (2004). *H. 264 and MPEG-4 video compression: video coding for next-generation multimedia.* John Wiley & Sons.

Urueña , W., Osorio, J., & Vargas, J. (2011). Técnicas alternativas para la conversión de imágenes a color a escala de grises en el tratamiento digital de imágenes. *Scientia et technica,* 47(1), 207-212.

Xiong, J., Li, H., Meng, F., Wu, Q., & Ngan, K. N. (2015). Fast HEVC inter CU decision based on latent SAD estimation. *IEEE Transactions on Multimedia,* 17(12), 2147-2159.

Revisión del estado del arte en reconocimiento basado en imágenes de la oreja

R. Orlando Sánchez Flores, Andrea Magadan Salazar

Departamento de Ciencias Computacionales
Tecnológico Nacional de México / CENIDET
Cuernavaca, Morelos, México
{rances.sanchez19ca@cenidet.edu.mx, andrea.ms@cenidet.tecnm.mx}

Resumen: En los últimos años, el desarrollo de sistemas de identificación de personas ha crecido, principalmente, debido al potencial de aplicaciones en seguridad. En este artículo se presenta una revisión de cómo se ha estado trabajando el reconocimiento de personas mediante el análisis de imágenes de la oreja, listando las bases de datos más recurrentes, así como las técnicas más utilizados en los dos principales enfoques de implementación; finalizando con una discusión sobre el futuro de está área.

Palabras clave: reconocimiento, biometría, oreja, clasificación.

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema biométrico realiza la identificación de una persona basándose en las características físicas de la misma. Estas características pueden ser el rostro, la huella dactilar, la voz, la oreja etc. Entre las características biométricas que se pueden usar para identificar a una persona, la oreja es de principal interés debido a que es invariante a los estados de ánimo u expresiones faciales, además de que es bajamente afectada por la edad Annapurani (2015). Además de esto la oreja está cerca de la simetría bilateral según Emeric *et al.,* (2017), por lo que puedes usar cualquiera de las dos orejas para identificar a ambas y es única incluso en gemelos Akin *et al*., (2018).

Un sistema biométrico realiza la identificación de una persona basándose en las características físicas de la misma. Estas características pueden ser el rostro, la huella dactilar, la voz, la oreja etc. Estos sistemas ofrecen una mayor seguridad que los métodos tradicionales como contraseñas, llaves o tarjetas Omara *et al,.* (2016).

El objetivo de este artículo es presentar una revisión de las principales bases de datos, enfoques de solución y técnicas utilizadas en este problema.

1.1 La oreja

La oreja cumple con cuatro propiedades que la hacen óptima para la biometría, estas son: universalidad, unicidad, permanencia y mensurabilidad. La universalidad significa que la característica está presente en cada persona. Casi todas las personas cuentan con una oreja a excepción de aquellos que sufrieron algún accidente o padecen alguna condición médica específica. La unicidad significa que la característica es única para cada persona. La permanencia se refiere a que no cambia a través del tiempo. Y finalmente la mensurabilidad indica que esta característica es medible por dispositivos técnicos Kamatchi & Gnanajeyaraman (2014).

1.2 *Estructura de la oreja*

La estructura de la oreja está compuesta por las partes que se muestran en la Figura 1.



Figura 1. Estructura de la oreja obtenida de Omara et al., (2016).

En la medicina legal, forense y criminalística, la identificación de una persona es un aspecto fundamental. En este campo, Alfonso Bertillon fue el primer científico en usar la oreja como método de identificación Curiel et al., (2006) debido a que no poder obtener huellas dactilares, encontrando que la oreja es inmutable en sus formas y proporciones. Entre sus características morfológicas están sus bordes, lóbulo, pliegues,

 ISSN en trámite

forma general y separación. En la última década, debido a las aplicaciones en seguridad, se está retomando el análisis de la oreja para el desarrollo de sistemas de identificación utilizando la oreja, por las ventajas que tiene sobre otros rasgos biométricos del cuerpo humano.

2. CONJUNTOS DE DATOS

2.1 IIT Delhi Ear Database (2006)

Este *Dataset* fue creado en por el *Indian Institute of Technology Delhi* consta de dos conjuntos en escala de grises uno con 471 imágenes con una resolución de 272x204 píxeles y el segundo de 793 imágenes a 50x180 píxeles, las imágenes fueron tomadas en espacios controlados y sólo contienen una oreja .



Figura 2. Ejemplos de imágenes del conjunto de datos IIT Delhi Ear Data Base del Indian Institute of Technology Delhi(2006).

2.2 AMI

El *Dataset Mathematical Analysis of Images* contiene 700 imágenes a color con una resolución de 492x702 píxeles. Estas imágenes están dividas en cuatro subconjuntos en espacios controlados. Contiene imágenes de la oreja izquierda, derecha, con la cabeza frontal, hacia arriba y hacia abajo Esther (2008).



Figura 3. Ejemplos de imágenes del conjunto de datos AMI de Gonzalez (2008).

2.3 ND-Collection J2 y ND- Collection E

Ambos *Datasets* pertenecen a la *University of Notre Dame* (2007), el primero cuenta con 1300 imágenes en 3D y su correspondiente en 2D. Las imágenes en 2D son a color y tienen una resolución de 640x480 píxeles, las imágenes fueron obtenidas con pequeños cambios en la iluminación. La segunda colección cuenta con 464 imágenes correspondientes a 112 personas, capturadas en el 2002. Para estos datos es necesario tramitar el permiso correspondiente para su uso.



Figura 4. Ejemplos de imágenes del conjunto de datos ND-Collection J2 de la University of Notre Dame(2007).

2.4 USTB

Este *Dataset* pertenece a la *University of Science & Technology Beijing* contiene 1600 imágenes a color con una resolución de 768x576 píxeles. Las imágenes son de 79 personas cada una con 18 imágenes donde se toma el perfil de la persona desde diferentes ángulos, por lo que se considera son diferentes grupos Beijing (2002).



Figura 4. Ejemplos de imágenes del conjunto de datos USTB de la University of Science & Technology Beijing (2002).

2.5 AWE

Este *Dataset* fue creado por la *University of Liubliana,* se creó con imágenes de internet, dichas imágenes de orejas fueron tomadas en “entornos salvajes” o no controlados y presentan variaciones en rotación e iluminación. La resolución varia, siendo 15x29 píxeles la más pequeña y 473x1022 píxeles la más grande (Ljubljana, 2017).



Figura 5. Ejemplos de imágenes del conjunto de datos AWE de Ljubljana(2017.).

2.6 UERC

Unconstrained Ear Recognition Challenge 2019 Dataset fue creado por la *University of Liubliana* (2017), está formado por dos conjuntos de imágenes uno para entrenamiento que cuenta con 2034 imágenes de 166 personas y uno de prueba que cuenta con 9500 imágenes de 3540 personas, en ambientes no controlados. El objetivo de esta base de datos es que sirva para

evaluar el rendimiento de las técnicas de reconocimiento con cambios en la escala, diferentes puntos de vista, en la rotación, oclusiones, resolución en la imagen y con diferentes etnias.

3. ENFOQUES DE DESARROLLO

En el estado del arte se pueden encontrar dos enfoques para llevar a cabo el desarrollo de un sistema de identificación de personas a través de la oreja. El tradicional plantea el contar con las distintas etapas que conforman un sistema de visión artificial. Es decir, a) después de adquirir la imagen, b) es necesario aplicarle alguna técnica de procesamiento para mejorar las condiciones iniciales de la misma, de tal forma que las siguientes etapas cuenten con una imagen de mejor calidad o solamente con la información necesaria. c) Posteriormente, es necesario localizar en la imagen la oreja y las partes de la misma; este proceso de segmentación debe ser eficiente ya que la imagen resultante es la base para la siguiente etapa. d) La descripción de la oreja mediante distancias u otras variables, permitirá contar con la información suficiente para la última etapa. e) En la clasificación, un algoritmo de aprendizaje supervisado obtendrá el modelo que permitirá llevar a cabo la identificación de las personas.

El segundo enfoque encontrado en la literatura del área es la aplicación de técnicas de aprendizaje profundo. Este enfoque es relativamente nuevo, no requiere el procesamiento separado de las etapas como el anterior y los resultados son excelentes. El problema principal es el contar con una gran cantidad de imágenes para ingresar a dichas redes y cuenten con la información y diversidad suficiente que requieren sus procesos.

4. ENFOQUE TRADICIONAL

4.1 Procesamiento de imágenes

Las principales técnicas aplicadas en esta etapa son para transformar el espacio de color original de la imagen, pasándola de color a niveles de gris Boodoo y Bai(2013), Anwar et al., (2016), Ghoualmi et al., (2015) y Ghoualmi et al., (2016) .Si se desea trabajar con características geométricas de la oreja, para así poder calcular relaciones entre ciertos puntos, que puedan ser utilizadas para el reconocimiento, normalmente sólo se considera el uso de bordes que se obtienen mediante el algoritmo canny Omara et al., (2016), Annapurani et al., (2015), Anwar et al., (2015) y Anwar et al., (2016).

4.2 Localización de la oreja en la imagen

La detección de la oreja en la mayoría de los trabajos utiliza *datasets* que contienen imágenes sólo de la oreja como el IIT Delhi o el AMI por lo que pasan a localizar las partes de la oreja considerados. Otra forma de localizar la oreja es realizar un recorte manual como en Ali et al. (2007), otros como Omara et al., (2016) y Anwaret al. (2016) utilizan el método de detención de bordes mediante *Canny* para obtener el borde del hélix y del lóbulo y así dibujar un rectángulo; las técnicas que utilizan imágenes en 3D como Liu et al. (2015), Ganapathi & Prakash (2018), no requieren detectar la oreja ya que generalmente obtienen una nube de puntos en la cual se puede obtener su ubicación.

4.2 Descripción de la oreja

La descripción de la oreja se puede realizar en términos de características geométricas o locales. En este caso se necesita contar con la localización de puntos de interés definidos y la relación que existe entre ellos. En Ghoualmi et al. (2016), Ganapathi & Prakash, (2018) y Ghoualmi et al. (2015) obtiene puntos característicos mediante las trasformada SIFT o ASIFT la ventaja que tienen estas técnicas es que son invariantes a la escala, rotación, traslación y perspectiva Otro descriptor de múltiple puntos es el descriptor ponderado (WMKK-SRC, por sus siglas en inglés) Chen & Mu (2016).

La textura es otra característica global que se ha utilizado para describir la oreja. Un método de descripción usualmente usado en el rostro y que ha tenido buenos resultados con la oreja es el algoritmo de *Local Binary Patterns* (LBP) sólo o en combinación con otros métodos como puede verse en Omara et al., (2016) y Benzaoui et al., (2017). Otras técnicas que proporcionan información sobre la textura y que han sido aplicadas en estos sistemas son las wavelets haar Ali et al., (2007) y Filtros Gabor Ghoualmi et al., (2015).

4.3 Algoritmos de clasificación

Las características de la oreja obtenida son la entrada para el algoritmo de clasificación. Aquellos sistemas que utilizan descriptores geométricos con características locales suelen usar algoritmos sencillos como la distancia euclidiana para medir la diferencia entre la imagen de entrada y los modelos almacenados para así poder determinar si la persona está o no registrada en el sistema.

Uno de los algoritmos de clasificación más utilizados es máquinas de vector soporte como en Omara et al., (2018) y sus variantes como *Pairwise SVM.* Este método tiene varias ventajas entre las que sobresalen que permite clasificar múltiples clases y realiza predicciones rápidas y precisas cuando el margen de separación entre los conjuntos está definido. El problema principal de este algoritmo es el seleccionar el kernel adecuado a los datos.

5. ENFOQUE CON APRENDIZAJE PROFUNDO

EL aprendizaje profundo es una subárea del aprendizaje de máquinas o *machine learning*, que trata del uso de un cierto tipo de redes neuronales para realizar el reconocimiento, en este caso de identificar a personas a través del análisis de imágenes de la oreja.

En los artículos Omara et al., (2018), Dodge et al., (2018) y Eyiokur et al., (2018) han aplicado redes neuronales convolucionales de diferentes tipos como CNN, DNN y MNN, para hacer reconocimiento. Entre los modelos de redes más conocidos se encuentran AlexNet y GoogLeNet, ResNet, VGG-16 y 19 Dodge et al., (2018) y Eyiokur et al., (2018).Sin embargo, como ya se mencionó, es necesario contar con grandes cantidades de información para que el aprendizaje lo realicen de manera correcta, por lo que, algunos reportes mencionan, como Dodge et al., (2018) que realizan aumento de datos, para poder entrenar correctamente. Es importante mencionar que el enfoque de las redes neuronales como (Omara et al., (2018), Dodge et al., (2018) y Eyiokur et al., (2018) tampoco lo necesita. Los resultados obtenidos con imágenes adquiridas en un ambiente controlado son excelentes, arriba del 99%, no obstante, en condiciones reales el rendimiento baja casi al 55 %.

6. SISTEMAS COMERCIALES

Existen sistemas comerciales que utilizan la oreja para identificar a la persona. En este caso, HELIX™ (Biometrics, n.d.-b) es una aplicación de seguridad para dispositivos Android que permite desbloquear el celular mediante un sistema de detección de orejas usando la cámara frontal del dispositivo, la aplicación permite crear un perfil con múltiples escaneos de la oreja. Además, permite aumentar o disminuir entre diferentes niveles de seguridad.

ERGO™ y ERGO™ SDK (Biometrics, n.d.-a), es un kit de desarrollo de software para biometría de la oreja utilizando el sensor táctil del teléfono móvil, y otros sensores del mismo. ERGO es un sistema robusto y confiable para de biometría de la oreja para dispositivos Android, entre sus características están: el perfil del individuo es guardado en el teléfono móvil y no en una base de datos en línea, permite adaptar el nivel de seguridad. Además de esto, el sistema mejora con el tiempo; es decir, entre más se usa mejor es el reconocimiento.

7. CONCLUSIONES

Se han desarrollado bastantes sistemas de seguridad que utilizan el rostro para realizar la identificación de la persona; no obstante, a pesar de los grandes avances que se tienen, el rostro de una persona cambia con el maquillaje, edad, cambios de estado de ánimo y/o marcas en el rostro como cicatrices o quemaduras. Sin embargo, la oreja tiene la característica de permanecer invariante a la influencia de factores como los antes mencionados para el rostro, obteniendo excelentes resultados.

En la mayoría de los trabajos analizados en el estado del arte, se muestra el uso de diferentes enfoques para el desarrollo de sistemas, los cuáles reportan resultados (generalmente) mayores al 90%. No obstante, la mayoría de estos trabajos son utilizados con conjuntos de datos en ambientes controlados, cuyas imágenes sólo contienen como objeto a la oreja en condiciones de captura “ideales” tales como buena resolución, iluminación controlada, con un tamaño normalizado, sin oclusión, etc.

El desarrollar un sistema de visión artificial que realice el reconocimiento de personas mediante imágenes de la oreja en ambientes no controlados daría apoyaría a los actuales sistemas de identificación en los cuales sólo se tiene una vista lateral de las personas. El contar con este sistema puede ayudar, principalmente, a las áreas de video vigilancia, seguridad y medicina forense.

REFERENCIAS

Akin, C., Kacar, U., & Kirci, M. (2018). A Multi-Biometrics for Twins Identification Based Speech and Ear. *Arxiv.Org*, (April). Retrieved from https://arxiv.org/abs/1801.09056%0Ahttp://arxiv.org/abs/1801.09056

Ali, M., Javed, M. Y., & Basit, A. (2007). Ear Recognition Using Wavelets. *Image and Vision Computing New Zealand 2007*, (January 2007), 83–86.

Annapurani, K., Sadiq, M. A. K., & Malathy, C. (2015). Fusion of shape of the ear and tragus - A unique feature extraction method for ear authentication system. *Expert Systems with Applications*, *42*(1). https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.08.009

Anwar, A. S., Ghany, K. K. A., & Elmahdy, H. (2015). Human Ear Recognition Using Geometrical Features Extraction. *Procedia Computer Science*, *65*(Iccmit), 529–537. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.09.126

Anwar, A. S., Ghany, K. K. A., & Elmahdy, H. (2016). Human ear recognition using SIFT features. *Proceedings of 2015 IEEE World Conference on Complex Systems, WCCS 2015*, 1–6. https://doi.org/10.1109/ICoCS.2015.7483254

Beijing, U. of S. & T. (2002). USTB ear image database. Retrieved from http://www1.ustb.edu.cn/resb/en/index.htm

Benzaoui, A., Adjabi, I., & Boukrouche, A. (2017). Person identification based on ear morphology. *ICAASE 2016 - Proceedings of the International Conference on Advanced Aspects of Software Engineering*. https://doi.org/10.1109/ICAASE.2016.7843851

Biometrics, D. (n.d.-a). ERGO™. Retrieved from http://www.descartesbiometrics.com/ergo-app/

Biometrics, D. (n.d.-b). HELIX™. Retrieved from

http://www.descartesbiometrics.com/helix-app/

Boodoo-Jahangeer, N. B., & Baichoo, S. (2013). LBP-based ear recognition. *13th IEEE International Conference on BioInformatics and BioEngineering, IEEE BIBE 2013*, 1–4. https://doi.org/10.1109/BIBE.2013.6701687

Chen, L., & Mu, Z. (2016). Partial Data Ear Recognition from One Sample per Person. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, *46*(6), 799–809. https://doi.org/10.1109/THMS.2016.2598763

Curiel López De Arcaute, A. M., & Granell Navarro, J. (2006). La huella de oreja como método de identificación. *Acta Otorrinolaringologica Espanola*, *57*(7), 329–332.

Dame, U. of N. (2007). ND-Collection J2. Retrieved from https://cvrl.nd.edu/projects/data/

Dodge, S., Mounsef, J., & Karam, L. (2018). Unconstrained ear recognition using deep neural networks. *IET Biometrics*, *7*(3), 207–214. https://doi.org/10.1049/iet-bmt.2017.0208

Emeršič, Ž., Štruc, V., & Peer, P. (2017). Ear recognition: More than a survey. *Neurocomputing*, *255*, 26–39. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.08.139

Esther Gonzalez, L. A. and L. M. (2008). AMI Ear Database. Retrieved from http://ctim.ulpgc.es/research_works/ami_ear_database/

Eyiokur, F. I., Yaman, D., & Ekenel, H. K. (2018). Domain adaptation for ear recognition using deep convolutional neural networks. *IET Biometrics*, *7*(3), 199–206. https://doi.org/10.1049/iet-bmt.2017.0209

Ganapathi, I. I., & Prakash, S. (2018). 3D ear recognition using global and local features. *IET Biometrics*, *7*(3), 232–241. https://doi.org/10.1049/iet-bmt.2017.0212

Ghoualmi, L., Draa, A., & Chikhi, S. (2015). An efficient feature selection scheme based on genetic algorithm for ear biometrics authentication. *12th International Symposium on Programming and Systems, ISPS 2015*, 234–238. https://doi.org/10.1109/ISPS.2015.7244991

Ghoualmi, L., Draa, A., & Chikhi, S. (2016). An ear biometric system based on artificial bees and the scale invariant feature transform. *Expert Systems with Applications*, *57*, 49–61. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.03.004

Indian Institute of Technology Delhi. (2006). IIT Delhi Ear Database. Retrieved from https://www4.comp.polyu.edu.hk/~csajaykr/IITD/Database_Ear.htm

Kamatchi, G. S., & Gnanajeyaraman, R. (2014). Ear as a raised area for hottest biometric solution using universality, distinctiveness, permanence and measurability properties-PURS Using UDPM. *Proceedings - 2014 World Congress on Computing and Communication Technologies, WCCCT 2014*, 39–43. https://doi.org/10.1109/WCCCT.2014.57

Liu, Y., Zhang, B., & Zhang, D. (2015). Ear-parotic face angle: A unique feature for 3D ear recognition. *Pattern Recognition Letters*, *53*, 9–15. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2014.10.014

Ljubljana, U. of. (2017). *UERC*. Retrieved from http://awe.fri.uni-lj.si/uerc

Omara, I., Li, F., Zhang, H., & Zuo, W. (2016). A novel geometric feature extraction method for ear recognition. *Expert Systems with Applications*, *65*, 127–135. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.08.035

Omara, I., Wu, X., Zhang, H., Du, Y., & Zuo, W. (2018). Learning pairwise SVM on hierarchical deep features for ear recognition. *IET Biometrics*, *7*(6), 557–566. https://doi.org/10.1049/iet-bmt.2017.0087

Modelo ab initio para reconstrucción de tiempos de respuesta en procesos con alta prioridad en una SBC con RT-Linux

J.L. Cano [*,†] **D.L. González** [**,†] **P. Guevara** [***,†]
L. Hernández [****,†]

[*] *lucskyr@gmail.com*
[**] *glez_lizet@hotmail.com*
[***] *pguevara@ipn.mx*
[****] *bilbito_98@yahoo.com*
[†] *Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME Culhuacan, CDMX.*

Resumen: En este trabajo se hace una propuesta de modelo ab initio para reconstrucción de tiempos de respuesta, donde se establece que está enfocado a procesos con alta prioridad en un sistema operativo RT-Linux y una SBC por sus siglas en inglés (Single Board Computer), Raspberry Pi 3. El proceso utilizado como objeto de prueba se basa en la inversión de matrices por el método de Gauss-Jordan con dimensión de matriz de 128x128, se caracteriza en primer y segundo momento de probabilidad permitiendo proponer un modelo básico que aproxime la respuesta en el comportamiento del sistema.

Palabras Clave: Modelo ab initio, tiempos de respuesta, RT-Linux, inversión de matrices, SBC.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos en sistemas de computación de tiempo real generan tiempos de respuesta dependiendo de los recursos de hardware, software y de la complejidad de un algoritmo. De acuerdo a Gonzalez (2018), el tiempo de respuesta es el tiempo en que el procesador se ocupa de atender a una instancia con índice k de una tarea, considerando g desalojos por tareas de mayor prioridad, tiempo de operación del planificador, tiempo de inicio y tiempo de finalizado. Expresado en la ecuación 1

$$r(k) = c(k) + o(k) + p(g, k) \quad (1)$$

Con base en el estado del arte, en la mayoría de los trabajos no se consideran los tiempos de operación del planificador, suspensiones o desalojos por instancias de alta prioridad; con respecto a la dinámica de los tiempos de respuesta, solo se encontró que se busca reducir la latencia asociada a la demora de la respuesta, pero no se presenta ningún modelo. Entonces la problemática es: ¿Cómo medir el desempeño, velocidad y la confiabilidad de un sistema de tiempo real, implementado en una computadora de placa reducida con RT-Linux?, una respuesta a esta cuestión es a través de la caracterización de sus tiempos de respuesta y su modelado para reconstruir su dinámica.

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

2. TRABAJO RELACIONADO

En Liu and Layland (1973) se presentan algunos de los problemas de la multiprogramación en ambientes de tiempo real crítico, basándose en procesos de control y supervisión y considerando un algoritmo de planificación por prioridades para tareas periódicas; algunas consideraciones importantes para su estudio son no dependencia entre tareas, uso de un planificador con prioridades estáticas y ejecución de m tareas. En ese trabajo por primera vez se asocia un tiempo de ejecución C_k asociado a un periodo T_k y el cálculo de un uso de CPU U. Aún no se trata el concepto de tiempo de respuesta, pero se observa que los tiempos de ejecución tienen una dinámica ya que pueden incrementarse de acuerdo a los desalojos por acción del planificador, tomándose como la condición mas importante que $C_k < T_k$ para considerarse parte de un sistema de tiempo real crítico.

En Medel et al. (2007) se presenta un modelo dinámico estocástico para tiempos de ejecución pero no considera los desalojos ni tiempos de operación de las instancias, por lo tanto no es funcional para tiempos de respuesta, pero la propuesta que hacen los autores sirvió de inspiración para el desarrollo de este trabajo.

En Bini et al. (2008) se presenta un modelo de tarea esporádica i considerando a R_i como su peor tiempo de respuesta, tal que $R_i = [max]_{(k=1,2,...)} X(i-1)(k(C_i) - (k-1)T_i$. Donde X_i es el instante de tiempo más pequeño

tal que existe un tiempo de ejecución C_i donde el procesador no ejecuta ninguna tarea y T_i es el periodo de ejecución, este modelo basado en RapidRT, es un acercamiento estadístico al peor tiempo de respuesta, WCRT por sus siglas en inglés. De igual manera, en Lu et al. (2012), se presenta un análisis estadístico sobre el tiempo de respuesta para sistemas de tiempo real embebidos.

En Leinbaugh (1980), se propone un modelo de programa de tiempo real que toma en cuenta diversas consideraciones para un sistema de tiempo real formado por un conjunto conocido de tareas: 1) Cada tarea está formada por series de segmentos que se ejecutan en orden, uno a la vez, 2) las tareas pueden usar dispositivos, 3) las tareas pueden tener secciones críticas para usar áreas de datos o dispositivos durante un segmento, 4) una tarea puede ser iniciada o reiniciada por señales externas o por la terminación de una tarea y 5) Cada tarea debe completarse garantizando su tiempo de respuesta. Estas condiciones son importantes ya que dan las bases para caracterizar los tiempos de respuesta desde un punto de vista cualitativo.

Los autores de Joseph and Pandya (1986), describen cómo encontrar los peores tiempos de respuesta de un sistema en tiempo real, discuten el uso de múltiples procesadores para un sistema en tiempo real y toman en cuenta situaciones donde se proponen soluciones para sistemas computacionalmente enlazados. Afirman que el tiempo de respuesta es la suma de los requerimientos computacionales de todas las entradas de alto nivel que ocurren en el intervalo $[0, RT_i)$ más el tiempo de ejecución C_i.

En Sjodin and Hansson (1998), los autores refieren que el análisis de planificabilidad con prioridades fijas puede llevarse a cabo a través del cálculo de los tiempos de respuesta de los procesos involucrados. El sistema es planificable si el tiempo de respuesta calculado por cada proceso es menor a su plazo; por ello es importante el análisis de tiempos de respuesta, donde el objetivo es disminuir su magnitud.

En Redell and Sanfridson (2002), se presenta una solución para el cálculo exacto del mejor caso de tiempos de respuesta para tareas periódicas con prioridades fijas; su solución se basa en identificar el mejor caso de la fase y la tarea de menor prioridad comparándola con las tareas de prioridades altas. Caracterizan la dualidad entre mejor caso y peor caso de tiempos de respuesta y analizan la respuesta del jitter.

En Lu et al. (2010) y Lu et al. (2012) se dice que el análisis de tiempos de respuesta debe hacerse con un enfoque estadístico (no es suficiente un enfoque determinístico) para calcular los peores tiempos de respuesta.

Después de analizar la serie de trabajos relacionados, se puede observar que la mayoría de la investigación enfocada en tiempos de respuesta es obsoleta y hay pocos artículos recientemente. Por otro lado, es notable que los trabajos son parcialmente teóricos, pues no presentan un banco de pruebas y no se muestra qué técnicas de medición fueron utilizadas para evaluar los tiempos de respuesta. Un acercamiento previo de los autores se realizó en Gonzalez et al. (2018); aunque en este trabajo solo se estudiaron los tiempos de ejecución, se presentó una propuesta de caracterización estadística que se ocupó en este trabajo para los tiempos de respuesta.

3. DESARROLLO

3.1 Banco de pruebas

Este trabajo se sustenta mediante un banco de pruebas que esta constituido como se muestra en la figura 1. La medición del tiempo de respuesta en una SBC se realiza usando la función `clockgettime()` donde el proceso objeto de prueba genera carga computacional temporal basándose en la inversión de matrices con dimensión de 128x128 por el método de Gauss-Jordan. Además, se utiliza el planificador Round Robin y la prioridad de tiempo real ya que se observó en análisis experimentales previos, que los tiempos de respuesta tenían menores fluctuaciones y el proceso no era desalojado. Se obtuvieron un conjunto de mil muestras correspondientes a las instancias del proceso, con ello es posible conocer el comportamiento del sistema de acuerdo a su caracterización, cumpliendo el objetivo de modelar y reconstruir el sistema con una propuesta de un modelo ab initio.

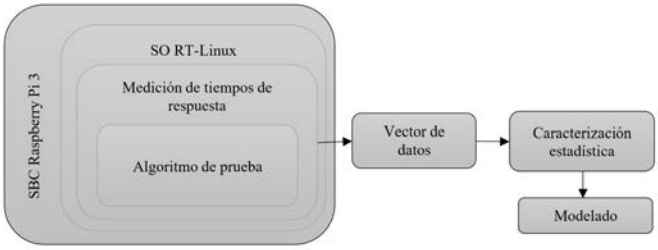


Fig. 1. Esquema del banco de pruebas para desarrollo de los experimentos y medición de tiempos de respuesta.

3.2 Caracterización

El análisis estadístico de los Tiempos de Respuesta tiene suma importancia en este trabajo, ya que, mediante la caracterización de los mismos se puede conocer su dinámica bajo diferentes condiciones de operación, esto consiste esencialmente en calcular los momentos de probabilidad que describan su comportamiento, es decir, se calcula media y varianza recursiva, esto se realiza fuera de línea con los vectores obtenidos de cada experimento, donde se efectúa el cálculo de los dos primeros momentos de probabilidad, descritos en las ecuaciones 3 y 5, respectivamente.

$$\mu(r(k)) = \frac{1}{k}\sum_{k=1}^{k}(r(k)) \tag{2}$$

$$\mu\left(r(k)\right) = \frac{(k-1)\,\mu\left(r(k-1)\right) + r(k)}{k} \tag{3}$$

$$\sigma^2(r(k)) = \frac{1}{k}\sum_{k=1}^{k}\left(r(k) - \mu(r(k))\right) \tag{4}$$

$$\sigma^2(r(k)) = \frac{(k-1)\,\sigma^2\left(r(k-1)\right) + \left(r(k) - \mu(r(k))\right)^2}{k} \tag{5}$$

3.3 Modelado

De acuerdo a la caracterización de la dinámica de los tiempos de respuesta, se tiene que es un sistema lineal, estacionario e invariante en el tiempo. Por ello se propone el siguiente modelo básico para tiempos de respuesta tipo SISO, lineal y de primer orden, presentado en la figura 2 y descrito en la ecuación (6).

$$r(k) = ar(k-1) + w(k) \tag{6}$$

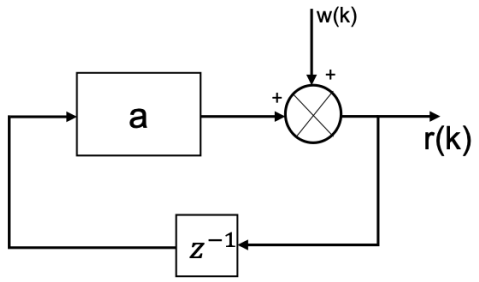


Fig. 2. Diagrama a bloques del modelo lineal de primer orden propuesto de acuerdo a la ecuacion 6

Considerando que el sistema es lineal, estacionario y de primer orden, se construye un estimador de parámetros basado en el cociente de esperanzas matemáticas, para tal efecto, se aplica la esperanza matemática a la igualdad de la ecuación (6):

$$E\{r(k)\} = aE\{r(k-1) + w(k)\} \tag{7}$$

Se procede a despejar el parámetro a de la ecuación (7):

$$\widehat{a} = \frac{E\{r(k-1) + w(k)\}}{E\{r(k-1)\}} \tag{8}$$

Con el procedimiento anterior, se tiene el modelo básico para reconstrucción de tiempos de respuesta:

$$\widehat{r}(k) = \widehat{a}\widehat{r}(k-1) + w(k) \tag{9}$$

Para validar el modelo de reconstrucción, se calcula el error de reconstrucción mediante la siguiente ecuación:

$$e(k) = \widehat{r}(k) - r(k) \tag{10}$$

Finalmente, se calcula el error de convergencia del modelo propuesto, calculado a través de la ecuación (11):

$$J(k) = E\{e(k)^2\} \tag{11}$$

En la Tabla 1 se muestra una lista de variables utilizadas en este trabajo.

Tabla 1. Descripción de variables

Variable	Descripción	Unidades
Tiempo de respuesta	$r(k)$	Unidades Temporales
Tiempo de respuesta en un intervalo anterior	$r(k-1)$	Unidades Temporales
Ruido externo	$w(k)$	Unidades Temporales
Parámetro del sistema	a	Adimensional
Media aritmética de $r(k)$	$\mu(r(k))$	Unidades Temporales
Varianza de $r(k)$	$\sigma^2(r(k))$	Unidades Temporales^2
Esperanza matemática de $r(k)$	$E(r(k))$	Unidades Temporales
Parámetro estimado	$\widehat{a}$	Adimensional
Tiempo de respuesta reconstruido	$\widehat{r}(k)$	Unidades Temporales
Error de reconstrucción	$e(k)$	Unidades Temporales
Error cuadrático medio	$J(k)$	Unidades Temporales^2

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para los resultados, se presentan gráficas que ilustran los tiempos de respuesta medidos con el experimento más significativo en este trabajo con 1000 instancias, para caracterizarlo se grafican sus primeros momentos de probabilidad. En la figura 3, se muestran los tiempos de respuesta en un espacio estadístico para inversión de matrices con dimensión de 128x128, se observa que los tiempos oscilan entre 268.2ms y 268.4ms, su media recursiva tiene un comportamiento fluctuante durante las primeras 100 instancias, pero en el progreso del experimento tiende a mantenerse constante.

En la misma gráfica, se muestran superpuestas la desviación estándar superior e inferior, donde se representa una región acotada de la mayor concentración de tiempos de respuesta, en la cota superior el tiempo es alrededor de 268.34ms y la cota inferior aproximadamente 268.24ms. En la varianza recursiva localizada en la parte inferior de la figura se observan fluctuaciones en las primeras 400 instancias, pero durante la evolución del experimento se mantiene casi constante en un valor aproximado de 2.4x10-3 ms^2.

En la figura 4, se muestra la gráfica de los tiempos de respuesta normalizados para definir un espacio de probabilidad, considerando su medida máxima 1, se observa también su histograma y su función de densidad de probabilidad. Mediante la caracterización se puede visualizar que el comportamiento del sistema es estacionario, por lo tanto se procede a implementar el modelo propuesto.

En las figuras 5 y 6 se muestran los resultados del modelo de reconstrucción.

 ISSN en trámite

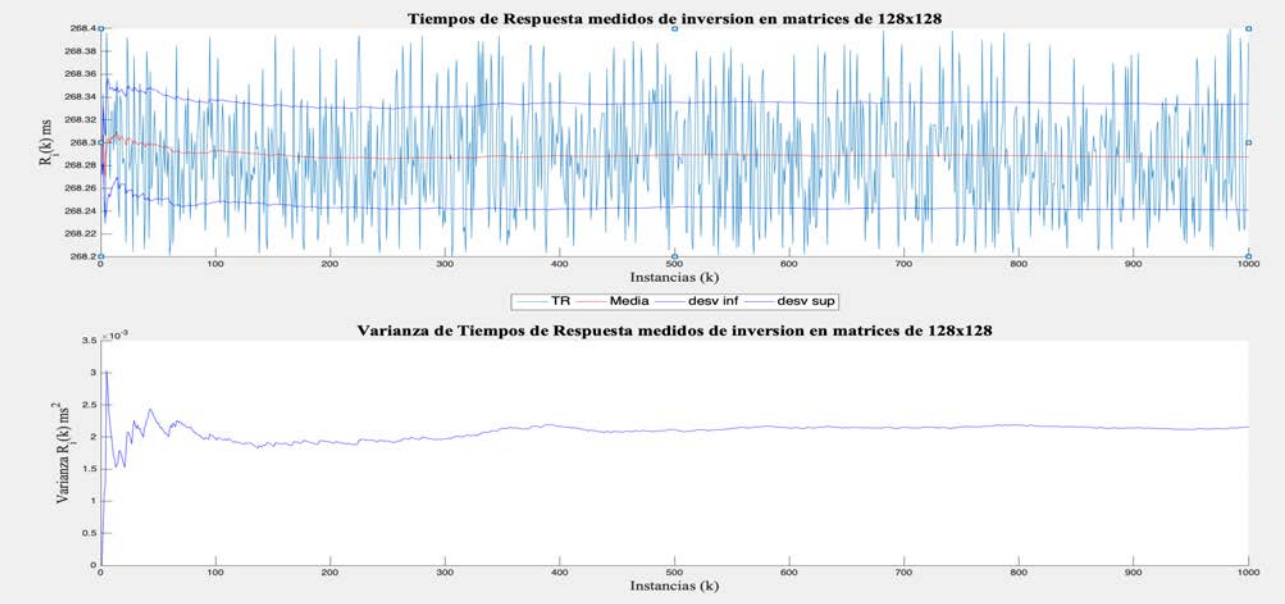


Fig. 3. Gráfica de tiempos de respuesta para inversión de matrices de 128x128 con media recursiva, desviación estándar superior e inferior y varianza recursiva D. Lizet Gonzalez (2019).

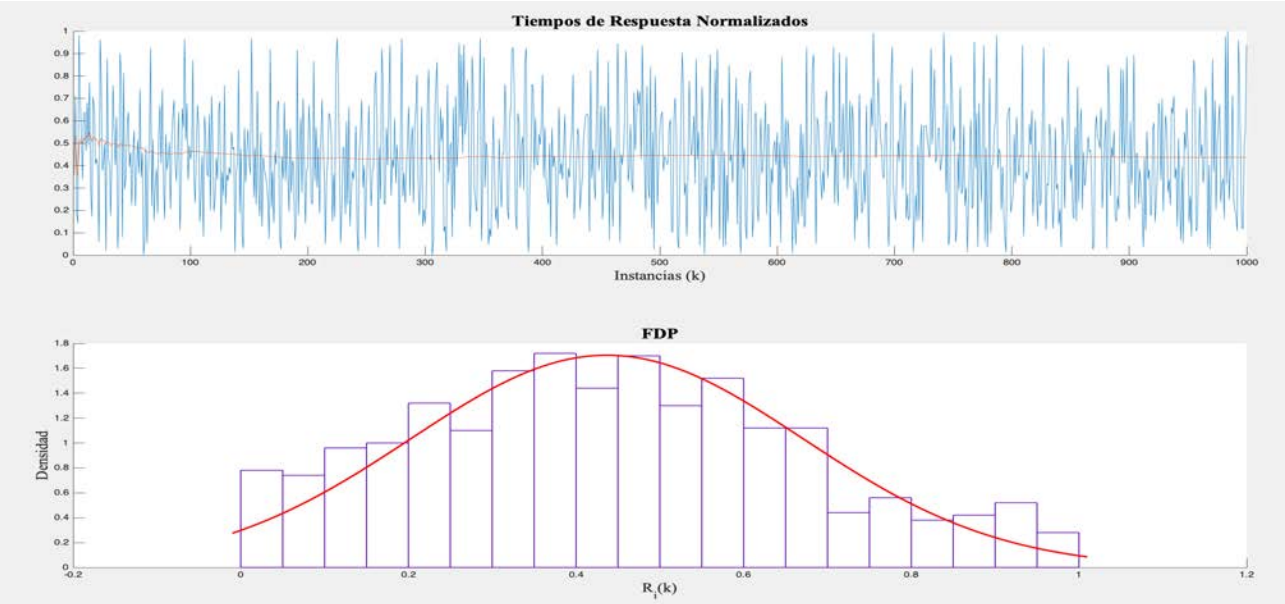


Fig. 4. Gráfica de tiempos de respuesta normalizados para inversión de matrices de 128x128 con su función de densidad de probabilidad D. Lizet Gonzalez (2019).

 ISSN en trámite

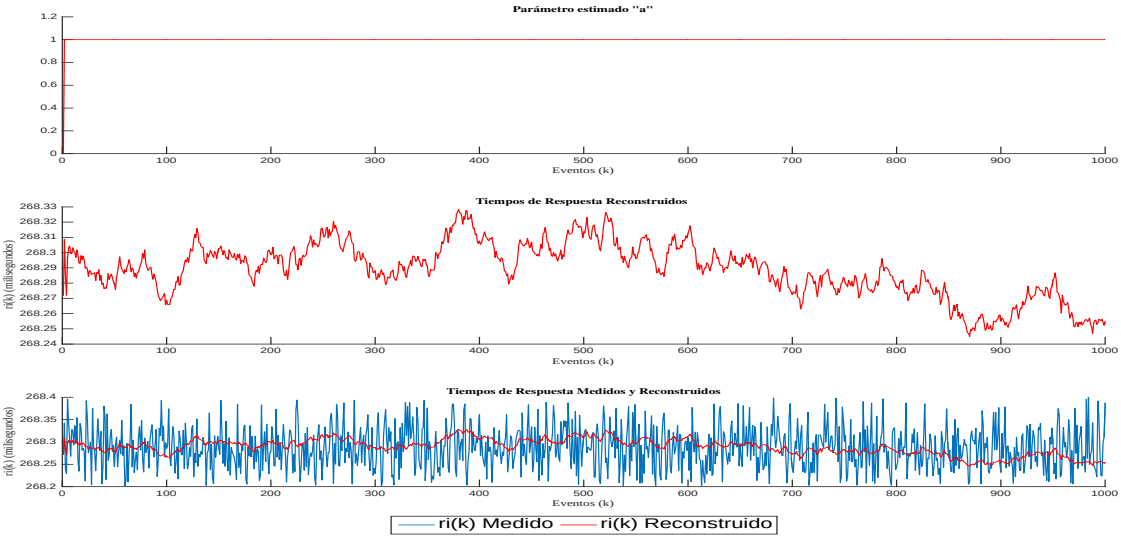


Fig. 5. Gráfica de parámetro estimado a, tiempos de respuesta reconstruidos $r(k)$ y gráfica comparativa de tiempos de respuesta medidos vs tiempos de respuesta reconstruidos, para inversión de matrices de 128x128.

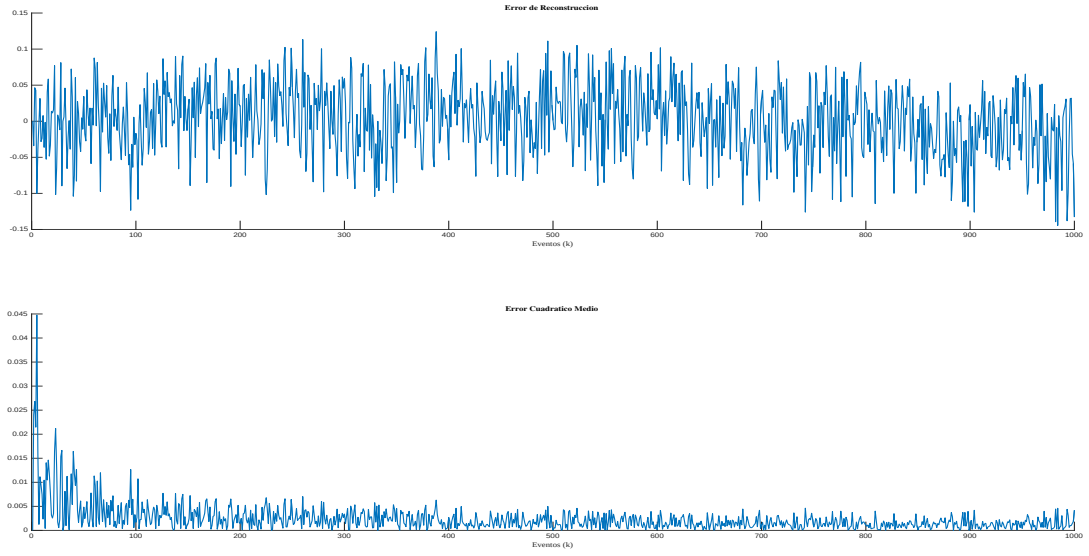


Fig. 6. Gráfica del error de reconstrucción y error cuadrático medio entre los tiempos de respuesta (medidos y reconstruidos), para el experimento de inversión de matrices de 128x128.

5. CONCLUSIONES

Las computadoras de placa reducida SBC actualmente han ganado terreno debido a su pequeño tamaño, bajo costo y capacidad de soportar una distribución completa de GNU/Linux, además de su capacidad para desarrollo de sistemas en tiempo real con implementación de parches como PREEMPT-RT. Esto motiva el desarrollo de este trabajo donde se observa que al ejecutar procesos de alta complejidad computacional temporal como la inversión de matrices por el método de Gauss-Jordan con alta prioridad y planificador Round-Robin, los tiempos de respuesta para n instancias tienen comportamiento estacionario en primer y segundo momentos de probabilidad, dando apertura para reconstruir su dinámica a través de una propuesta de modelo con una entrada y una salida, lineal, de primer orden y con un parámetro a invariante en el tiempo. La reconstrucción se lleva a cabo a partir de la estimación del parámetro a, basándose en el cociente de esperanzas matemáticas recursivas considerando únicamente el ruido externo al sistema.

En la etapa experimental, se observa que para experimentos con matrices de dimensión 128x128, los tiempos medidos varían entre 268.2ms y 268.4ms, mientras que su media recursiva varía durante las primeras 100 instancias; sin embargo, posterior a esto, la evolución del experimento tiende a mantenerse constante. También se observa que al considerarse un reconstructor ab initio, su nivel y velocidad de convergencia no son muy buenos, pudiendo mejorar si se toman en cuenta más aspectos en el modelo propuesto, como un estado interno del sistema, un ruido interno y un estimador basado en un segundo momento de probabilidad.

REFERENCIAS

Bini, E., Nguyen, T.H.C., Richard, P., and Baruah, S.K. (2008). A response-time bound in fixed-priority scheduling with arbitrary deadlines. *IEEE Transactions on Computers*, 58(2), 279–286.

D. Lizet Gonzalez, J. Luis Cano Rosas, C.E.M.P.G.L. (2019). Caracterización estadística de los tiempos de respuesta de un algoritmo complejo en rtlinux. *Congreso Internacional de Computación CICOM 2019*, 1(1).

Gonzalez, D.L. (2018). Análisis experimental de los tiempos de respuesta en rt-linux para una sbc. *TESIS IPN SEPI ESIME C. CDMX*, 1(1).

Gonzalez, D.L.B., Cano, J.L.R., and Guevara, P.L. (2018). Análisis comparativo de los tiempos de ejecución sobre sbc para dos sistemas operativos de tiempo real. *Pistas Educativas*, 39(128).

Joseph, M. and Pandya, P. (1986). Finding response times in a real-time system. *The Computer Journal*, 29(5), 390–395.

Leinbaugh, D.W. (1980). Guaranteed response times in a hard-real-time environment. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1(1), 85–91.

Liu, C.L. and Layland, J.W. (1973). Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment. *Journal of the ACM (JACM)*, 20(1), 46–61.

Lu, Y., Nolte, T., Bate, I., and Cucu-Grosjean, L. (2012). A statistical response-time analysis of real-time embedded systems. In *2012 IEEE 33rd Real-Time Systems Symposium*, 351–362. IEEE.

Lu, Y., Nolte, T., Kraft, J., and Norstrom, C. (2010). A statistical approach to response-time analysis of complex embedded real-time systems. In *2010 IEEE 16th international conference on embedded and real-time computing systems and applications*, 153–160. IEEE.

Medel, J.d.J., Guevara, P., and Cruz, D. (2007). Temas selectos de sistemas en tiempo real. *Tareas en Tiempo Real*, 1, 50–54.

Redell, O. and Sanfridson, M. (2002). Exact best-case response time analysis of fixed priority scheduled tasks. In *Proceedings 14th Euromicro Conference on Real-Time Systems. Euromicro RTS 2002*, 165–172. IEEE.

Sjodin, M. and Hansson, H. (1998). Improved response-time analysis calculations. In *Proceedings 19th IEEE Real-Time Systems Symposium (Cat. No. 98CB36279)*, 399–408. IEEE.

Un modelo de alfas de Essence para priorizar características del desarrollo de software mediante Mapas Cognitivos Difusos

Alfonso Bryant Cancino-Fuentes, Moisés González-García, Dante Mújica-Vargas, Joaquín Pérez-Ortega, René Santaolaya-Salgado

alfonsocancino16c@cenidet.tecnm.mx, moises.gg@cenidet.tecnm.mx, dante.mv@cenidet.tecnm.mx, joaquin.po@cenidet.tecnm.mx, rene.ss@cenidet.tecnm.mx
Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Cuernavaca, Morelos, México
(777)362 7770

Este estudio propone una metodología basada en los Mapas Cognitivos Difusos (MCD) para identificar, catalogar y priorizar (clasificar) las características principales de proyectos de software, de acuerdo con la experiencia de los equipos de desarrollo de software. El conjunto de características priorizadas son las del Marco de Características de Proyectos de Software Refinado, creado por el grupo de investigación del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Este marco se ajusta al estándar de Essence para crear el MCD, representado por un grafo difuso, utilizado para representar razonamiento causal. Explicitando los elementos consensuados por los miembros de un equipo de desarrollo de software, o los equipos de una empresa que desarrolla software. Se presenta un caso de estudio centrado en proyectos de software mediante un análisis estático de los pesos difusos del MCD.

Palabras clave: Mapas Cognitivos difusos, Essence, Características de proyectos de software, Conocimiento empírico, Representación del conocimiento

1. INTRODUCCIÓN

El Marco de Características de Proyectos de Software (MCPS) se propuso en [5], como una manera de estructurar la información recopilada durante el desarrollo de proyectos de software en una base de datos. [22] propuso la versión MCPS-R, refinando el MCPS, de manera que la versión refinada incluye 90 atributos presentes en los proyectos de software. Los atributos del marco se extrajeron considerando el contexto del método de Desarrollo Arquitectónico en Grupo (AGD), propuesto por [6, 7]. Los atributos del marco se estructuran jerárquicamente y se organizan siguiendo la estructura del conjunto productos (PS, *Products Set*) del método AGD.

El AGD organiza el conjunto de productos (PS) y de esta estructura de productos, se determinan las actividades a realizar, que se organizan como sub-procesos (también conocidos como fases de desarrollo), realizados por actores con roles definidos mediante responsabilidades. Los productos del conjunto PS se agrupan en el contexto de la MDA (Arquitectura Dirigida por Modelos), que propone varios modelos: el modelo CIM (Modelos Independientes de Computación); el modelo PIM (Modelo Independiente de Plataforma) y el modelo PSM (Modelo Específico de Plataforma), que se complementan en el AGD, con los modelos IM (Modelo de Implementación) y OM (Modelo Operacional).

La creación del MCPS-R permite plantear un posible diseño de una base de datos, capaz de almacenar la información recopilada durante el desarrollo de proyectos de software. Esto concuerda con los modelos orientados a la mejora de la calidad con base en el proceso, donde se propone usar bibliotecas de datos históricos. Que contienen información del proceso incluyendo documentación relativa, tal como procesos definidos, listas de comprobación, documentos de lecciones aprendidas, planes, productos de software, reportes, entre otros (características del MCPS-R). El CMMI (Modelo Integrado de Madurez de la Capacidad de desarrollo de software) lo denomina bibliotecas de datos históricos [4] y para MoProSoft (Modelo de Procesos para la Industria del Software) lo llama Biblioteca de Conocimientos [17].

Complementando al MCPS-R se consideró a Essence, del *Software Engineering Methods and Theory* (SEMAT), que establece el consenso de la ingeniería de software, incluyendo un conjunto de elementos comunes que sirven de referencia para relacionar y diferenciar métodos de desarrollo de software [10].

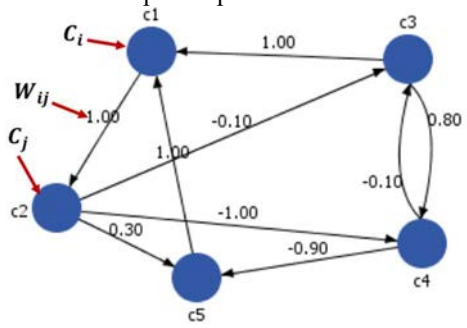
Los proyectos de software se desarrollan en un ambiente dinámico, y debido a la presencia de cambios en el dominio de las empresas y a una creciente evolución de la tecnología, entre otros factores, se dificulta la mejora del proceso de software [5] y la selección de la información a explotar puede determinar la estrategia de una organización o proyecto [21]. Para la selección de dicha información, de las bibliotecas de datos históricos, en

el estudio reportado en este artículo se propone utilizar el conocimiento empírico basado en las experiencias de los miembros del equipo de desarrollo de software (EDS), para ayudar a la consulta de información acerca del proyecto para mejorar la toma de decisiones acerca de la configuración del desarrollo.

En esta investigación se propone la utilización de Mapas Cognitivos Difusos (MCD) para el modelado de los atributos del MCPS-R y el uso de las alfas de Essence como conexiones causales entre las características del marco. A continuación, se presenta la revisión de la literatura, la metodología seguida, los resultados obtenidos en un caso de estudio y finalmente se abordan las conclusiones y trabajos futuros.

2. MAPAS COGNITIVOS DIFUSOS (MCD)

Los MCD se introdujeron en [11], mejorando los mapas cognitivos de [1], al describir la fortaleza de la relación entre conceptos mediante valores de lógica difusa en el intervalo [-1,1]. El MCD se representa mediante una estructura de grafo difuso utilizado para representar razonamiento causal.



$$\begin{bmatrix} & \boldsymbol{C1} & \boldsymbol{C2} & \boldsymbol{C3} & \boldsymbol{C4} & \boldsymbol{C5} \\ \boldsymbol{C1} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \boldsymbol{C2} & 0 & 0 & -0.1 & -1 & 0.3 \\ \boldsymbol{C3} & 1 & 0 & 0 & 0.8 & 0 \\ \boldsymbol{C4} & 0 & 0 & -0.1 & 0 & -0.9 \\ \boldsymbol{C5} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 1 Representación gráfica y matemática de un MCD

Los MCD no explotan las ventajas de la lógica difusa en el proceso de propagación de la información, más bien estos principios se usan durante la construcción del mapa. De esta forma los conceptos y relaciones del mapa se representan por variables difusas expresadas como términos lingüísticos. Más explícitamente, durante la etapa de ingeniería del conocimiento cada experto expresa la relación que existe entre cada par de conceptos C_i y C_j del mapa [15]. Es decir, el grado de causalidad entre conceptos, se determina con expresiones lingüísticas (muy fuerte, fuerte, medio, débil, muy débil), en rangos de [-1,1] o [0,1] [25]. Por ejemplo, los valores de causalidad pueden ser: muy fuerte = 1.00; fuerte = 0.75; medio = 0.50; débil = 0.25; y muy débil = 0. Cumpliendo con los rangos de [0,1].

El proceso de inferencia en un MCD se puede definir matemáticamente usando dos componentes [13, 15]:

- Un vector de estado A_{1xn} que representa el grado de activación de los conceptos del mapa, que incluye los valores de n conceptos.

Los MCD son modelos difusos con retroalimentación para representar causalidad [13]. Son recomendables en dominios donde los conceptos y las relaciones son difusos, como en la planificación estratégica [14], ya que ofrecen un marco de trabajo potente y flexible para representar el conocimiento humano [19].

Los nodos son conceptos causales y pueden modelar eventos, acciones, valores, metas o procesos [9]. En los MCD existen tres posibles tipos de relaciones causales (en la Figura 1 se representa la relación $\boldsymbol{W_{ij}}$ entre los conceptos $\boldsymbol{C_i}$ y $\boldsymbol{C_j}$) entre conceptos [15, 25]:

- $W_{ij} > 0$, indica una causalidad positiva entre los conceptos C_i y C_j
- $W_{ij} < 0$, indica una causalidad negativa entre los conceptos C_i y C_j
- $W_{ij} = 0$, indica la no existencia de relación entre C_i y C_j

- Una matriz de pesos causales W_{nxn} la cual define la interacción (pesos) entre los conceptos (W_{ij}).

Los estados del sistema se actualizan iterativamente, multiplicando la matriz de pesos del MCD por el vector de estado [12]. Por tanto, el valor de un concepto C_i está influenciado por los valores de los conceptos C_j conectados a él y los valores de sus relaciones causales W_{ji}. De acuerdo con el vector de estado, el mcd convergerá a un punto fijo, ciclo límite o atractor caótico. La influencia de los conceptos interconectados al concepto especifico se calcula de acuerdo con la siguiente regla de cálculo:

$$A_i^{(k+1)} = f\left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} W_{ji}^{(k)} \cdot A_j^{(k)}\right) \quad \textbf{(1)}$$

 ISSN en trámite

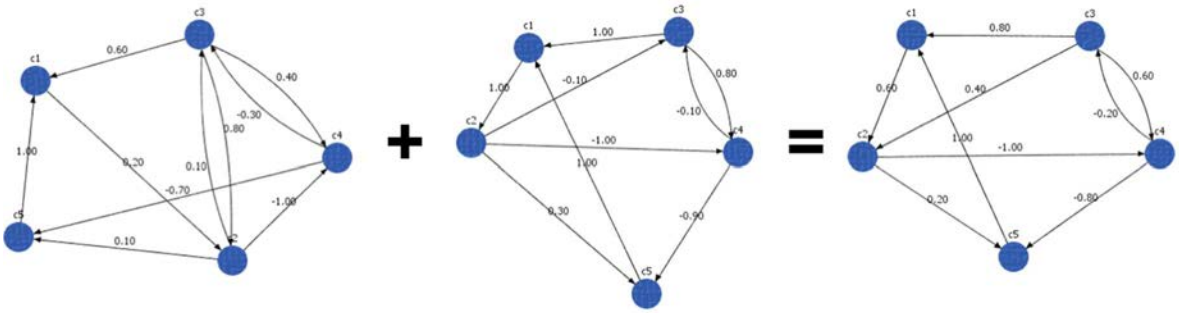


Figura 2 Ejemplo de agregación de dos MCD a través del operador promedio

Dónde:

- $A_i^{(k+1)}$ es el valor (nivel de activación) del concepto C_i en el tiempo de simulación $k+1$.
- W_{ji} es el peso (influencia causal) de la relación entre los conceptos C_j y C_i.
- $A_j^{(k)}$ es el valor del concepto C_j en el tiempo k.
- $f(x)$ es la función de activación. Para este caso de estudio se utilizará la función sigmoide (véase Ecuación 2), que se usa para parámetros que van en el rangos [0,1] [19, 27].

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad \textbf{(2)}$$

Además, se usa la posibilidad de agregar varios MCD en una sola estructura de conocimiento. Esta agregación representa una ventaja sobre usar redes Bayesianas y redes de Petri, que de igual manera son modelos basados en el conocimiento [20]. El número de expertos que pueden estar involucrados en modelar el mapa normalmente no tiene restricciones. Mientras más expertos se involucren, más fiabilidad tendrá el sistema resultante [12]. Cuando participan una cantidad de expertos (n), la matriz de adyacencia (W) se representa mediante la siguiente ecuación.

$$\overline{W} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} W_i \quad \textbf{(3)}$$

La agregación de conocimiento se logra usando la Ecuación 1 (véase Figura 2), que permite mejorar la fiabilidad del modelo final, que es menos susceptible a creencias potencialmente erróneas de un experto único [24].

Se considera que la media aritmética es sensible a la presencia de valores atípicos (por ejemplo, si un conjunto de datos incluye los valores: 0.25, 0.25 y -0.50; el valor medio es 0, por tanto, el valor de 100 provoca un punto extremo). Para resolver lo anterior, [2, 3] y minimizar el error, se utiliza el método Delphi, para estructurar el proceso de comunicación de un grupo de expertos para llegar a un consenso sobre un problema complejo.

3. ESSENCE

El estándar Essence generaliza la ingeniería de software, identificando acciones y elementos consensuados; que permiten evaluar, comparar y medir las prácticas comunes de métodos existentes (SCRUM, RUP, AGD, etc.), pues permite describirlos en un lenguaje sencillo y universal. Para dicha descripción se utiliza el núcleo del estándar, que contiene un pequeño número de "cosas con las que siempre se trabaja" (alfas, véase Figura 3), "cosas que siempre se hacen" (espacios de actividad) y "habilidades necesarias" (competencias), cuando se desarrollan sistemas de software [10].

Essence se organiza en tres áreas de interés que se centran en aspectos específicos de la ingeniería de software: clientes (color verde), esta área contiene todo lo relacionado con el uso real y la explotación del sistema de software que se va a producir; solución (amarillo), esta área contiene todo para hacer la especificación y el desarrollo del sistema de software; y el área esfuerzo (azul), que contiene todo lo relacionado con el equipo, y la forma en que se relacionan en el trabajo.

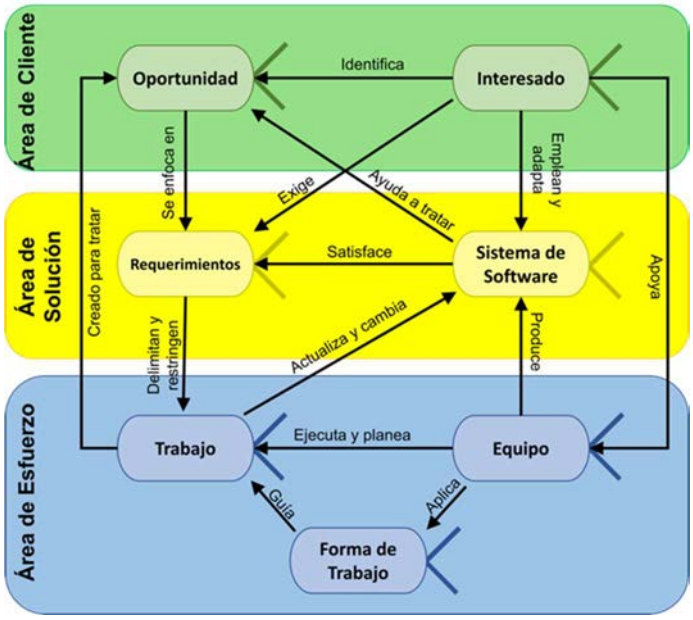


Figura 3 Relación entre los siete alfas.

Los elementos para la estandarización de la ingeniería de software mediante Essence se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción del núcleo de Essence.

Elemento	Descripción
Práctica	Es un grupo de elementos necesarios para expresar la guía de trabajo con un objetivo específico.
Alfa	Describe las cosas que el equipo debe administrar, producir y usar en el proceso de desarrollo, mantenimiento y soporte. Existen siete alfas: • Oportunidad. Son el conjunto de circunstancias adecuadas para desarrollar o modificar un sistema de software. • Interesado. Son las personas, grupos u organizaciones que afectan o se afectan con un sistema de software. Los interesados proporcionan la oportunidad y son la fuente de los requisitos y la financiación para el sistema de software. • Requerimientos. Es lo que el sistema de software debe hacer, para tratar la oportunidad y satisfacer a los interesados. • Sistema de software. Se compone de software, hardware y los datos que proporcionan el valor primario a la ejecución del software. • Trabajo. Es todo lo que hace el equipo para cumplir con las metas de producción de un sistema de software, que coincida con los requisitos. • Equipo. Es un grupo de personas que participa activamente en el desarrollo, mantenimiento y entrega de un sistema de software. • Forma de trabajo. Es el conjunto adaptado de prácticas y herramientas que utiliza un equipo, para orientar y apoyar su trabajo.
Estado del alfa	Son etapas descritas por una lista de verificación, en las que se determina la transición o avance de cada alfa.
Espacio de actividad	Representa las cosas esenciales que se deben hacer para desarrollar el software.
Activi-dad	Define uno o más tipos de producto de trabajo y de tarea, además de dar orientación sobre cómo utilizarlos en el contexto de una práctica.
Producto de trabajo	Es un artefacto de valor y relevancia para el esfuerzo de la ingeniería de software. Puede ser un documento, una parte de software, una prueba de software, etc.
Compe-tencias	Representa las habilidades clave que se requieren para el desarrollo de software. • Representación del interesado. Incluye la capacidad de recopilar, comunicar y balancear las necesidades de otras partes interesadas y representar con precisión sus puntos de vista. • Análisis. Incluye la capacidad de entender las oportunidades y las necesidades de sus interesados, para transformarlas en un conjunto de requisitos consistente. • Desarrollo. Incluye la capacidad de diseñar y programar sistemas de software de forma eficaz, siguiendo las reglas y normas que acuerda el equipo. • Pruebas. Incluyen la posibilidad de probar un sistema, para verificar que es usable y que cumple los requisitos. • Liderazgo. Permite a una persona inspirar y motivar a un grupo de personas, para lograr éxito en su trabajo y cumplir sus objetivos. • Gestión. Incluye la capacidad de coordinar, planificar y realizar un seguimiento del trabajo que realiza un equipo.

Para utilizar la representación Essence, se consideran los elementos del método AGD: los atributos del MCPS-R; las prácticas del método; las fases de desarrollo y las competencias de los roles. Para la representación se utiliza la notación gráfica de [18]. Con propósito demostrativo, se representa gráficamente una porción del método AGD (véase Figura 4). Que representa el proceso para cumplir la practica OM (Modelo Operacional) durante la fase de prueba del método AGD, donde se recomienda realizar la:

- actividad “probar el” “sistema de software” (alfa), realizando la tarea de “documentar la prueba de integración”;
- y la tarea “usar el sistema” por parte de los “interesados” (alfa), realizando la tarea de “documentar la prueba de aceptación”.

Ambas tareas son responsabilidad del administrador de implementación, que requiere tener el conocimiento para “desarrollar” (competencia) software.

 ISSN en trámite

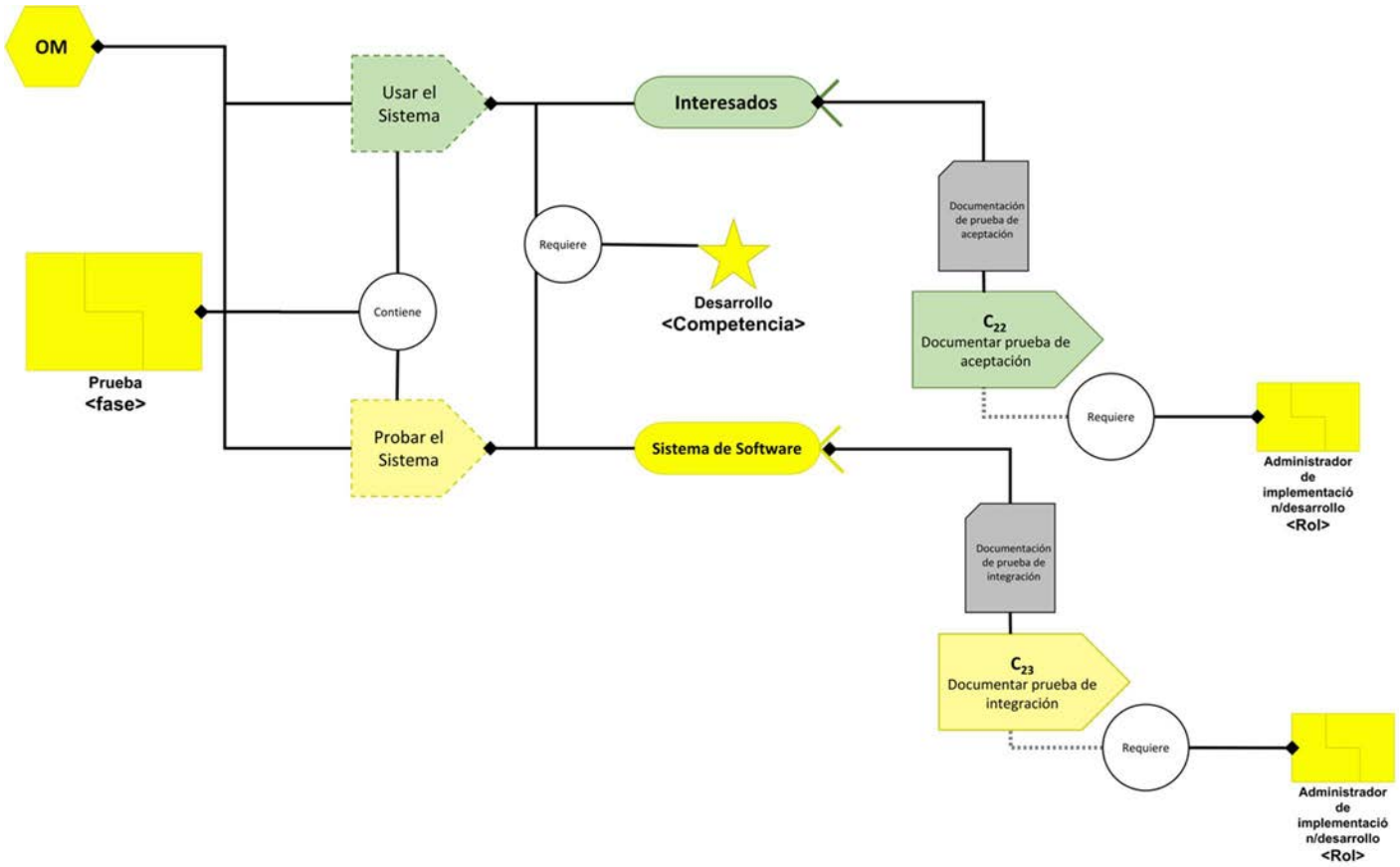


Figura 4 Porción del diagrama "**OM"** (Modelo Operacional) mediante la notación de Essence.

4. METODOLOGÍA

El objetivo de la metodología AGD-FCM, propuesta, es la obtención de un MCD que representen los conceptos del MCPS-R complementada con el estándar Essence, para integrar el conocimiento de los distintos expertos para la realización de análisis dinámicos y estáticos del mismo, como ayuda a la toma de decisiones. La metodología propuesta (Figura 5) consta de actividades que permiten priorizar (mediante valores numéricos) las características y determinar cuáles se consideran las principales.

5. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio lo trabajaron miembros del grupo de investigación del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Específicamente, desarrolladores de software perteneciente al área de investigación de Ingeniería de Software. El proceso de simulación y creación del MCD se realizó con el software Mental Modeler [8] con la matriz de adyacencia de la Tabla 2, obtenida al finalizar la recolección de los datos.

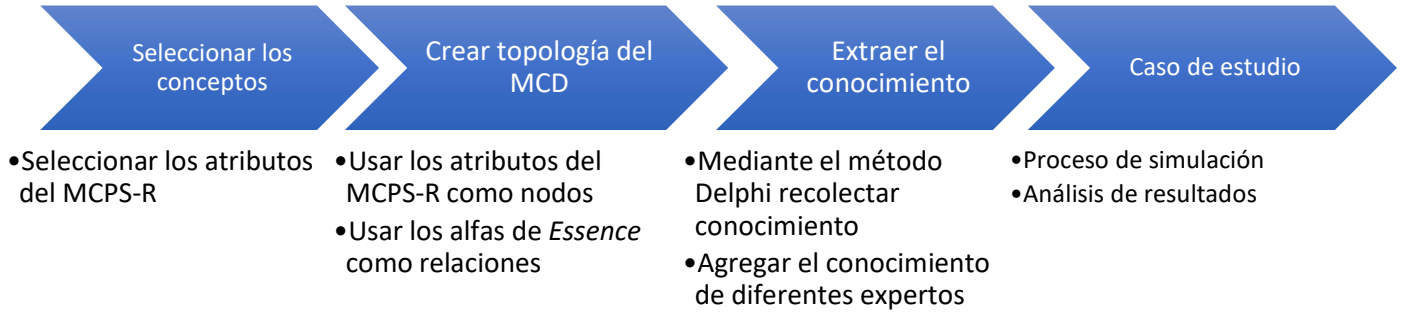


Figura 5 Actividades de la metodología.

Tabla 2. Matriz de adyacencia de datos integrados utilizando la Ecuación 3.

ID	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31	C32	C33	C34	C35
C1								0.18											0.18			0.18														
C2																															0.57				
C3																																			
C4										0.15	0.15																								
C5																																			
C6										0.31	0.31																								
C7		0.31																																	
C8												0.19										0.19													
C9										0.31	0.31																								
C10															0.31															0.31					
C11										0.28																				0.28					
C12													0.16	0.16																		0.16			
C13				0.2		0.2			0.2															0.2								0.2			
C14				0.25		0.25			0.25															0.25								0.25			
C15							0.24																												
C16																									0.22										
C17																																	0.16		
C18																																	0.25		
C19								0.27							0.27																				
C20											0.24																								
C21																				0.36															
C22																														0.31		0.31			
C23															0.31														0.31			0.31				
C24										0.23	0.23																								
C25																					0.33														
C26															0.26														0.26			0.26				
C27			0.65		0.65																														
C28																																			
C29																																			
C30																																			
C31																0.19																			
C32																																			0.19
C33																																		0.28	
C34				0.13		0.13			0.13															0.13							0.13				
C35																	0.15	0.15																	

Proceso de simulación

Para priorizar los atributos del MCPS-R, dentro del sistema se determinan la centralidad del factor (C_i) a partir de su outdegree –en español, adyacencia de- (od_i) e indegree –en español, adyacencia a- (id_i), teniendo en cuenta la magnitud de los pesos C_{ij} de la siguiente manera:

$od_i = \sum_{i=0}^{n} \lvert C_{ij} \rvert$	**(4)**
$id_i = \sum_{i=0}^{n} \lvert C_{ji} \rvert$	**(5)**
$C_i = od_i + id_i$	**(6)**

El análisis dinámico consiste en la simulación de distintos escenarios examinando cómo se comportarían los distintos atributos. Para su realización se obtiene un vector inicial que representa una situación o escenario que permite observar la evolución del sistema. La simulación del escenario definido por un vector de entrada C_0, se realiza según la Ecuación 1, hasta que se llegue a un atractor (que representará a un cluster y además mantiene juntos a sus vértices), y luego se analizan los valores alcanzados por los distintos nodos. Para la realización del análisis estático se obtienen el outdegree, el indegree y se calcula la centralidad. A partir de este valor los atributos se ordenan de mayor a menor.

El escenario planteado en el estudio contemplaba que, al inicio, todos los atributos valieran por igual sin distinción. Por lo que, el vector inicial que representa este escenario es C_0= [1,1,1, … ,1]. La simulación se realiza según la ecuación 1, empleando la ecuación 2. El sistema llegó, para el caso reportado, a un atractor en la iteración 6.

Análisis de resultados

Dentro del sistema formado por los atributos del MCPS-R (véase Tabla 3), los tres de mayor importancia, en orden descendente, para los equipos involucrados, son: tiempo de duración real en el desarrollo del proyecto (C_{10}), documentación de código de unidad (C_{27}); y tiempo de desarrollo por producto de trabajo (C_{11}).

Los tres atributos del MCPS-R más importantes, son características del factor proyecto de software [23]. Dichos atributos priorizados coinciden con los atributos mostrados en [26]. Mayor detalle acerca de la metodología AGD-FCM en [28].

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el trabajo se presentó una metodología para identificar los atributos principales del desarrollo de software utilizando los alfas de Essence y Mapas Cognitivos Difusos, considerando el conocimiento de varios equipos de desarrollo de software. Este enfoque permite el modelado del comportamiento con cualquier método de desarrollo de software, para la toma de decisiones mediante análisis estático.

Tabla 3. Centralidad de los atributos.

ID	Característica	Inde-gree	Outde-gree	Cen-trali-dad
C_{10}	Tiempo real resarrollo	1.28	0.62	1.9
C_{27}	D. Código de unidad	0.57	1.3	1.87
C_{11}	Tiempo por producto de trabajo	1.24	0.56	1.8
C_{31}	Tipos de ensamble	1.45	0.19	1.64
C_{14}	Años en el lenguaje programación	0.16	1.25	1.41
C_{15}	Dominio tecnológico	1.15	0.24	1.39
C_9	Tiempo estimado desarrollo	0.58	0.62	1.2
C_6	Costo del proyecto	0.58	0.62	1.2
C_{13}	Años en el desarrollo de softwar	0.16	1	1.16
C_{24}	D. Estructura de división del trabajo	0.58	0.46	1.04
C_{22}	D. Especificación de pruebas de aceptación	0.37	0.62	0.99
C_{34}	Inspecciones, tipo y duración	0.28	0.65	0.93
C_{23}	D. Especificación pruebas de integración	0	0.93	0.93
C_4	Total estimado de líneas de código	0.58	0.3	0.88
C_2	Nivel de riesgo y su impacto	0.31	0.57	0.88
C_8	Complejidad de organización	0.45	0.38	0.83
C_{32}	Trabajo colaborativo o individual	0.61	0.19	0.8
C_{26}	D. Especificación de pruebas unitarias	0	0.78	0.78
C_{19}	D. Modelo de negocio	0.18	0.54	0.72
C_{33}	Periodicidad horario de control del proceso	0.41	0.28	0.69
C_{21}	D. Requerimientos de software	0.33	0.36	0.69
C_{12}	Participantes de tiempo completo	0.19	0.48	0.67
C_5	Defectos removidos en el producto	0.65	0	0.65
C_3	Total de líneas de código del sistema	0.65	0	0.65
C_{20}	D. Ingeniería inversa	0.36	0.24	0.6
C_{30}	D. Post mórtem del proceso	0.59	0	0.59
C_{25}	D. Diseño detallado de unidades	0.22	0.33	0.55
C_7	Costo real del proyecto	0.24	0.31	0.55
C_1	Naturaleza del proyecto de acuerdo a sus antecedentes	0	0.54	0.54
C_{35}	Modelo de proceso de desarrollo	0.19	0.3	0.49
C_{16}	Lenguajes de programación	0.19	0.22	0.41
C_{18}	D. Planificación	0.15	0.25	0.4
C_{29}	D. Prueba de aceptación	0.31	0	0.31
C_{17}	Herramientas de programación	0.15	0.16	0.31
C_{28}	D. Revisión de código de unidad	0.13	0	0.13

Como un trabajo futuro se pretende crear una aplicación que integre la biblioteca de datos históricos con un modulo con herramienta de Mapas Cognitivos Difusos. La combinación resultante permitirá la simulación, visualización gráfica y predicción de una forma semi-automática.

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el soporte a la investigación reportada, por el Tecnológico Nacional de México / CENIDET, y el programa de becas del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

REFERENCIAS

[1] Axelrod, R. (1976). *Structure of Decision: The Cognitive Maps of Political Elites*. New Jersey: Princeton University Press.

[2] Bueno, S., & Salmeron, J. L. (2008). Fuzzy modeling Enterprise Resource Planning tool selection. *Computer Standards & Interfaces*, *30*(3), 137–147. https://doi.org/10.1016/j.csi.2007.08.001

[3] Bueno, S., & Salmeron, J. L. (2009). Benchmarking main activation functions in fuzzy cognitive maps. *Expert Systems with Applications*, *36*(3), 5221–5229. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.06.072

[4] CMMI. (2010). *CMMI® para Desarrollo, Versión 1.3*. Madrid, España: Editorial Universitaria Ramón Areces.

[5] Delgado-Solis, C. (2008). *Caracterización de Proyectos de Software para Configurar su Desarrollo y Habilitar la Comparación entre Casos Almacenados en la Memoria Organizacional*. Tesis de maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, México.

[6] González-García, M. (2006). *Método de Desarrollo Arquitectónico en Grupo*. Tesis doctoral, Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México. Recuperado de https://www.cs.cinvestav.mx/TesisGraduados/2006/tesisMoisesGonzalez.pdf

[7] González-García, M., & Martínez-Enríquez, A. M. (2004). The Architectural and Group Development Method: an Experimentation. *Foundations on Software Engineering, ACM, SIGSOFT*.

[8] Gray, S. A., Gray, S., Cox, L. J., & Henly-Shepard, S. (2013). Mental Modeler: A Fuzzy-Logic Cognitive Mapping Modeling Tool for Adaptive Environmental Management. En *2013 46th Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 965–973). IEEE. https://doi.org/10.1109/HICSS.2013.399

[9] Iakovidis, D. K., & Papageorgiou, E. (2011). Intuitionistic fuzzy cognitive maps for medical decision making. *IEEE transactions on information technology in biomedicine : a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, *15*(1), 100–107. https://doi.org/10.1109/TITB.2010.2093603

[10] Jacobson, I., Pan-Wei, N., McMah, P. E., Spence, I., Lidman, S., & Zapata-Jaramillo, C. M. (2013). La Esencia de la Ingeniería de Software: El Núcleo de Semat. *Revista Latinoamericana de Ingenieria de Software*, *1*(3), 71–78. https://doi.org/10.18294/relais.2013.71-78

[11] Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, *24*(1), 65–75. https://doi.org/10.1016/S0020-7373(86)80040-2

[12] Kosko, B. (1992). *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Approach to Machine Intelligence*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.

[13] Leyva-Vázquez, M. Y.; Rosado-Rosello, R.; Febles-Estrada, A. Modelado y análisis de los Factores Críticos de Éxito de los proyectos de software mediante Mapas Cognitivos Difusos.*Ciencias de la Información*, 43(2), 2012, 41-46.

[14] Mpelogianni, V., & Groumpos, P. P. (2016). Towards a new approach of fuzzy cognitive maps. En *2016 7th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA)* (pp. 1–6). Chalkidiki, Greece: IEEE Comput. Soc. https://doi.org/10.1109/IISA.2016.7785376

[15] Nápoles-Ruiz, G. R. (2014). *Algoritmo para mejorar la convergencia en Mapas Cognitivos Difusos Sigmoidales*. Tesis de maestría, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

[16] Nápoles, G., Leon, M., Grau, I., & Vanhoof, K. (2017). Fuzzy Cognitive Maps Tool for Scenario Analysis and Pattern Classification. En *2017 IEEE 29th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)* (pp. 644–651). Boston, MA: IEEE Comput. Soc. https://doi.org/10.1109/ICTAI.2017.00103

[17] Oktaba, H., Esquivel, C., Ramos, A., Martínez, A., Quintanilla, G., Ruvalcaba, M., … Flores, M. Á. (2005). *Modelo de Procesos para la Industria de Software MoProSoft*. Ciudad de México. https://doi.org/10.13140/2.1.2229.5043

[18] OMG. (2015). *Kernel and Language for Software Engineering Methods (Essence) Version 1.1*. Needham, MA.

[19] Papageorgiou, E. I. (2012). Learning Algorithms for Fuzzy Cognitive Maps—A Review Study. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, *42*(2), 150–163. https://doi.org/10.1109/TSMCC.2011.2138694

[20] Pérez-García, R. (2014). *Algoritmo para optimizar la topología en un Mapa Cognitivo Difuso*. Tesis de licenciatura, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

[21] Ranjan, J., & Bhatnagar, V. (2008). Critical Success Factors For Implementing CRM Using Data Mining. *Journal of Knowledge Management Practice*, *9*(3), 6.

[22] Sánchez-Santamaria, M. (2010). *Evaluación de Técnicas de Comparación de Diferentes Grupos de Características de Proyectos de Software*. Tesis de maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, México.

[23] Shahane, D., Jamsandekar, P., & Shahane, D. (2014). Factors influencing the agile methods in practice - Literature survey & review. En *2014 International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)* (pp. 556–560). New Delhi: IEEE Comput. Soc. https://doi.org/10.1109/IndiaCom.2014.6828020

[24] Stach, W., Kurgan, L., & Pedrycz, W. (2010). Expert-Based and Computational Methods for Developing Fuzzy Cognitive Maps. En *Fuzzy Cognitive Maps* (Vol. 247, pp. 23–41). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03220-2_2

[25] Szwed, P. (2013). Application of Fuzzy Cognitive Maps to analysis of development scenarios for academic units. *Automatyka/Automatics*, *17*(2), 229. https://doi.org/10.7494/automat.2013.17.2.229

[26] Yaghoobi, T. (2018). Prioritizing key success factors of software projects using fuzzy AHP. *Journal of Software: Evolution and Process*, *30*(1), 1–11. https://doi.org/10.1002/smr.1891

[27] Tsadiras, A. K. (2008). Comparing the inference capabilities of binary, trivalent and sigmoid fuzzy cognitive maps. *Information Sciences*, *178*(20), 3880–3894. https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.05.015

[28] Cancino-Fuentes, A .B, González-García Moisés (2018). Reporte de entrega de resultados: Priorización de características del desarrollo de software, metodología AGD-FCMA, TecNM/CENIDET https://www.researchgate.net/publication/341175322_Entrega_resultados_Priorizacion_de_caracteristicas_del_desarrollo_de_software_metodologia_AGD-FCMA

Método para la extracción de tweets y su aplicación en comentarios en torno al coronavirus

Ing. Mario Iván Ortiz Velázquez *
Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez *

* *Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (ivanortiz19ca@cenidet.edu.mx, ncastro@cenidet.edu.mx).*

Resumen: En la actualidad vivimos en un mundo que cambia constantemente, y en donde la información relacionada a dichos cambios se genera, comparte y almacena de múltiples formas y en variedad de plataformas, como lo son las redes sociales. Las redes sociales se han popularizado como medio de comunicación y difusión de información en las últimas dos décadas, facilitando la creación de comunidades conformadas por usuarios con gustos, opiniones o intereses en común, y permitiendo al público en general el consumo de información en tiempo real. Una de estas plataformas sociales es Twitter, un sitio que permite compartir información en forma de textos cortos, también llamados tweets, que hacen referencia a una diversidad de temas de interés social y tendencias surgidas a raíz de eventos acontecidos en el mundo real. Twitter se ha convertido en una plataforma que provee a los investigadores de una enorme cantidad de datos para uso científico, siempre y cuando puedan ser extraídos y sirvan como una muestra representativa del fenómeno que se está estudiando. En este trabajo de investigación se propone un método para la extracción de datos de la red social Twitter, con la finalidad de optimizar la búsqueda y recopilación de datos, a través de la detección de palabras clave y etiquetas representativas, probando el método con la extracción de comentarios referentes al brote de coronavirus ocurrido durante el primer trimestre del año 2020.

Keywords: redes sociales, coronavirus, extracción de información, Twitter, web scraping.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes sociales se pueden definir como plataformas web que dan la capacidad a los usuarios de construir un perfil público, o parcialmente público, para el establecimiento de enlaces con otros usuarios. Estas plataformas se han convertido en un entorno en el que se presenta la oportunidad de observar la opinión de las personas sobre distintos temas, como la reacción hacia productos o servicios, o su perspectiva hacia eventos de carácter político, económico o social. La capacidad que brindan las plataformas sociales como punto de encuentro y como lugar de exploración de contenido diverso, ha proporcionado al usuario un rol de creador, ya que no es solo un espectador y cuenta con la capacidad de generar contenido de su propia autoría, conformándose una vía de comunicación de bidireccional, entre los múltiples participantes del ecosistema, como usuarios, empresas o comunidades.

La aparición de las redes sociales ha permitido la interacción entre una gran cantidad de personas en un mismo entorno, a través de la generación de contenido en forma de imágenes, vídeos y textos. El contar con medios para el registro de la actividad social a gran escala ha permitido la recopilación masiva de información por parte de diversas entidades, tanto de carácter público como privado y que, en periodos anteriores al nacimiento de estas plataformas, hubiese representado un desafío de gran envergadura, solamente asumible por grandes organizaciones capaces de invertir una considerable cantidad de recursos en el análisis de los datos producidos en estas plataformas, sobre todo en lo referente a la recopilación de la información.

El uso de los datos generados en redes sociales por parte de la comunidad científica es un tema popular en la actualidad, debido primordialmente a que los datos presentes en esas plataformas representan un atractivo para los investigadores y científicos, ya que es posible acceder a una base de conocimiento enorme y conformada por múltiples temáticas. Como se menciona en (Hino & Fahey, 2019), el uso de las publicaciones de Twitter como fuente de datos para el desarrollo de investigaciones científicas plantea algunos desafíos, sobre todo en lo referente al acceso a datos representativos del fenómeno o problemática que se investiga, y también en lo concerniente a la calidad de los datos. Los datos que se recopilan de Twitter se consideran de baja calidad, si se comparan con los datos que se pueden extraer de portales especializados. A las problemáticas ya mencionadas se debe sumar una cuestión adicional de suma importancia, la capacidad del uso de los datos con respecto a las condiciones de cada plataforma.

Es de particular interés el desafió que se encuentra en la extracción de los datos mostrados a través de redes sociales, debido principalmente a la no siempre presente claridad manejada en los términos y condiciones bajo los

cuales se regula el uso de cada plataforma, por lo que, de común acuerdo, se reconoce la necesidad de garantizar el anonimato de los usuarios implicados en la generación del contenido, siempre que sea necesario. Así mismo, se debe tener en cuenta el uso únicamente de datos compartido bajo un dominio público y, adicionalmente, considerar que dentro del contenido compartido, como fotografías, textos o vídeos, se pueda encontrar información potencialmente comprometedora o que implique vulnerar aspectos éticos, por lo que es obligatorio que las consideraciones mencionadas se deban tomar en consideración como una etapa previa al comienzo de la recopilación de los datos.

Con base en las problemáticas ya mencionadas, el objetivo de esta investigación consiste en proponer un método para la extracción de información compartida públicamente a través de la plataforma Twitter, para recopilar datos en el marco del desarrollo de investigaciones científicas, considerando posibles implicaciones legales, y aportando un método simple pero eficaz, para la extracción eficiente de información.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Uno de los usos que se han hallado para la incorporación de datos de redes sociales en investigaciones es la tarea de extracción de información cuantitativa. En (Sellam & Alonso, 2015) se propone la detección de las propiedades cuantitativas objetivas que cada evento posee, desarrollando para ello un método que permita la extracción sistemática de información de la red social Twitter, y su tratamiento para describir eventos o fenómenos específicos. Sellam y Alonso mencionan que la tarea de extracción de datos debe tener como objetivo final la producción de datos estructurados y bien definidos, a partir de los cuales se puede realizar la búsqueda de palabras clave o características representativas. De manera general se propone ejecutar una serie de pasos consistentes en: Identificar los textos (tweets) relevantes, agruparlos en sub categorías y eliminando el contenido poco representativo, y de baja calidad, antes de almacenar los datos.

Otro enfoque a la tarea de extracción es la vigilancia de eventos como medida de prevención ante posibles efectos negativos, como se realizó en (Jiang & Zheng, 2013), en donde se partió de un problema concreto: Las reacciones adversas a los medicamentos son una de las principales causas de muerte. A partir de dicho concepto se tomaron como base los datos recopilados de Twitter para la implementación de un clasificador basado en aprendizaje automático que pudiese ayudar a determinar posibles efectos negativos de algunos fármacos, teniendo como entrada únicamente un conjunto de tweets basados en la experiencia personal de algunos consumidores, proporcionando un método eficaz para el monitoreo de los efectos de algunos fármacos.

Como se ha visto hasta ahora, la extracción de tweets es una actividad muy enfocada a la calidad y no solo a la cantidad. Para poder filtrar un cumulo tan extenso de datos es necesario identificar palabras clave, tal y como se menciona en (Chowdhury, C. Caragea & D. Caragea, 2019), la extracción de palabras clave de plataformas sociales como Twitter es un paso fundamental para el filtrado de tweets relevantes, y con ello la adquisición de los datos más representativos. Por supuesto se requiere del desarrollo de herramientas que permitan ampliar la exploración en las plataformas sociales, pero no a expensas de la aplicación de métodos que sirvan como base para la ejecución de procedimientos de selección y recopilación de información.

A pesar de las múltiples aproximaciones existentes para abordar la tarea de extracción de datos, de acuerdo a (Zhou, De & Moessner, 2016), un método de extracción de información no se puede basar únicamente en una búsqueda de palabras clave, ya que limitaría la calidad de la información recuperada, considerando adicionalmente la longitud restringida de los tweets a 140 caracteres, y a la naturaleza informal del contenido compartido, que no siempre cuenta con una estructura definida o un contexto.

2.1 Consideraciones éticas y legales

En (Molina & Borgatti, 2019) se señala que los científicos en general deben actuar para preservar la libertad científica frente a reglamentos que busquen limitar el actuar del investigador, ya que señalan como preocupante el que los investigadores que extraen datos de redes sociales se vean cada vez más limitados en sus actividades, como el uso conjuntos de datos anónimos o la dificultad para el estudio en ciertas poblaciones. Si el desafío anterior es de carácter legal, en cuanto a la cuestión ética, Paola Tubaro (Tubaro, 2019) sugiere que informar los resultados de la investigación es una cuestión ética, debiendo ser un proceso aplicado en etapas, iniciando con la revisión de los resultados obtenidos por parte de un grupo pequeño y selecto de especialistas, para continuar con la presentación de los resultados a la comunidad de investigación y concluyendo con la muestra de los datos al público, siendo necesario seguir dicho enfoque para la protección de la propia investigación.

Como consideración adicional se debe tener en cuenta el tipo de datos a extraer, por ejemplo en (Chu et al., 2019) se realiza el tratamiento de información médica, y potencialmente privada, con sus desafíos éticos adicionales relacionados a la privacidad de los datos y al consentimiento de los participantes, siendo necesario la definición de buenas prácticas para la recopilación, análisis y presentación de los resultados.

En términos de ética y legalidad, el realizar un proceso de extracción automatizado sobre redes sociales no es del todo claro, ya que en la actualidad no existe con una legislación que regule el uso de esta actividad, por lo que, antes de la ejecución de este tipo de procedimientos se deben tener en cuenta los términos y condiciones que cada portal web pueda tener sobre el uso de sus datos, con la finalidad de evitar acciones de respuesta negativas ante la actividad de extracción. Un caso particular se analiza en (Zimmer, 2010), en donde se estudia el cómo un grupo de investigadores compartió públicamente datos de perfil recopilados de las cuentas de Facebook como parte de un estudio, sin embargo no se dio una buena protección de los datos por lo que se expuso información confidencial de un gran número de personas, lo que conllevó a una violación de la privacidad. Ya que originalmente los datos se publicaron en Facebook con un propósito social, y no para la investigación académica, la recopilación y

publicación de datos de Facebook fue una acción no autorizada.

La mayoría de los procedimientos de extracción de datos de Twitter se realizan de forma automática, ya sea a través del uso de una API, opción que tiene sus limitaciones. O también utilizando herramientas automatizadas que hacen uso de una técnica denominada *web scraping* (raspado web, por su traducción al español). Dicha técnica consiste en la extracción automática de información almacenada en sitios web, haciendo uso del protocolo HTTP para la obtención de datos relevantes. Un ejemplo del uso de este tipo de herramienta se muestra en (Hernandez et al., 2018), en donde se propone una metodología para la extracción de datos públicos de la red social Twitter.

3. MÉTODO PROPUESTO

El método propuesto en este trabajo contempla la extracción, selección y almacenamiento de tweets a través de la ejecución de seis etapas, las cuales se deben ejecutar de manera secuencial para ejecutar una extracción de datos que no vulnere términos y condiciones que se encuentren sobre el uso de los datos que se van a recopilar, así como proporcionar la capacidad de obtener datos extraídos a partir de una búsqueda basada en la detección de etiquetas clave (*hashtags*), obteniendo datos específicamente relacionados con el objetivo inicial de la búsqueda.

A continuación se describe cada una de las etapas contempladas en el método propuesto, las cuales se pueden visualizar en la Figura 1:



Figura 1. Etapas que conforman el método que se propone en este trabajo.

- Planteamiento del objetivo:

  Como paso inicial, previo al proceso de búsqueda de información, se lleva a cabo la definición del objetivo de la extracción de datos, planteando el concepto, idea o fenómeno que se desea estudiar. Es un paso fundamental debido a que el proceso de extracción se debe enfocar a la búsqueda concreta de la información definida como objetivo, para construir y aplicar el resto de etapas en torno a este objetivo.

- Revisión de términos y condiciones:

  Con base en el objetivo definido se debe realizar un análisis de los términos y condiciones de la red social Twitter ("Twitter Términos de servicio", 2020), para evitar incurrir en faltas relacionadas con el uso de datos. A pesar de ser pública la información que será extraída, es necesario tener en cuenta que puede existir contenido protegido bajo leyes de derechos de autor que no se puede utilizar sin el consentimiento del autor, aunque en el caso de los comentarios realizados por los usuarios no aplican dichas leyes, aunque siempre será necesario analizar las posibles implicaciones legales que se den en cada caso de investigación, para que el proceso de extracción se apegue a las reglamentaciones de la plataforma y de los datos contenidos en ella.

- Selección de herramientas:

  Existen una considerable cantidad de herramientas para la extracción automática de datos web, algunas utilizables desde un navegador web y otras en forma de librerías para su utilización mediante lenguajes de programación. Es necesario determinar la herramienta, o herramientas, que serán necesarias para el proceso de búsqueda, recopilación y extracción. La selección dependerá del objetivo de la investigación y, en parte, de la preferencia que se tenga.

- Segmentación de la búsqueda:

  Para focalizar la extracción de datos en el objetivo definido se debe comenzar con un proceso inicial de extracción de datos, con la finalidad de obtener los *hashtags* con mayor frecuencia de aparición relacionados con la búsqueda de la idea o concepto principal. Una vez seleccionados los *hashtags* más relevantes, se seleccionan los más representativos como palabras clave y el resto se descartan.

- Extracción de datos:

  Haciendo uso de las palabras clave identificadas en el paso anterior, se procede a construir instrucciones de búsqueda que servirán para focalizar la búsqueda en los tópicos relevantes. Se definen los parámetros de búsqueda y se ejecuta la instrucción para la extracción de datos. Por cada instrucción de búsqueda construida se puede realizar un proceso independiente de extracción, uniendo el conjunto de archivos independientes generados en la etapa de extracción más adelante.

- Limpieza de los datos y generación del conjunto de datos

  Los datos extraídos se deben almacenar en un formato que permita su rápida manipulación, como .txt, .csv o .json. Es necesario estructurar la información para poder observar el conjunto de datos y seleccionar aquellos que se consideren con la calidad necesaria para ser incluidos en el conjunto de datos final, como los textos, *hashtags* o nombres de usuarios. Si se obtuvieran múltiples archivos durante la extracción, en esta etapa se unen en un solo archivo, obteniéndose un conjunto de datos que contiene tweets filtrados con

mayor eficiencia ya que la extracción se basa en la detección y uso de palabras clave para la búsqueda.

4. PRUEBA DEL MÉTODO

Para comprobar el funcionamiento del método propuesto se llevó a cabo un procedimiento de extracción de datos, siendo desarrollado el experimento siguiendo las etapas propuestas en el método:

4.1 Planteamiento del objetivo

Buscar información relacionada con el brote de coronavirus (COVID19) en México.

4.2 Revisión de términos y condiciones

Los datos que se extraerán son públicos y no se contempla la extracción o almacenamiento de información sensible, datos personales o privados de los usuarios de la plataforma. No se contempla el análisis o la distribución de dichos datos con fines comerciales, por lo que se cumple con las condiciones que la plataforma plantea sobre el uso de sus datos.

4.3 Selección de herramientas

La herramienta seleccionada para la prueba fue TwitterScraper, una librería con capacidad para la extracción de una gran cantidad de datos de Twitter. Para la manipulación de los datos se utilizó el lenguaje de programación Python.

4.4 Segmentación de la búsqueda

En una primera extracción se realizó la búsqueda de las palabras "coronavirus" y "México", con la finalidad de determinar los *hashtags*, o etiquetas, ligados a la combinación de ambas palabras, haciendo uso de la instrucción de búsqueda que se muestra a continuación:

twitterscraper "coronavirus AND México" -o coronavirus_tweets.json -l 2000

Hashtag	Frecuencia
#mexico	83
#coronavirus	58
#méxico	47
#noticias	34
#coronavirusmexico	29
#salud	17
#últimahora	14
#covid_19	14
#covid19	13
#covid19mx	13
#covid19mexico	13
#covid2019mx	12
#coronavirusmx	12
#coronavirusoutbreak	12
#coronavirusargentinapic	12

Tabla 1. Frecuencia de aparición de los principales *hashtags* detectados durante la exploración inicial.

La primera búsqueda arrojó 523 tweets como resultado. Se conservaron únicamente los *hashtags* relacionados a cada tweet, y se analizaron los de más frecuente aparición, obteniéndose el resultado mostrado en la Tabla 1.

Con base en los resultados mostrados en la Tabla 1 se seleccionaron manualmente los *hashtags* más relevantes, de acuerdo al objetivo de representar los comentarios relacionados al brote de coronavirus en México.

Los *hashtags* se agruparon dependiendo cuatro clases de término. Siendo considerados en este trabajo los siguientes:

- Términos geográficos: #mexico, #méxico
- Términos relacionados con el fenómeno: #coronavirus, #covid_19, #covid19
- Términos geográficos y relacionados con el fenómeno: #coronavirusmexico, #covid19mx, #covid19mexico, #covid2019mx, #coronavirusmx
- Otros términos: #noticias, #salud, #últimahora, #coronavirusoutbreak, #coronavirusargentinapic

4.5 Extracción de datos

Para la ejecución de la segunda exploración, basada en la segmentación realizada en la etapa anterior, se construyeron instrucciones de búsqueda basadas en la combinación de los términos encontrados en la etapa anterior. A partir de dichos términos se estructuraron las siguientes 5 instrucciones de búsqueda:

1) twitterscraper "#méxico AND #coronavirus"o coronavirus_tweets.json -l 2000

2) twitterscraper "#coronavirusmexico AND #salud"o coronavirus_tweets.json -l 2000

3) twitterscraper "#noticias AND #covid19 AND méxico"-o coronavirus_tweets.json -l 2000

4) twitterscraper "#coronavirusmexico AND noticias"o coronavirus_tweets.json -l 2000

5) twitterscraper "#covid19mexico AND noticias"o coronavirus_tweets.json -l 2000

Se realizó la ejecución individual de cada una de instrucciones construidas, limitando a 2000 la cantidad de recorridos para cada instrucción y generando un archivo .json para cada una de las búsquedas.

En la Tabla 2 se muestra la cantidad de tweets extraídos para cada una de las 5 instrucciones de búsqueda:

Instrucción	# de tweets extraidos
"#méxico AND #coronavirus"	126
"#coronavirusmexico AND #salud"	109
"#noticias AND #covid19 AND méxico"	42
"#coronavirusmexico AND noticias"	104
"#covid19mexico AND noticias"	64

Tabla 2. Cantidad de tweets extraídos con cada una de las 5 instrucciones construidas.

4.6 Limpieza de los datos y generación del conjunto de datos

Se conservaron únicamente los textos extraídos. De las 10 000 búsquedas realizadas en las 5 series de exploración se obtuvieron 445 textos filtrados bajo las palabras clave detectadas en la etapa de segmentación de búsqueda. El proceso final consistió en combinar los cinco archivos individuales generados durante la etapa de extracción en un solo archivo en formato .csv, siendo el resultado un conjunto de datos compuesto por tweets extraídos a partir del objetivo de conocer las opiniones de los usuarios de Twitter con respecto al brote de coronavirus en México.

5. CONCLUSIONES

El uso de herramientas automáticas como medio de extracción de información a través de la internet es muy prometedor, sin embargo, las regulaciones para el uso de estas técnicas en la investigación científica aún se encuentran en un periodo de incertidumbre, este argumento se basa en el hecho de que los términos y condiciones que regulan el uso del servicio de las plataformas, así como el manejo de datos, en la mayoría de los casos no contemplan el uso de los datos extraídos para desarrollos de investigación, con lo cual, el investigador se ve forzado a definir el objetivo de su trabajo con base en las regulaciones existentes al momento, siendo esto una posible limitante para la obtención de datos representativos de fenómenos específicos.

El uso de la información que se encuentra públicamente en las plataformas sociales proporciona parcialmente una garantía para legitimar el uso de los datos en investigaciones científicas, sin embargo, la mayoría de las plataformas consideran la propiedad intelectual de la información que se muestra en sus plataformas desde dos perspectivas: la primera de ellas es hacia datos que cuenten con algún tipo de protección de derechos de autor, como vídeos, imágenes o música. En el segundo de los casos se encuentra la información generada por los usuarios, principalmente en forma textual o a través de la publicación de imágenes, en donde la propiedad de los datos se adjudica a la propia plataforma, pero considerando la propiedad intelectual como propia del usuario que comparte la información, lo que se convierte en una cuestión compleja para cualquier tratamiento con fines académicos o científicos que se le pueda dar a los datos de las redes sociales, ya que sería necesario contar con la autorización de cada uno de los usuarios que se incluyan en un potencial proceso de extracción, algo virtualmente imposible de obtener.

En cuanto al procedimiento de extracción de datos en Twitter, la propia red social proporciona una API para el acceso a datos públicos alojados en la plataforma, siendo necesario considerar las limitaciones en cuanto a la cantidad de contenido que se puede descargar en un determinado periodo de tiempo, lo cual puede representar un inconveniente si el estudio planteado requiere de una gran cantidad de datos. El método que se propone en este trabajo de investigación se muestra como una alternativa para para la extracción eficiente de información de Twitter, de una forma sistémica y haciendo uso de datos públicos con la finalidad de permitir los términos y condiciones de la plataforma, basándose en la identificación de las palabras clave en forma de los *hashtags* más representativos, para obtener datos de la plataforma a partir de un concepto simple de búsqueda inicial. El resultado obtenido en la prueba del método mostró la conformación de un conjunto de datos constituido por tweets, y que fueron seleccionados de forma automática a través de la construcción de instrucciones basadas en las palabras clave encontradas, en vez de realizar de manera subjetiva y manual la selección de dichas palabras clave, lo que conllevaría una mayor cantidad de tiempo.

6. REFERENCIAS

Chu, K., Colditz, J., Sidani, J., Zimmer, M., & Primack, B. (2019). Re-evaluating standards of human subjects protection for sensitive health data in social media networks. Social Networks. doi: 10.1016/j.socnet.2019.10.010.

Hernandez Suarez A., Sanchez Perez G., Toscano Medina K., Martinez Hernandez V., Sanchez V. & Perez Meana H. (2018). A Web Scraping Methodology for Bypassing Twitter API Restrictions, CoRR, abs/1803.09875, https://dblp.org/rec/journals/corr/abs-1803-09875.bib.

Hino, A., & Fahey, R. (2019). Representing the Twittersphere: Archiving a representative sample of Twitter data under resource constraints. International Journal Of Information Management, 48, 175-184.

Jiang K., Zheng Y. (2013). Mining Twitter Data for Potential Drug Effects. In: Motoda H., Wu Z., Cao L., Zaiane O., Yao M., Wang W. (eds) Advanced Data Mining and Applications. ADMA 2013. Lecture Notes in Computer Science, vol 8346. Springer, Berlin, Heidelberg.

Molina, J., & Borgatti, S. (2019). Moral bureaucracies and social network research. Social Networks. doi: 10.1016/j.socnet.2019.11.001.

Ray Chowdhury, J., Caragea, C., & Caragea, D. (2019). Keyphrase Extraction from Disaster-related Tweets. The World Wide Web Conference On - WWW '19. doi: 10.1145/3308558.3313696.

Sellam T., Alonso O. (2015). Raimond: Quantitative Data Extraction from Twitter to Describe Events. In: Cimiano P., Frasincar F., Houben GJ., Schwabe D. (eds) Engineering the Web in the Big Data Era. ICWE 2015. Lecture Notes in Computer Science, vol 9114. Springer, Cham.

Tubaro, P. (2019). Whose results are these anyway? Reciprocity and the ethics of "giving back" after social network research. Social Networks. doi: 10.1016/j.socnet.2019.10.003.

Twitter Términos de servicio. (2020). Fecha de consulta: 9 de marzo de 2020, recuperado de https://twitter.com/es/tos

Zhou, Y., De, S., & Moessner, K. (2016). Real World City Event Extraction from Twitter Data Streams. Procedia Computer Science, 98, 443-448.

Zimmer, M. (2010). "But the data is already public": on the ethics of research in Facebook. Ethics And Information Technology, 12(4), 313-325. doi: 10.1007/s10676-010-9227-5.

Navegación de un robot diferencial basada en una Red Neuronal Multicapa con el método de retropropagación

Francisco Valdepeña * **Dante Mújica-Vargas** **

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México, (e-mail: francisco.valdepena19ca@cenidet.edu.mx).*
** *(e-mail: dantemv@cenidet.edu.mx)*

Resumen: En este artículo se implementó una red neuronal multicapa para la navegación en robots de accionamiento diferencial, basada en el método de retropropagación, con el objetivo de evitar diversos obstáculos en un área simulada utilizando *CoppeliaSim Simulator*. En la simulación se definieron tres diferentes escenarios con obstáculos y para la detección de objetos se instalaron seis sensores de proximidad de tipo escaner láser, para calcular la distancia del obstáculo al robot.
En dicha implementación se evaluó un error cuadrático medio entre capas para entrenamiento se obtuvo un $ECM < 0.01$ entre capas durante el entrenamiento.

Palabras clave— Red Neuronal Multicapa, Algoritmo *Backpropagation*, navegación robótica, accionamiento diferencial.

1. INTRODUCCIÓN

El emplear técnicas de entrenamiento y aprendizaje como las redes neuronales para la solución de la navegación en robots moviles, ha sido muy empleada en diversas investigaciones. Este problema ha empleando diversos métodos, tales como clasificadores, algoritmos genéticos, algoritmos basados en teoría difusa, así como diferentes sensores entre ellos, sensores ultrasónicos, infrarrojos, cámaras, escaneres láser. Cada técnica ha resultado en un avance significativo para este problema. Para que un robot móvil sea capaz de desplazarse en un ambiente no controlado, de manera autónoma, sin que presente problemas obtenidos por la ambigüedad o incertidumbre de los escenarios y la cual suele ser sensada, donde se requiere un modelo previo del escenario y esto a través de redes neuronales, no es necesario ya que empleando solo información obtenida en plena ejecución es posible entrenar y enseñarle al robot a desplazarse en dichos escenarios.
Una red neuronal funciona apartir de datos de entrada optenidos de diferentes sensores, en este artículo se experimentó con sensores de proximidad, es decir, sensores de tipo escaner laser, los cuales mapean un ángulo limitado de información de la distancia de un objeto al robot móvil y tomando como base dicha distancia el robot es capaz de reaccionar a dicho objeto según sea la próxima dirección sin obstáculo.
La navegación se define como una metodología que permite al robot móvil poder desenvolverse en un entorno con obstáculos, en decir, es la capacidad de reaccionar frente a situaciones inesperadas, la principal cualidad es desenvolverse, de modo eficaz, en entornos no estructados que presenten un desorden de objetos y donde no sea sencillo navegar con libertad. La navegación se puede estructurar a manera de bloques como en la Figura 1 (V. et al. (2009)).

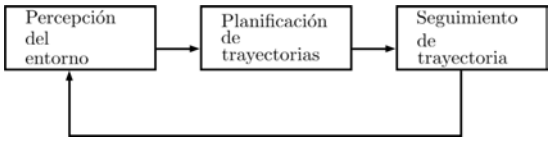


Figura 1. Metodología de la navegación.

Las tareas involucradas en la navegación de un robot móvil son: la percepción del entorno, de modo que le permita crear una abstracción del mundo, mediante diversos sensores, como por ejemplo los sensores infrarrojos para la proximidad entre objetos; la planificación de trayectorias, para alcanzar un destino, utilizando métodos de trazado de trayectorias y el seguimiento de la ruta.
En este documento se implementa una red neuronal artificial multicapa con el método *Backpropagation*, para realizar una navegación evitando obstáculos y siguiendo una trayectoria, sobre una plataforma de simulación utilizando un robot de accionamiento diferencial.
En la sección 2, se describen conceptos y formalizaciones matemáticas del modelo de una red neuronal multicapa y el método *Backpropagation*, describiéndolo en un algoritmo. En la sección 3, se desglosa la experimentación y resultados en los tres tipos de escenarios simulados. En la sección 4 se da una conclusión de la experimentación y

sus resultados.

2. MARCO TEÓRICO

Las redes neuronales artificiales son modelos simples del funcionamiento de un sistema nervioso, en una red neuronal artificial su estructura está compuesta por una capa de entrada, n capas ocultas y una capa de salida y cada capa con un m número de neuronas en cada capa, tal y como se muestra en la Figura 2.

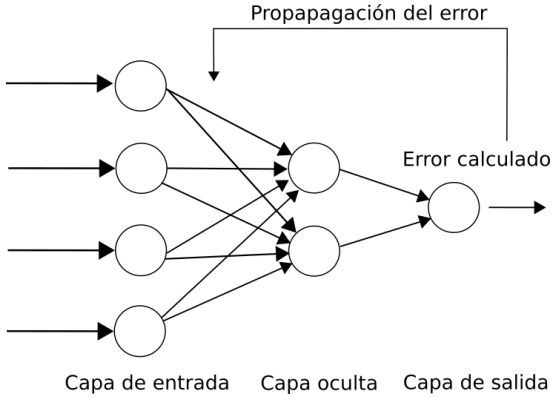


Figura 2. Red Neuronal Multicapa con una capa de entrada, una capa oculta y una de salida, basada en el método *Backpropagation*.

El valor de salida de la neurona anterior es multiplicado por un valor de peso. Estos pesos pueden incrementar o inhibir el estado de activación de la neuronas adyacentes. Al final de cada neurona puede existir una función limitadora o umbral que modifica el valor resultado o impone un límite que se debe sobrepasar antes de pasar a la siguiente neurona, está función es conocida como *función de activación* y el modelo de la red simple se puede expresar de la siguiente manera (Behnke (2003)).

$$y_i = f\left(\sum_{j=1}^{n} w_{ij}x_j - \theta\right) \tag{1}$$

donde y es la salida, w_{ij} el peso asociado al valor x_j y θ un valor de sesgo.
Dentro de la funciones de activación se tienen algunas como las siguientes.

Sigmoide La función sigmoide transforma los valores introducidos a una escala $(0, 1)$, donde los valores altos tienden de manera asintótica a 1 y los valores muy bajos a 0 (López (2006)).

$$f(x) = \frac{1}{1 - e^{-1}} \tag{2}$$

Tangente hiperbólica La función tangente hiperbólica transforma los valores introducidos a una escala $(-1, 1)$, donde los valores altos tienen de manera asintótica a 1 y los valores muy bajos tienden de manera asintótica a -1 Llano et al. (2007).

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \tag{3}$$

ReLU La función ReLU transforma los valores introducidos anulando los valores negativos y dejando los positivos tal y como entran, solo se activa si son positivos, buen desempeño en redes convolucionales (Glorot et al. (2011)).

$$f(x) = max(0, x) = \begin{cases} 0 \text{ para } x < 0 \\ x \text{ para } x \geq 0 \end{cases} \tag{4}$$

Softmax La función Softmax transforma las salidas a una representación en forma de probabilidades, de tal manera que el sumatorio de todas las probabilidades de las salidas de 1 (Bishop (2006)).

$$f(x)_j = \frac{e_j^x}{\sum_{j=1}^{n} e^{x_j}} \tag{5}$$

donde x es un vector de las entradas a la capa de salida (si tiene 5 unidades de salida, entonces hay 5 elementos en x).
Una red neuronal multicapa de solo una capa oculta queda representada de la siguiente manera.

$$z_k = \sum_{j=1}^{m} w'_{kj}y_j - \theta'_k \tag{6}$$

$$z_k = \sum_{j=1}^{m} w'_{kj} f\left(\sum_{i=1}^{n} w_{ji}x_i - \theta'_j - \theta_k\right) \tag{7}$$

donde x_i a las n entradas de la red, y_i a las m salidas de la capa oculta y z_k a las s salidas de la capa final. Además, w_{ij} representan los pesos de la capa oculta, θ_j son los umbrales correspondientes, w'_{kj} los pesos de la capa de salida y θ'_k son umbrales correspondientes.
El utilizar el método de retropropagación, los pesos de vuelven a actualizarse y se ajustan para llegar a la salida de la red neuronal (Murgía et al. (2015)).
Se consideran las respuestas de todas las neuronas de salida a una entrada x_i una función de error se puede definir de la siguiente manera.

$$e_j = \frac{1}{2}\left(c_k^r - \left(\sum_{j=1}^{m} w'_{kj}y_j^r - \theta'_k\right)\right)^2 \tag{8}$$

$$e_j = \frac{1}{2}(t_j - y_j)^2 \tag{9}$$

donde el t_j son las salidas de la red con propagación *Feed-Forward*, c_k^r representan un sesgo en la propagación hacia atrás y y_j es la salida deseada.
Una vez generados los errores se puede calcular su media con la siguiente expresión.

$$E(e) = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} e_j \tag{10}$$

$$E(x) = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(c_j^r - \left(\sum_{j=1}^{m} w'_{kj}y_j^r - \theta'_k\right)\right) \tag{11}$$

Se requiere el mínimo valor que es 0 para lograr una aproximación mas precisa de la función en la red neuronal, para ello se emplea el método de descenso de gradiente. El método de descenso de gradiente sirve para calcular aproximaciones de ceros de funciones, de alguna manera no garantiza encontrar el mejor cero pero si un valor lo suficientemente cercano, se describe de la siguiente forma.

$$\delta_i = f'(y_i) * (t_i - y_i) \tag{12}$$

donde esto pasa al resto de neuronas j de las capas ocultas.

$$\delta_j = f'(y_j) \sum_{i=1}^{n} W_{ji} * \delta_i \tag{13}$$

donde $f'(y_i)$ es la derivada de la función de activación con respecto a las salidas de las neuronas, y el subíndice i indica las salidas de la neuronas de la capa anterior. Entonces, cada peso de la red neuronal desde la propagación *Feed-Forward* y retrocediendo hasta la capa de entrada, se actualiza según la fórmula del método de descenso al gradiente (López-Franco et al. (2016)).

$$W_{k,j,i} = W_{k,j,i} + \alpha * y_i * \delta_i \tag{14}$$

donde, α es el parámetro de aprendizaje entre 0 y 1 e indica lo rápido que aprende la red neuronal. Visto de otra manera el algoritmo *Backpropagation*, quedaría de la siguiente manera (Velázquez (2015)).

Algorithm 1 Algoritmo de *Backpropagation*

for $i = 1 \rightarrow N$ **do**
  $e[input]$
for $i = 1 \rightarrow N - 1$ **do**
  $\delta_{n-1,i} = f\prime(input_{n-1,i}) * (e_{input,i} - output_{n-1,i})$
for $i = n - 2 \rightarrow 0$ **do**
  for $i = 1 \rightarrow N$ **do**
    $suma = 0$
    for $j = 1 \rightarrow N + 1$ **do**
      $suma = suma + W[k][i][j] * delta[k + 1][j]$
      $\delta[k][i] = f\prime(input_{k,i}) * suma$
    for $i = 1 \rightarrow k + 1$ **do**
      $W[k][i][j] = W[k][i][j] + \alpha * output[k][i] * \delta[k + 1][j]$

3. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En la Figura 3, se observa el modelado de la red neuronal programada para la navegación autónoma del robot, la cual cuenta con una capa de entrada con 6 neuronas, para la entrada de información de los sensores infrarrojos, la segunda capa o capa oculta, con un total de 8 neuronas para el entrenamiento de los datos (pesos), obtenidos de los sensores, utilizando la función sigmoide como función objetivo, escogida por manejar datos continuos entre 0 y 1. Finalmente, la capa de salida, con dos neuronas correspondiente a cada motor del robot diferencial arrojando salidas independientes entre si para obtener un control individual de cada rueda.

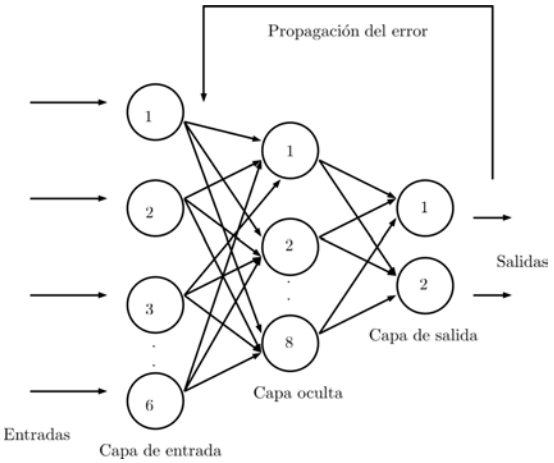


Figura 3. Red Neuronal Multicapa basada en el método *Backpropagation*, propuesta para la navegación.

Además de que se implementó el algoritmo *Backpropagation* para obtener un mejor entrenamiento de los datos obtenidos en los 6 sensores de proximidad. El robot diferencial cuenta con 6 sensores de proximidad de tipo infrarrojo.
La implementación se realizó en lenguaje C, junto con la conexión de un simulador de CoppeliaSimm (Freese (2015)), las características de *hardware* son las siguientes:

- Procesador: intel i3-7020U
- RAM: 8GB
- Arquitectura: 64 bits
- Sistema Operativo: Xubuntu 18.04 LTS

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de la simulación del robot de configuración diferencial y el escenario con obstáculos colocados de manera aleatoria. La construcción del escenario se realizó en el simulador CoppeliaSimm, la base es cuadrada de $30mx30m$.

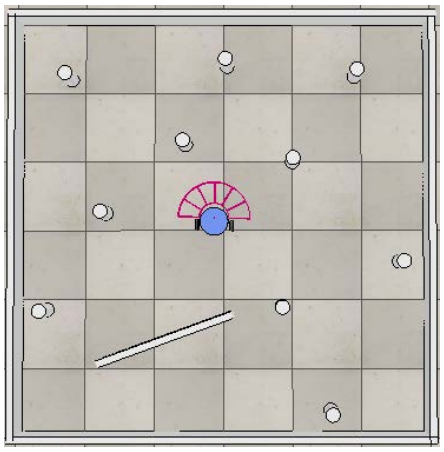


Figura 4. Escenario 1, pose del robot [3,3,90°], Estado inicial de la simulación.

ISSN en trámite

El cuanto al robot móvil de accionamiento diferencial se creó por separado y se importó. Se le añadieron 6 sensores de proximidad, como se muestra en la Figura 5.
Primero se inicializaron los pesos de manera aleatoria, se fueron entrenando con dos vectores de 12 instancias cada uno, es decir, se entrenaron los datos de los sensores y así como los datos en los motores, el valor de 0.5 para indicar disminución de velocidad y 1 para indicar aceleración.
Como función de pertenencia se empleó la función *Sigmoide* ya que se trabajo con números enteros.
Durante el aprendizaje de la red neuronal, se empleó el error cuadrático medio para realizar el ajuste y actualización de los pesos para entrenamiento. A continuación, se muestran los resultados de la simulación durante 5 minutos, por cada prueba en los 3 diferentes escenarios, representadas en las Figuras 6 y 7. Para entrenar la red

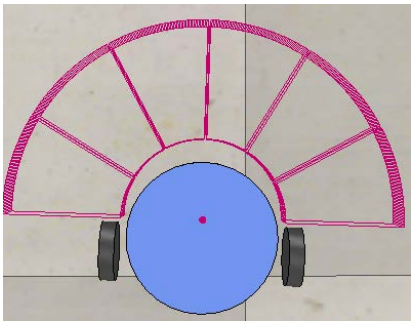


Figura 5. Diseño del robot de accionamiento diferencial.

neuronal se utilizaron valores continuos entre 0 y 1, para inicialiazar los datos sensoriales, teniendo en cuenta que el valor 1 representa la detección de obstáculos sensada por un escaner láser y el valor 0, representa un espacio libre de obstáculos.

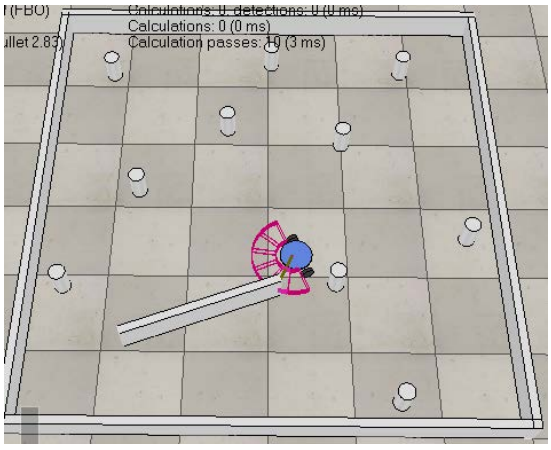


Figura 6. Escenario 1, Error Cuadrático Medio ≈ 0.015.

El robot presentó colisiones con obstáculos demasiado cercanos lo que provocó un fallo en la simulación y notar las limitaciones de la red neuronal propuesta.

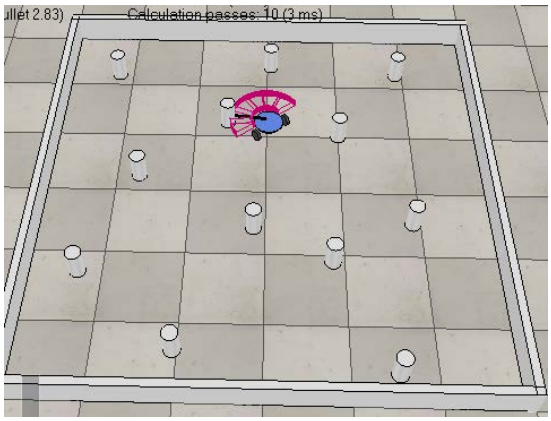


Figura 7. Escenario 2, Error Cuadrático Medio ≈ 0.01.

La construcción de la red neuronal se hizo a base del número de entradas, que en este caso eran seis, sensores las cuáles corresponden de tipo láser y el número de salidas del sistema, que hacen referencia a los dos motores del robot diferencial. En esta construcción se mantuvieron las tres capas, con el motivo de evitar caer en el sobreentrenamiento y aproximar de manera más precisa los datos sensoriales, a los esperados.

3.1 Métricas de evaluación

Para evaluar qué tanto error se tiene durante el entrenamiento entre la red neuronal con respecto a las entradas de la siguiente capa a la salida de la capa anterior se utiliza el error cuadrático Wackerly et al. (2008).

$$ECM = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{Y}_i - Y_i)^2 \qquad (15)$$

donde, $\hat{Y}$ es el vector de predicción (salida generada en la propagación hacia adelante) y Y el vector deseado.
En la Tabla 1, se muestran el primer conjunto de datos sensoriales obtenidos de la red neuronal y evaluados con la métrica de error cuadrático, para estimar la mejor aproximación del algoritmo propuesto.

Tabla 1. Red nueronal de tres capas, con una capa oculta formada por dos neuronas.

Salida A	Salida B	Salida A esperada	Salida B esperada
0.78	0.495	1	0.5
0.60	0.2522	1	0.5
0.7	0.2523	1	0
0.8	0.95	1	1
0.101	0.88	0	0.75
0.101	0.7	0.6	1
0.275	0.75	0.5	1
0.44	0.88	0.5	1
0.22	0.8	0	1
0.111	0.78	0	1
0.1145	0.7	0	1
0.103	0.8	0	0.5

La Tabla 2, muestra la aproximación que tuvieron los valores esperados y los generados por el algoritmo lo cuales se ajustaron con el número de neuronas de la red neuronal, la implementación de estos resultados se notaron colisiones y ligeras alteraciones durante la navegación. Se requería un nuevo ajuste al número de neuronas.

Tabla 2. Red nueronal de tres capas y una capa oculta de seis neuronas.

Salida A	Salida B	Salida A esperada	Salida B esperada
0.9	0.45	1	0.5
0.9	0.49	1	0.5
0.88	0.031	1	0
0.87	0.89	1	1
0.13	0.89	0	0.75
0.14	0.88	0.6	1
0.481	0.89	0.5	1
0.482	0.88	0.5	1
0.036	0.87	0	1
0.138	0.89	0	1
0.15	0.8	0	1
0.014	0.49	0	0.5

Al agregar neuronas a la capa oculta del algoritmo se logró una mejor navegación robótica, dichos datos se muestran en la Tabla 3. Al obtener mejores aproximaciones de los datos sensoriales se obtuvo una mejor navegación y planificación de trayectorias.

Tabla 3. Red neuronal de tres capas y ocho neuronas en la capa oculta.

Salida A	Salida B	Salida A esperada	Salida B esperada
0.9	0.5	1	0.5
0.9	0.496	1	0.5
0.9	0.028	1	0
0.9	0.9	1	1
$2.16 * 10^6$	0.755	0	0.75
$7.53 * 10^6$	0.966	0.6	1
0.49	0.9	0.5	1
0.48	0.9	0.5	1
0.044	0.9	0	1
0.012	0.9	0	1
0.012	0.9	0	1
$6.8 * 10^5$	0.5	0	0.5

La evaluación de salida en comparación con los datos esperados para el control de los motores, es cerca del 0.01 de correlación.
Con base a los resultados mostrados anteriormente en las Tablas 1-3 se demuestra el ajuste que se realizó en algunos de los parámetros del algoritmo, en este caso al número de neuronas fueron implementando 3 modelos diferentes con respecto a la capa oculta. Las salidas esperadas correspondientes a velocidades de cada rueda del robot en este caso durante 12 épocas. Generando así un mejor ajuste de la velocidad en rueda frente a diversos obstáculos.

4. CONCLUSIONES

La implementación de redes neuronales en navegación de robots de accionamiento diferencial demuestra que se comporta eficientemente hasta cierto punto y que además el implementar solamente sensores de aproximidad no resulta óptimo para aprender durante la navegación en un entorno con obstáculos, es evidente señalar que con una mayor cantidad de capas ocultas no es posible solventar estas deficiencias, puesto que existe una gran cantidad de datos que procesar.
Como punto de mejora se tiene la idea de usar técnicas más robustas para utilizar una mayor cantidad de sensores y poder trabajarlas, como por ejemplo la implementación de métodos basados en teoría difusa, resolvería varias deficiencias en la navegación de este tipo de robot, enfocado control durante la navegación.
Este tipo de accionamiento tiene también deficiencias de desplazamiento lo que sugiere que este tipo de robot no sea el más eficiente para entornos no controlados.

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 llamado "Sistema embebido para asistencia de conducción basado en Lógica Difusa Tipo-2".

REFERENCIAS

Behnke, S. (2003). *Hierarchical Neural Networks for Image Interpretation*. Springer, Cambridge U.K.
Bishop, C.M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, Cambridge U.K.
Freese, D.M. (2015). Coppelia robotics gmbh. URL `http://www.coppeliarobotics.com/contact`.
Glorot, X., Bordes, A., and Bengio, Y. (2011). Deep sparse rectifier neural networks. *14th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS)*, 15, 315–323.
Llano, L., Hoyos Palacio, A., Arias, F., and Velásquez, J. (2007). Comparación del desempeño de funciones de activación en redes feedforward para aproximar funciones de datos con y sin ruido. *RASI*, 4, 79–88.
López, L.H. (2006). *Motores Combustión Interna*. Editorial Reverté, España.
López-Franco, M., Sánchez, E.N., Alanis, A.Y., and López-Franco, C. (2016). Neural control for a differential drive wheeled mobile robot integrating stereo visio feedback. 19(3), 429–443.
Murgía, M.I.C., Rodríguez, R.S., and Pineda, J.V. (2015). *Percepción visual aplicada a la robótica*. Alfaomega, México.

ISSN en trámite

V., J.A.V., O., A.M., and Rios, L.H. (2009). Modelo cinemático de un robot móvil tipo diferencial y navegación a partir de la estimación odométrica. *Scientia et Technica Año XV*, 41.

Velázquez, C.A. (2015). Implementación de sistemas de navegación autónomo en robot móvil experimental para reconstrucción y exploración. (Colombia). *IV Congreso internacional de ingeniería mecatrónica y automatización - CIIMA 2015*, 72–84.

Wackerly, D.D., III, W.M., and Scheaffer, R.L. (2008). *Mathematical Statics with Applications 7th Edition*. THOMSON, USA.

Sistema de asistencia medica para pacientes geriátricos basado en sistemas expertos y bioseñales

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: Las casas inteligentes son viviendas automatizadas de bajo consumo, rentables Y eficientes que utilizan una interfaz fácil de usar para dicho propósito. Pacientes de edad avanzada y personas con discapacidades pueden beneficiarles al mejorar su calidad de vida. En este proyecto se plantea la monitorización de los patrones de sueño, con el fin de mejorar las condiciones de vida al establecer un ambiente domótica adaptable a las necesidades individuales de los habitantes de la casa-habitación.

Palabras Claves: Sistema Experto, Sistema Adquisición de Bioseñales, Clasificación de Patrones, Servicio Web, Interfaz Hombre Maquina.

1. INTRODUCCION

El sueño esta clínicamente ligado a varias afecciones graves incluyendo diabetes, obesidad y un número de enfermedades del corazón. Además, los datos del sueño, como los de las vías respiratorias puede ser un indicador del empeoramiento de enfermedades tales como Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC). A pesar de ello, la recopilación de datos y seguimiento del sueño de un individuo se ha limitado principalmente a laboratorios con altos costos por tiempo limitado. Para desarrollar este sistema nuestro método es una técnica multiseñal para la monitorización del sueño en la que un conjunto de sensores fisiológicos generan datos que utiliza un sistema experto para ayudar en el cuidado de los pacientes en un sistema domótico a distancia .

Esta información es entonces analizado para detectar trastornos de sueño conocidos y también almacenando para construir una gran base de datos para investigaciones posteriores y posiblemente diagnosticar otras enfermedades[6,7,8].

Si bien se sabe los adultos mayores son los más propensos a tener este tipo de enfermedades, por lo cual en este tipo de pacientes se opta por una atención domiciliaria inteligente la cual beneficia tanto a los proveedores de atención médica como a sus pacientes. Para los proveedores, El sistema de monitoreo automático es valioso por muchas razones. En primer lugar, libera el trabajo humano de 24/7 monitoreo físico, reduciendo el costo laboral y aumentando la eficiencia.

En segundo lugar, dispositivos sensores portátiles puede detectar incluso pequeños cambios en las señales vitales que los humanos pueden pasar por alto, por ejemplo, la frecuencia cardíaca y Niveles de oxígeno en la sangre. Notificar rápidamente a los médicos sobre estos cambios puede salvar vidas humanas.

En tercer lugar los datos recopilados de la red de sensores inalámbricos se pueden almacenar e integrar en un completo historial médico de cada paciente, que ayuda a los médicos a hacer diagnósticos más informados. Finalmente, el análisis, el diagnóstico y el proceso de tratamiento también pueden ser semi-automatizados, por lo que un médico humano puede ser asistido por un "médico electrónico".

Los pacientes de atención médica se benefician de una mejor salud como resultado de un diagnóstico y tratamiento más rápidos de enfermedades y se apoyan otros problemas para una mejor calidad de vida, como la privacidad, la dignidad y la comodidad mejorado así la capacidad de proporcionar servicios en la propia casa del paciente.

2. METODOLOGIA

Para desarrollar este sistema nuestro método es una técnica multiseñal para la monitorización del sueño en la que un conjunto de los sensores fisiológicos. Esta información es entonces analizado para detectar trastornos de sueño conocidos y también almacenando para construir una gran base de datos para investigaciones posteriores y posiblemente diagnosticar otras enfermedades. Los elementos del sistema son los mostrada en la Fig 1.

 ISSN en trámite

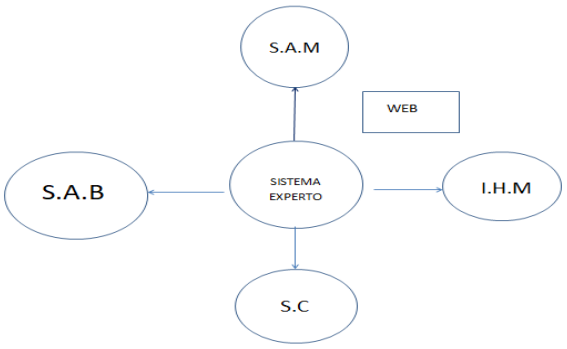


Fig 1. Arquitectura propuesta para sistema de asistencia basada en sistemas expertos en casa .

2.1 Sistema Experto

Los sistemas expertos utilizados en inteligencia artificial son software que emula el comportamiento de un experto humano en la solución de un problema[1,2]. Los sistemas expertos funcionan de manera que almacenan conocimientos concretos para un campo determinado y solucionan los problemas, utilizando esos conocimientos, mediante deducción lógica de conclusiones. Con ellos se busca una mejora en calidad y rapidez de respuestas dando así lugar a una mejora de la productividad del experto.

Los sistemas expertos pueden estar basados en reglas, es decir, disponen de unos conocimientos predefinidos que se utilizan para tomar todas las decisiones (aplicando heurística), o basados en casos (CBR, Case Based Reasoning), aplicando el razonamiento basado en casos, donde la solución a un problema similar planteado con anterioridad se adapta a un nuevo problema.

Para los verdaderos expertos humanos supone un gran apoyo que reduce tiempo y, en ocasiones puede realizar tareas por sí mismo. Pero, para que un sistema experto sea una herramienta efectiva debe de poseer dos capacidades: por un lado debe ser posible explicar los razonamientos del sistema experto, por otro debe ser capaz de integrar nuevos conocimientos así como modificar sus conocimientos obtenidos por otros mejorados[1].

2.2 Sistema de asistencia medica remota.

Este Sistema se encarga del monitoreo en tiempo real dentro del Sistema de salud integral conformado por el equipo de médicos responsables que procuran la salud de los pacientes. Este sistema es externo al sistema experto pero apoya con su experiencia al diseño y mantenimiento de nuestro modelo.

2.3 Sistema de adquisición de bioseñales

Las bioseñales han mostrado su utilidad en el cuidado de la salud y dominios médicos durante más de 100 años, siendo las más estudiadas las de electrocenfalografía (ECG) y electrocardiografía (ECG). Recientemente el control mioeléctrico se ha incrementado gradualmente en dispositivos médicos y en sistemas mecatrónicos. Dada su importancia, la etapa de adquisición de bioseñales juega un papel importante en el tratamiento y clasificación de dichas señales.

En esta investigación se realizó un análisis de las características de diferentes sistemas de adquisición de señales EMG, encontrando que cada uno de estos sistemas varían según la aplicación en: las características del sensado (tipo de sensores, número de canales y tipos de señales), las características del sistema de adquisición (amplificación, filtrado, frecuencia de muestreo) y el tipo de computo utilizado en el procesamiento. Los resultados obtenidos en esta investigación servirán de orientación para aquellos que desean desarrollar sistemas de adquisición de bioseñales para aplicaciones específicas[6,7].

2.4 Sistema de Clasificación de Patrones

El Reconocimiento de Patrones (Pattern recognition = PR) es el área de investigación que estudia la operación y el diseño de sistemas que reconocen patrones en los datos. Las técnicas de PR se usan para clasificar automáticamente objetos y patrones y tomar decisiones. El reconocimiento de patrones estadístico asume que la imagen puede contener uno o más objetos y que cada objeto pertenece a uno de varios tipos, categorías o clases de patrones. Dada una imagen digital que contiene varios objetos, el proceso de reconocimiento de patrones consta de 3 etapas. La primer etapa es llamada segmentación de la imagen, en donde los objetos de interés son aislados del resto de la imagen. La segunda etapa, es la de extracción de rasgos, en donde los objetos son medidos.

Una medida es un valor de alguna propiedad cuantificable del objeto. Un rasgo es una función de una o más medidas, computadas de tal forma que cuantifican algunas características importantes del objeto. Con estos rasgos se construye lo que se conoce como el vector de rasgos.

2.5 Servicio Web

Es un sistema de software designado para dar soporte a la interacción de máquina a máquina interoperativa a través de una red[4]. Un servicio web realiza una tarea específica o un conjunto de tareas, y se describe mediante una descripción de servicio en una notación XML estándar llamada WSDL (Web

 ISSN en trámite

Services Description Language). La descripción de servicio proporciona todos los detalles necesarios para interactuar con el servicio, incluidos los formatos de mensaje (que detallan las operaciones), los protocolos de transporte y la ubicación. Otros sistemas utilizan mensajes SOAP para interactuar con el servicio web, normalmente utilizando HTTP con una serialización XML conjuntamente con otros estándares relacionados con la web.

3. EXPERIMENT0S 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 Bioseñales. Éste ámbito del proyecto aún se encuentra en desarrollo, sin embargo, ya ha sido planeada y llevada a las pruebas. Para la parte electrónica y fundamental del proyecto, el cual es la transducción de los impulsos eléctricos hasta el acondicionamiento de las señales para después ser procesada hacia un microcontrolador y pasar a una siguiente etapa. Etapa que aún permanece en diseño.

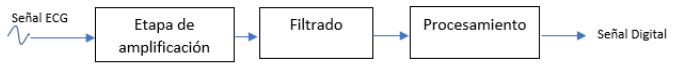


Fig 2. Diagrama General de Bloques

Para la etapa de amplificación fue necesario tomar en cuenta que la ganancia debía de ser muy grande, ya que las señales de entrada se encuentran en el rango de milivolts. Para llevar a cabo la amplificación de una señal bioeléctrica es necesario tener un amplificador que trabaje en modo diferencial el cual cuenta con una gran tasa de rechazo en modo común (CMRR).

3.1 Implementación de la circuitería: pruebas y resultados

En las primeras etapas de experimentación se optó por utilizar un amplificador operacional LM741 debido a la facilidad de uso al ser de propósito general.

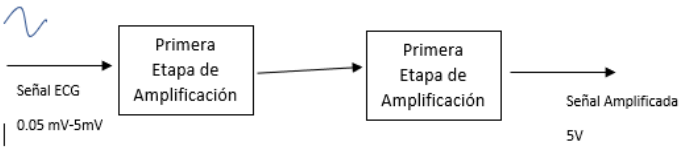


Fig. 3 . Diagrama de la etapa de Amplificación

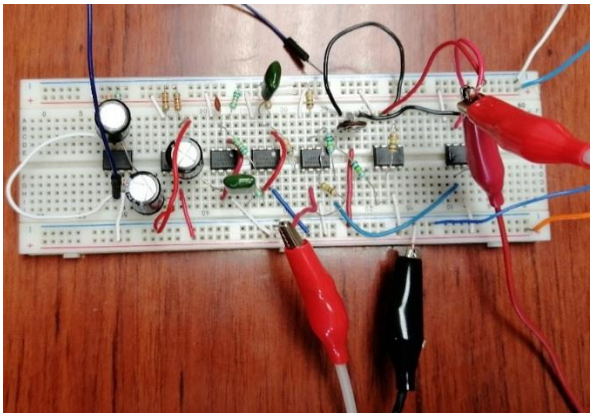


Fig. 4. Circuito Experimental

3.2 Filtrado

Para el diseño del filtro se consideró emplear un Butterworth, ya que brinda una ganancia lo más plana posible. Éste a su vez se configuró utilizando los parámetros de Sallen Key por su simplicidad y funcionamiento como un buen filtro pasa bandas, Consecuentemente, la respuesta en frecuencia del sistema se muestra en Fig 6, donde se observa la respuesta teórica y experimental. Un ejemplo de la señal filtrada la observamos en fig 5.

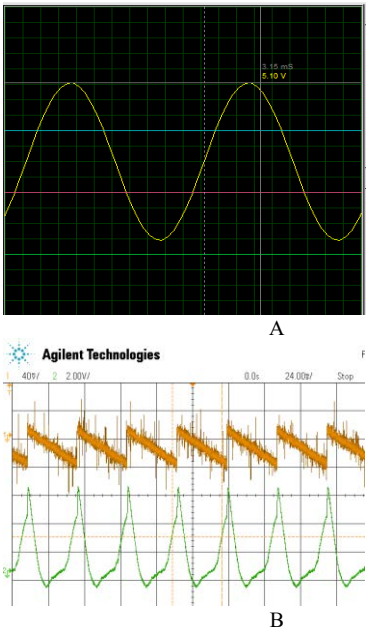


Fig. 5. A. Señal Teórica . B Señal Experimental VS = 5.3 V

 ISSN en trámite

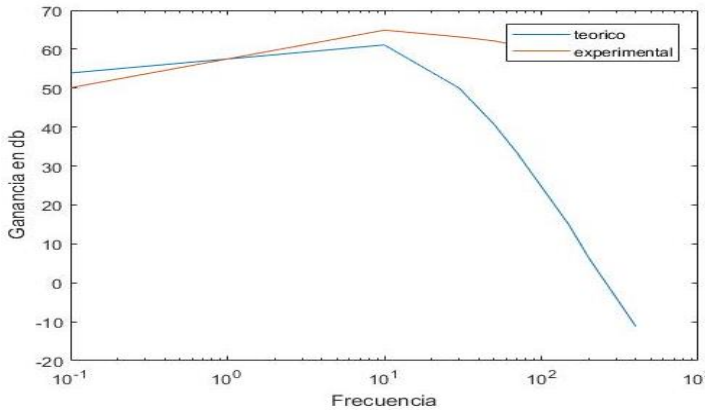


Fig. 6 Comportamiento teórico-experimental del Filtro Sallen Key

Podemos notar que a bajas frecuencias (F < 10 Hz), y altas frecuencias (F > 400 Hz), el filtro cumple su misión de atenuar las señales indeseadas, permitiendo manipular únicamente las señales dentro de este rango.

3.3 Comparación de precios

Como otros autores ya han referido, mantener un bajo precio contribuye a la fácil adquisición de nuestra prótesis, reduciendo así el número de casos sin atender. A la fecha, el prototipo tiene un costo estimado de 1.5 USD + 5 USD de producción, comparado con un kit de desarrollo MyoWare cuyo precio es de 82.95 USD. En comparación, nuestro modelo realiza las mismas funciones con un costo 9 veces menor que la tarjeta de desarrollo, generando datos confiables en amplificación y en filtrado.

4. CONCLUSIONES

Nuestro propósito de crear un sistema fiable, económico y seguro e encuentra en buen estado dentro del proceso. El diseño de la etapa de amplificación, así como el filtro Sallen Key, funcionan de la manera que esperábamos, donde se establece una frecuencia de 10 Hz hasta los 400 Hz, y una amplificación de 5 V para el voltaje de entrada de un microcontrolador, acondicionando y limpiando lo mejor que se pueda a la señal. Ésta señal filtrada experimental tiene una similitud a la señal teórica obtenida, arrojando datos fiables.

Todo este acondicionamiento se realizó para interpretación de la siguiente etapa, que por el momento está en desarrollo, y es convertirlas de A/D para poder obtener el control de las señales, por medio de control difuso y microcontroladores de bajos recursos. El costo total para la primera parte del proyecto fue de 6.5 USD comparados con los 82.95 USD que cuesta tener un kit de desarrollo. Se espera que un prototipo funcional y estético se encuentre en operación a la brevedad posible.

5. REFERENCIAS

Dorador González, J. M., Ríos Murillo, P., Flores Luna, I., & Juárez Mendoza, A. (2004, 18 febrero). ROBÓTICA Y PRÓTESIS INTELIGENTES. Recuperado 15 marzo, 2020, de http://www.ru.tic.unam.mx:8080/tic/bitstream/handle/123456789/840/art01_enero.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Escobar, L. L. Á., & Álvarez, L. (2007). Analisis de esquemas de filtrado para señales electrocardiográficas ECG (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Tecnología Eléctrica).

Expansión. (2011, 17 noviembre). Prótesis mexicanas son más baratas. Recuperado 14 marzo, 2020, de https://expansion.mx/manufactura/2011/11/17/protesis-mexicanas-son-mas-barata

Narváez Murillo, R. U., López Martínez, R., & López Reyes, F. O. (2017, diciembre). Prótesis MIO-ELECTRICA. Recuperado 15 marzo, 2020, de https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Invencion_Tecnica/vol1num4/Revista_de_Invencion_Tecnica_V1_N4_1.pdf

Regeneración. (2018, 11 mayo). 100 mil personas con amputación por diabetes en México. Recuperado 12 marzo, 2020, de https://regeneracion.mx/100-mil-personas-con-amputacion-por-diabetes-en-mexico/

Traducción de una Representación Gráfica de un Lenguaje Matemático a un Lenguaje Procedimental de Base de Datos

Mario Guillén R.*, Humberto Hernández G. *

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

Resumen: En este artículo se presenta un generador de código de PL/SQL a partir de la representación gráfica de un lenguaje matemático. Se describen los lenguajes utilizados en esta investigación; MathML y PL/SQL. Se introduce a las diferentes fases del traductor y se detalla la parte del mapeo del lenguaje MathML a PL/SQL. Además, se presentan los resultados y beneficios obtenidos al utilizar este generador de código.

Keywords: Generador de código, ANTLR, MathML, PL/SQL, Traductor.

1. INTRODUCIÓN

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 y tomar decisiones en forma adecuada. La toma de decisiones se apoya en el concepto denominado 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 previstas 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. El proceso de selección y definición de los indicadores es una actividad compleja, por lo general los indicadores se definen como una "expresión cualitativa o cuantitativa observable, que permite describir características, comportamientos o fenómenos de la realidad a través de la evolución de una variable o el establecimiento de una relación entre variables, la que comparada con períodos anteriores, productos similares o una meta o compromiso, permite evaluar el desempeño y su evolución en el tiempo" [Indicadores 2020].
Los indicadores clave se definen por medio de fórmulas matemáticas que se deben convertir a consultas de bases de datos. Es por ello, que el presente trabajo de investigación pretende facilitar la definición de consultas a bases de datos a partir de su formulación matemática y realizando su transformación a PL/SQL en forma automática.

2. MARCO CONCEPTUAL

MathML [MathML 2020] es un lenguaje XML para describir expresiones matemáticas para que puedan incluirse directamente en documentos HTML y visualizarse en la web, lo que permite compartir conceptos matemáticos complejos utilizando únicamente un editor de texto y un navegador web. Como MathML está basado en XML, la estructura predecible lo hace ideal para el procesamiento automático.

La especificación MathML define dos lenguajes separados para representar expresiones: marcado de presentación y marcado de contenido. Como su nombre indica, el marcado de presentación describe expresiones en términos de su apariencia visual, mientras que el marcado de contenido describe el significado matemático subyacente de una expresión. En la figura 1, se muestra una función cuadrática y en la figura 2, su representación en lenguaje MathML.

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Figura 1. Representación gráfica de una función cuadrática

En la figura 2, se muestran tres elementos de MathML: <mi>, <mn> y <mo>. El elemento <mi> permite definir identificadores, <mn> literales numéricas y <mo> operadores, también se pueden representar superíndices, radicales y fracciones, entre otros elementos. MathML tiene todos los elementos para describir ecuaciones matemáticas.

```
<math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
    <mi>x</mi>
<mo>=</mo>
<mfrac>
        <mrow>
            <mo>-</mo>
<mi>b</mi>
            <mo>&#177;</mo>
            <msqrt>
                <msup>
                    <mi>b</mi>
                    <mn>2</mn>
                </msup>
                <mo>-</mo>
<mn>4</mn>
<mi>a</mi>
                <mi>c</mi>
            </msqrt>
        </mrow>
        <mrow>
            <mn>2</mn>
            <mi>a</mi>
        </mrow>
    </mfrac>
</math>
```

Figura 2. MathML de la función cuadrática de la figura 1.

PL/SQL [Feuerstein 2014], es la extensión que realizó Oracle al lenguaje SQL que incorporan características de diseño de los lenguajes de programación. La manipulación de datos y las declaraciones de consulta se incluyen en las unidades procesales de códigos. PL/SQL permite que las aplicaciones se escriban en procedimientos PL/SQL o en paquetes y se almacenen en el servidor de Base de Datos de Oracle, y se pueden usar como bibliotecas o aplicaciones compartidas, mejorando así la integración y la reutilización de código. Además, el servidor de BD Oracle precompila los códigos PL/SQL antes de la ejecución real del código y, por lo tanto, mejora el rendimiento.
ANTLR [Parr 2012], es un generador de analizadores sintácticos que permiten al usuario escribir analizadores de lenguaje. Puede generar un analizador sintáctico que construye un árbol de sintaxis abstracta a partir del texto analizado, y puede generar "caminantes" de árbol que pueden analizar este árbol. ANTLR distingue tres fases de compilación; la fase de análisis léxico, la fase de análisis sintáctico y las fases de recorrido por los árboles. Un analizador generado por ANTLR por lo general implementa al menos el análisis léxico, la fase de análisis sintáctico y, opcionalmente, puede agregar una o más fases de recorrido del árbol.

2.1 Trabajos relacionados

Dentro del mundo de la edición de fórmulas matemáticas, existen diferentes estándares para la representación de fórmulas. Los principales son MathML [MathML 2020] y LATEX [Mittelbach 2004], existen diferentes trabajos para la migración en ambos sentidos entre MathML y Latex. Otros trabajos se enfocan a los trabajos de accesibilidad para usuarios con capacidades distintas, tanto de audición y visión [Jason 2020]. En la literatura no se reportan trabajos con respecto a la conversión de MathML a lenguaje procedimental de base de datos.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 Formulación de la hipótesis

Es posible obtener sentencias del lenguaje PL/SQL a partir de la representación gráfica de un lenguaje matemático.

3.2 Preguntas de investigación

¿Cuáles representaciones gráficas del lenguaje matemático permiten generar sentencias PL/SQL?
¿Se puede realizar en forma automática la generación de los componentes básicos del lenguaje PL/SQL?

3.3 Formulación del Problema

Se requiere de un generador automático de código PL/SQL a partir de la representación gráfica de un lenguaje matemático.

3.4 Justificación

El desarrollo de esta investigación consistió en analizar diferentes herramientas existentes para representar lenguajes matemáticos. Para realizar el traductor se debe 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?

3.5 Objetivos

3.5.1 Objetivo General

Proporcionar un prototipo para la traducción de una representación gráfica de un lenguaje matemático a un lenguaje procedimental de base de datos.

3.5.2 Objetivos Específicos

- Analizar los requerimientos técnicos necesarios para la implementación de un prototipo para la traducción de una

representación gráfica de un lenguaje matemático a un lenguaje procedimental de base de datos.

- Elaborar el diseño del prototipo.
- Describir la implementación del prototipo.
- Mostrar los resultados obtenidos.

3.6 Alcance y Limitaciones

Por limitaciones de tiempo y presupuesto solo se desarrollará un prototipo para validar la factibilidad de desarrollar un sistema completo.

4. PROPUESTA DE SOLUCION

La metodología aplicada utiliza las técnicas para el desarrollo de compiladores y en especial un subconjunto de esta metodología aplicada a traductores, ver figura 3.

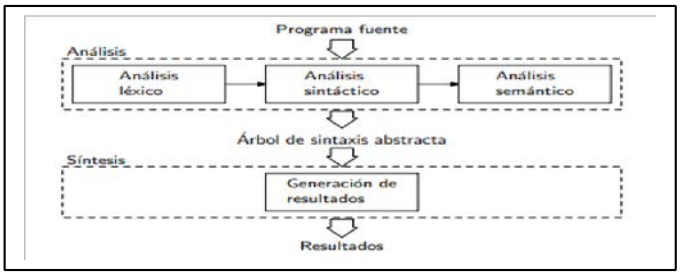


Figura 3: Metodología para el desarrollo de traductores.

La metodología para el desarrollo de un compilador típico [Aho, Lam, Sethi, Ullman, 2008], se divide en diferentes fases: primero usa el analizador léxico, o *Lexer*, para analizar el archivo de entrada. El analizador léxico es responsable de agrupar los caracteres del archivo de entrada, o secuencia de caracteres, en una secuencia de palabras o *tokens*. Usando el flujo de *tokens* como entrada; el analizador sintáctico analiza este flujo de *tokens* y crea un árbol de *tokens*, llamado Árbol de Sintaxis Abstracta (AST). Después de esta fase, una o más fases de recorrido por los árboles, pueden usar y modificar el AST para generar el lenguaje de salida.

4.1 Fases del Traductor

4.1.1 El analizador léxico (Lexer)

El analizador léxico es responsable de convertir la secuencia de caracteres en una secuencia de *tokens*. Para ANTLR, la especificación EBNF del analizador léxico especifica exactamente cómo se pueden reconocer los *tokens*. Este trabajo se centrará principalmente en las fases de análisis y recorrido de árboles y las estructuras de datos AST intermedias.

4.1.2 El analizador sintáctico (Parser)

El analizador sintáctico es responsable de crear el AST inicial a partir de la secuencia de *tokens* que ha producido el analizador léxico. La especificación EBNF del lenguaje se utiliza para definir las reglas sintácticas que determinarán la estructura del árbol, y se puede extender utilizando operadores especiales para la configuración de árboles que permitan controlar la forma del AST.

4.1.3 Los recorridos de árboles

Se usa un caminante para recorrer y procesar el AST producido por el analizador. Básicamente, un caminante de árboles es un analizador que analiza un AST en lugar de una secuencia de *tokens*. Las fases de verificación o de optimización generalmente se implementan utilizando caminantes de árboles.
Para permitir que ANTLR genere un caminante, se debe escribir una especificación EBNF de caminante para el AST que ha producido el analizador. Debido a que la forma del AST depende de las oraciones de entrada y de la especificación del analizador, escribir una especificación de caminante requiere un conocimiento específico de ambas.

4.1.4 Árboles de Sintaxis Abstracta

Un árbol de sintaxis abstracta, o AST, es un árbol finito, dirigido y etiquetado, donde cada nodo representa una construcción de lenguaje de programación, los hijos de cada uno de los nodos representan los componentes de la construcción.

4.1.5 Árboles de Sintaxis Concreta

El árbol de sintaxis concreta, o CST, se utiliza para modelar el análisis de una gramática. En un árbol de sintaxis concreta no vacío, el nodo raíz, es siempre el símbolo de inicio de la gramática que se utilizó para analizar una oración. Las hojas consisten en todos los símbolos terminales que se encontraron al analizar una oración. Las rutas desde las hojas hasta la raíz en el CST contienen todos los símbolos no terminales encontrados al analizar la oración. El CST también se conoce como árbol de análisis.

4.1.6 EBNF

La Forma Backus-Naur extendida, o EBNF, es una notación comúnmente utilizada para gramáticas libres de contexto y es un estándar ISO/IEC 14977. EBNF fue desarrollado originalmente por Niklaus Wirth basado en la Forma Backus-Naur, o BNF, notación desarrollada por John Backus y Peter Naur. EBNF está destinada a ser extensible, esto significa que actualmente existen muchas variantes de EBNF.

4.1.7 Gramáticas

La especificación formal de un lenguaje casi siempre implica alguna gramática libre de contexto. La gramática libre de contexto generalmente se usa para especificar la sintaxis de un lenguaje, las construcciones que no se pueden especificar usando una gramática libre de contexto generalmente se consideran en la semántica de un lenguaje. Por ejemplo, la oración a = 1; es para muchos idiomas una oración sintáctica correcta. Sin embargo, si

la variable "a" no está definida dentro del alcance de la declaración; la oración es semánticamente incorrecta para muchos idiomas, porque "a" no se definió.

Definición 4.1.1 Una gramática libre de contexto G, representa un lenguaje, se denota con una 4-tupla (N, T, R, S), donde N es un conjunto finito de símbolos no terminales no vacíos y representa las clases sintácticas del lenguaje; T representa el alfabeto del lenguaje y es un conjunto finito de símbolos terminales no vacíos; S ∈ N siendo el símbolo de inicio. El vocabulario de G se denota por N ∪ T; R es un conjunto finito de reglas de producción: para cada r ∈ R: n → α, donde n ∈ N y α es una forma de oración que contiene una secuencia de símbolos del vocabulario de G.

Definición 4.1.2 Un árbol de sintaxis abstracta o AST es un árbol finito, dirigido y etiquetado, donde cada nodo representa una construcción de lenguaje de programación, los hijos de cada nodo representan componentes de la construcción. Una sección AST es una parte de la AST que se formó exactamente por una regla de una gramática.

Un AST producido por una gramática consta de varias secciones o subárboles. Cada regla en una gramática produce una o más secciones, están interconectadas por la sección de la regla asociada con el símbolo de inicio. Un AST básico se construye procesando una especificación gramatical G con una oración de entrada S, denotada por G ↑ S. Cada terminal analizada por una regla de G da como resultado una hoja en la sección para esa regla. Cada no terminal analizado por una regla de G da como resultado una nueva sección, que está conectada con un nodo a la sección de la regla que contiene el no terminal como raíz. Cuando una gramática es inequívoca, cada oración analizada por la gramática da como resultado un AST único.
En las siguientes secciones se da una breve explicación sobre el análisis realizado.

4.2 Enfoque científico

En este trabajo se utilizó un enfoque inductivo utilizando la herramienta ANTLR [Parr 2012, Parr 2010] que se utiliza para construir reconocedores, intérpretes, compiladores y traductores de lenguaje a partir de una descripción gramatical del lenguaje a traducir. A continuación, se muestra un subconjunto de la gramática utilizada.

```
parser grammar mmlParser;
options { tokenVocab = mmlLexer;
} tokens {MATH }

document   :  prolog? misc* element misc*; prolog    :
XMLDeclOpen attribute* SPECIAL_CLOSE ; rcontent
:  chardata?  ((rowment) chardata?)+ ; content    :
chardata?
            (( para   | fracment | supment | subment |
subsupment
            | layment | underment | overment | undoverment
            | rootment | sqrtment | rowment|tokment | element
| reference | CDATA | PI | COMMENT )
          chardata?)* ;
fraccontent :  justWS? (fracment | supment | subment
| subsupment | underment | overment | undoverment
| rootment  | sqrtment | layment | rowment | tokment
            | element ) justWS? ; basecontent
:  justWS? (  basecont  ) justWS? ;

...
element    :   OPEN Name attribute* CLOSE content OPEN
SLASH Name CLOSE
            |   OPEN Name attribute* SLASH_CLOSE;
reference   :   EntityRef | CharRef ;

attribute   :   Name EQUALS STRING ;
justWS     :   SEA_WS; tok          : MI
| MN | MO; chardata    : INTEG   |
TEXT | justWS;          misc      :
COMMENT | PI | SEA_WS ;
```

Figura 4. Gramática de MathML utilizada

La gramática utilizada en este trabajo fue tomada de [MML2Nem 2020].

4.3 Descripción del método

Existe una amplia gama de algoritmos y patrones típicos que se utilizan para analizar sintácticamente los lenguajes formales, cada uno con sus propias características. Si utilizamos generadores de analizadores en un nivel de abstracción más alto, se simplifica el problema de dominio y facilita el desarrollo de software más robusto y el tiempo de desarrollo del analizador suele ser bajo. El proceso para desarrollar el prototipo se muestra en la figura 5 y fue el siguiente:

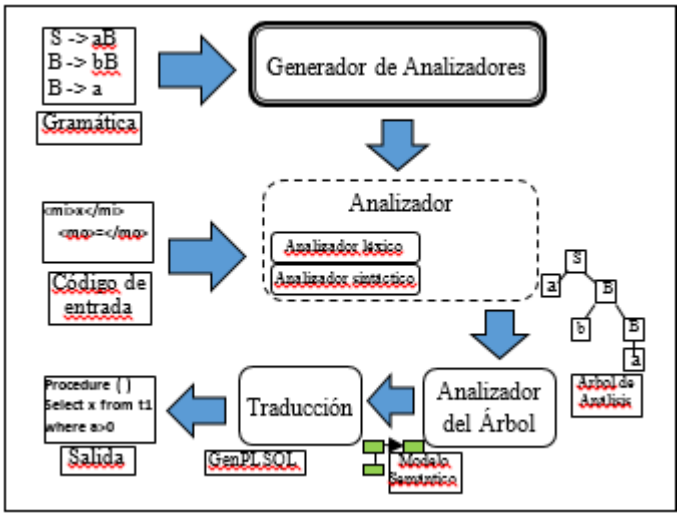


Figura 5: Prototipo utilizando ANTLR

a) Se utiliza ANTLR como generador de análisis, el analizador se genera a partir de la gramática de MathML. El código fuente generado por el analizador es en lenguaje Java.

b) Se generan varias clases de Java, entre las principales se encuentran un Lexer, un *Parser* y un *Listener*. El Código del Listener se modifica para definir y llenar las estructuras de datos utilizadas en el análisis de la instancia del lenguaje MathML a traducir.

c) Para la fase de análisis semántico se utiliza una Tabla de Símbolos (TS), la TS son estructuras de datos que almacenan toda la información de los identificadores del lenguaje fuente. El objetivo de la TS en el proceso de traducción es colaborar con las comprobaciones semánticas y facilitar ayuda a la generación de código. Habitualmente los elementos del lenguaje que requieren el uso de la TS son los distintos tipos de identificadores del lenguaje (nombres de variables, de objetos, de funciones, de procedimientos, de etiquetas, de clases, de métodos, etc.).

d) Una vez obtenidos los identificadores, los operadores y las expresiones de la fórmula matemática se procede a generar el código de salida en Oracle PLSQL, quedando de la siguiente forma, para su primera raíz.

```
CREATE OR REPLACE FUNCTION get_raiz_cuadrada (
   in_a INTEGER,
   in_b INTEGER,
   in_c INTEGER
)
RETURN REAL
IS
  raiz NUMBER := 0;
BEGIN
  SELECT (-in_b + sqrt ( power (in_b, 2) – ( 4 * in_a * in_c )  ) / (2 * in_a)
   INTO raiz
   FROM dual
   RETURN raiz;
END;
```

5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos con los casos de prueba definidos cumplen con los resultados esperados. El código generado por el prototipo cumple con la especificación de PL/SQL [Feuerstein 2014], de Oracle 11g.

La generación del código se implementó en una clase separada llamada GenPLSQL que permite definir únicamente funciones y procedimientos de PL/SQL.

6. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se puede observar que el traductor facilita la programación, en forma automática, de los procedimientos almacenados a partir de fórmulas matemáticas. Permitiendo un ahorro en tiempo en la implementación de las fórmulas matemáticas. En trabajos futuros, para normalizar el código generado se pretende utilizar plantillas de lenguajes como StringTemplate [Parr 2012] o Velocity [Apache 2020].

De las fórmulas matemáticas [Hodson, 2014] se realizaron un conjunto de pruebas de un subconjunto de fórmulas con expresiones de algebra básica, como variables, números, operadores aritméticos, superíndices subíndices, agrupamiento de expresiones, radicales, fracciones y sumatorias. En esta etapa no se realizaron pruebas con fórmulas matemáticas que incluyen vectores, cálculo (derivadas e integrales) y matrices.

REFERENCIAS

[Aho, Lam, Sethi, Ullman, 2008] Aho, Lam, Sethi, Ullman, Compiladores principios, técnicas y herramientas, 2008 Pearson Educación, México.

[Apache 2020] Apache, Página de referencia, the Apache velocity Project, http://velocity.apache.org/ última visita febrero del 2020.

[Feuerstein 2014] Feuerstein Steven, Bill Pribyl. Oracle PL/SQL Programming, 2014, O'Reilly Media, Inc.

[Mittelbach 2004] Mittelbach Frank. The LaTeX Companion 2nd ed. Ene. de 2004. isbn: 0201362996

[Hodson, 2014] Hodson Ryan, Ry's MathML Tutorial, 2014, Edición Kindle, Editor RyPress, Amazon México Services, Inc.

[Indicadores 2020] Indicadores, Página de referencia, https://ingenioempresa.com/indicadores-una-guiaincompleta/ última visita febrero del 2020.

[Jason 2020] White Jason J.G. The Accessibility of Mathematical Notation on the Web and Beyond, Journal of Sciencia Education. 2020

[Kaliszyk, Rabe 2020] Kaliszyk Cezary, Rabe Florian, A Survey of Languages for Formalizing Mathematics, CICM 2020 conference paper preprint, https://arxiv.org/abs/2005.12876, última visita mayo del 2020.

[MathML 2020] MathML, W3C Math Home, Página de referencia https://www.w3.org/Math/ última visita febrero del 2020.

[MML2Nem 2020] MML2Nem, Página de referencia, https://github.com/SusanJ/MML2Nem/blob/master/mmlParser.g4 última visita febrero del 2020.

[Parr 2010] Parr Terence, Language Implementation Patterns, 2010, The Pragmatic Bookshelf.

[Parr 2012] The Definitive ANTLR 4 Reference, 2012, The Pragmatic Bookshelf.

Análisis comparativo de arquitecturas para Internet of Things

Erick Infante-Covarrubias * **Javier Ortiz-Hernández** *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: {erick.infante19ca, ortiz}@cenidet.edu.mx).*

Resumen:
El desarrollo de la infraestructura y las tecnologías que apoyan la accesibilidad, la vida activa y asistida son importantes, especialmente en el contexto del desarrollo de ciudades inteligentes con el uso del internet de las cosas (IoT, Internet of Things). El objetivo de este trabajo es presentar una comparación de tres de las arquitecturas más utilizadas en sistemas enfocados a IoT, destacando las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Palabras Clave: Internet of Things, IoT, System architecture, Service oriented, Sensor networks, Cloud, Blockchain

1. INTRODUCTION

Las tecnologías de la información son factor clave en la mejora de la calidad de vida y un apoyo fundamental para las actividades diarias de las personas y las organizaciones, ya que permite incrementar la productividad, sistematizar procesos, mejorar la comunicación, etc. Para ello, se busca el diseño y desarrollo de herramientas que le permiten a las personas y objetos estar conectados en tiempo real, intercambiar información y auxiliar diferentes tareas cotidianas. El desarrollo de herramientas de esta naturaleza ha dado lugar a las diferentes aplicaciones del IoT, tales como automatización en casas inteligentes, seguimiento en espacios cerrados, conectividad entre dispositivos y aplicaciones móviles.

Una arquitectura de servicios puede integrar las mejores alternativas tecnológicas para el desarrollo de aplicaciones de IoT, permitiendo superar los desafíos que presentan este tipo de proyectos (Li & Zhang, 2017).

El objetivo de una arquitectura de servicios es separar la lógica de integración del negocio de la implementación. Para lograr esto, se necesita la creación de componentes que contengan la implementación de los servicios individuales necesarios para los procesos de negocio (IBM, 2020b). Esta solución permite explotar de una manera eficaz y eficiente la creación de nuevos servicios para el IoT, de manera más ágil, en un menor tiempo y en consecuencia con un menor costo.

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo un estudio comparativo de las principales características, ventajas y desventajas de algunas de las arquitecturas disponibles para el desarrollo de aplicaciones de IoT. El artículo está estructurado de la siguiente manera: la Sección 2 describe los desafíos actuales a los que se enfrenta el desarrollo de sistemas de IoT; la Sección 3 describe los criterios con los cuales se analizaron las arquitecturas; la Sección 4 describe las características principales de las arquitecturas; la Sección 5 presenta los resultados del estudio comparativo entre las arquitecturas seleccionadas; y la Sección 6 presenta las conclusiones de este trabajo.

2. DESAFÍOS DEL IoT

En esta sección se presenta una breve revisión de los desafíos clave a los que se enfrenta la tecnología para el desarrollo de soluciones basadas en IoT y que se pueden sintetizar en los siguientes: confiabilidad, movilidad, disponibilidad, escalabilidad, rendimiento y problemas de interoperabilidad. (Al-Fuqaha et al., 2015; Sisinni et al., 2018; Yaqoob et al., 2017).

- **Confiabilidad** La confiabilidad es la capacidad del sistema para funcionar de manera consistente de acuerdo con sus especificaciones básicas. Tiene como objetivo aumentar la robustez de IoT para soportar problemas de seguridad, el uso a largo plazo, la funcionalidad de la aplicación al obtener información incierta, entre otros. Tiene como principal característica el garantizar la confiabilidad de la implementación en todas las capas de IoT. La red de IoT y la aplicación que se ejecuta en la red, deben lograr garantizar la transición la información de manera confiable.

- **Movilidad** Uno de los principales retos del IoT es el soporte a la movilidad IP entre las conexiones de los usuarios y los servicios deseados, en particular cuando se están moviendo en diferentes lugares y cuando ejecutan métodos de acceso. También es importante la detección de movimiento de los dispositivos IoT para la asignación de nuevas regiones o redes (Yaqoob et al., 2017).

- **Disponibilidad** La mayoría de las aplicaciones del IoT requieren de un alto nivel de disponibilidad de hardware y software para proporcionar servicios de manera eficaz. La mayoría de las aplicaciones del IoT

tienen como requisito una estricta disponibilidad ya que fallas del sistema pueden conducir a una falla generalizada. Existen herramientas de diseño adecuadas para maximizar la disponibilidad del sistema IoT y así poder minimizar los efectos de fallas en los dispositivos de red (Macedo, Guedes, & Silva, 2014).

- **Escalabilidad** El rápido incremento de las funcionalidades y el desarrollo de nuevas aplicaciones, exigen incorporar nuevos dispositivos y servicios a los sistemas IoT existentes sin afectar la calidad del servicio. Sin embargo, los protocolos de administración actuales adaptan bien a los requisitos de los dispositivos IoT debido a sus capacidades limitadas. En el futuro, se espera que los protocolos de administración de escalabilidad rastreen las relaciones sociales entre dispositivos para permitir servicios de computación basados en ad hoc proporcionando algunos incentivos a los usuarios (Yaqoob et al., 2017).

- **Rendimiento** Es muy importante evaluar el rendimiento de los servicios proporcionados por las aplicaciones IoT. La evaluación no es una tarea fácil, ya que necesitamos evaluar continuamente y con precisión todos los procesos internos entre los dispositivos y la infraestructura de la red, como la pérdida de paquetes, el ancho de banda, entre otros (Al-Fuqaha et al., 2015). El crecimiento explosivo de las aplicaciones IoT ha aumentado drásticamente el nivel de dificultad para garantizar el rendimiento deseado en tiempo real (Sisinni et al., 2018).

- **Interoperabilidad** La interoperabilidad es la capacidad de los objetos para comunicarse, transmitir información, procesada de manera rápida y ponerla a disposición por otras entidades. Manejar la interoperabilidad es un gran desafío para las aplicaciones IoT las cuales generalmente incluyen grandes cantidades de objetos heterogéneos bajo diferentes plataformas. La falta de interoperabilidad entre los dispositivos IoT aumentara significativamente la complejidad y el costo de implementación e integración de sistemas IoT (Sisinni et al., 2018).

3. CRITERIOS DE ANÁLISIS

Se aplicaron los siguientes criterios para describir cada arquitectura:

- **Descripción general.** Describe los aspectos generales de la arquitectura, así como las capas que conforman dicha arquitectura.

- **Tecnologías utilizadas.** Describe el tipo de tecnología u objetos de estudio que se utilizaron en la investigación.

- **Resultados.** Describe los resultados obtenidos de la implementación de la arquitectura para solucionar los desafíos actuales del IoT.

- **Conclusiones.** Describe las ventajas y desventajas que se identificaron en la implementación de la arquitectura en aplicaciones para IoT.

4. ARQUITECTURAS

4.1 Arquitectura Orientada a Servicios (SOA)

La arquitectura SOA ofrece un conjunto de patrones y pautas para crear servicios de manera flexible y alineados con el negocio. Permite separar la especificación, la implementación y los enlaces, con la finalidad de prever amenazas y aprovechar oportunidades comerciales (IBM, 2020a).

Capas de la arquitectura SOA SOA puede considerarse como una arquitectura de siete capas (Avila, Sanmartin, Jabba, & Jimeno, 2017):

- **Capa de sistemas operativos.** Esta capa consiste en las aplicaciones personalizadas existentes.

- **Capa de componentes empresariales.** Esta capa es responsable de asegurar la funcionalidad y mantener la calidad de los servicios expuestos.

- **Capa de servicios.** Los servicios que el negocio elige residen en esta capa. Proporciona el mecanismo para tomar componentes a escala empresarial, componentes específicos de la unidad de negocio y componentes específicos del proyecto.

- **Capa de composición del proceso empresarial** En esta capa los servicios se agrupan en un flujo a través de la orquestación o la coreografía y, por lo tanto, actúan juntos como una sola aplicación.

- **Capa de presentación** Proporciona una capa de acceso de punto a punto a los servicios.

- **Capa de integración** Esta capa permite la integración de servicios a través de la introducción de un conjunto confiable de capacidades, como el enrutamiento inteligente, la mediación de protocolos y otros mecanismos de transformación.

- **Capa de calidad del servicio (QoS, por sus siglas en inglés)** Esta capa proporciona las capacidades requeridas para monitorear, administrar y mantener QoS, como seguridad, rendimiento y disponibilidad. Este es un proceso en segundo plano a través de mecanismos y herramientas de detección y respuesta que monitorean el estado de las aplicaciones SOA.

En (Yoon & Jeong, 2018) se presenta un estudio sobre los beneficios de implementar este tipo de arquitectura en empresas como Motorola, Visa, Verizon entre otras, dando como resultado una mejora en la eficiencia del negocio, facilidad para integrar sistemas o aplicaciones, así como la escalabilidad de estas.

Tomando en cuenta el crecimiento actual de las empresas, la arquitectura orientada a servicios permite reaccionar de manera rápida a los cambios dentro de las empresas y lograr un beneficio de estas. Utilizando estándares como el *Lenguaje Descriptivo de Servicios Web* (WSDL, por sus siglas en inglés) y el *Lenguaje de Ejecución de Procesos*

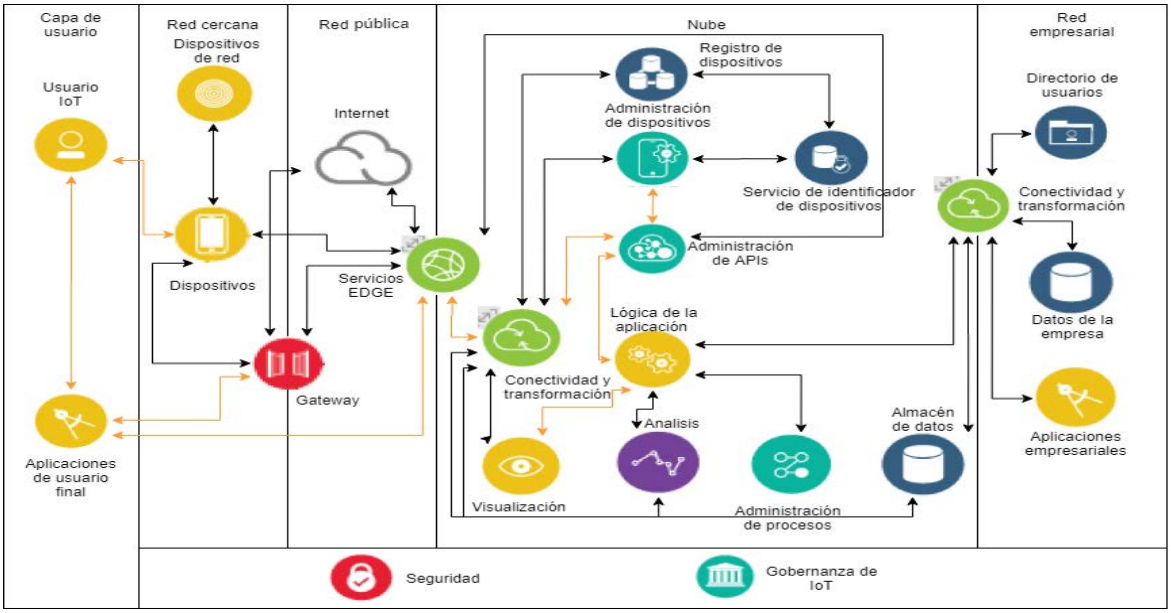


Fig. 1. Arquitectura CCAIoT mostrando los elementos que pueden ser necesarios para aplicaciones IoT en los cinco dominios. Recuperada de (Council, 2020)

de Negocios (BPEL, por sus siglas en inglés) permiten la reutilización de componentes.

4.2 Arquitectura CLOUD-IoT

La arquitectura *Cloud Customer Architecture for IoT* (CCAIoT, por sus siglas en inglés) proporciona una solución de extremo a extremo que abarca desde los usuarios de dispositivos IoT hasta las empresas que gestionan los dispositivos (Council, 2020).

Capas de la arquitectura CCAIoT Los componentes centrales de la arquitectura se dividen en cinco capas como se muestra la Figura 1 y se muestran a continuación: Capa de usuario, Red cercana, Red pública, Nube y Red empresarial (Pierleoni et al., 2019).

- **Capa de usuario** Contiene a todos los usuarios de IoT y sus aplicaciones de usuario final. Estos son independientes de cualquier dominio específico de red.
- **Red cercana** Cuenta con las capacidades de una red e incluye los dispositivos físicos que son parte de esta.
- **Red pública** Interconecta los dispositivos de las múltiples redes cercanas a través del internet hacia los servicios *EDGE* que permiten un camino seguro de los datos hasta la *Nube*.
- **Nube** Captura los datos de dispositivos u otra fuente de datos de las aplicaciones principales de IoT y los servicios asociados (almacenamiento, análisis y visualización). Incluye componentes para gestión de dispositivos (administración remota, actualizaciones de software, control remoto). La información generada por la *Nube* es utilizada por el usuario y la aplicación empresarial.
- **Red empresarial** Utiliza la información generada por la *Nube*.

En (Pierleoni et al., 2019) se realiza una comparación de rendimiento entre las plataformas IoT que ofrecen las empresas de Amazon, Microsoft y Google (AWS IoT, Azure for IoT y Google Cloud IoT respectivamente), donde cada plataforma proporciona un punto de acceso a la *Nube* con el cual los dispositivos pueden conectarse de manera privada y segura.

Esta arquitectura está pensada de tal forma que permita cualquier dispositivo que se encuentre en la *zona EDGE* (Red pública y cercana) se conecte directa o indirectamente con la plataforma para el manejo y almacenamiento de los datos, los cuales son controlados por las aplicaciones de la empresa. Esto brinda un mejor control de la información que proporcionan múltiples dispositivos a través de la red.

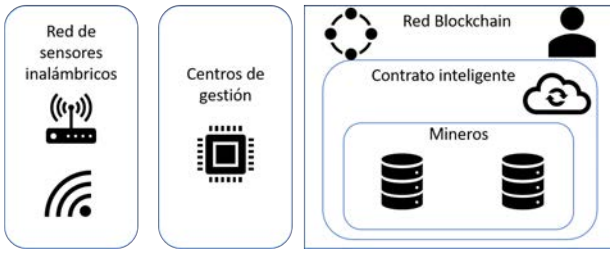


Fig. 2. Arquitectura Blockchain descentralizada

4.3 Arquitectura Blockchain IoT

La arquitectura blockchain propuesta (Figura 2) por (Novo, 2018) en comparación a los sistemas centralizados propuestos por (Li & Zhang, 2017), aporta las siguientes ventajas: la movilidad que permite utilizar la arquitectura en sistemas aislados respetando las políticas de acceso en entornos blockchain; las reglas de control de acceso se encuentran siempre disponibles gracias a que toda la información se encuentra distribuida; la concurrencia de los dispositivos permite que sean administrados por múltiples usuarios y todos ellos puedan acceder o modificar las

Tabla 1. Desafíos del IoT solucionados por arquitectura

Arquitectura	Capas	Desafíos en el IoT					
		Confiabilidad	Movilidad	Disponibilidad	Escalabilidad	Rendimiento	Interoperabilidad
SOA	Sistemas operativos	✓					
	Componentes empresariales	✓		✓	✓		
	Servicios	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Composición del proceso empresarial	✓			✓		
	Presentación	✓	✓	✓	✓	✓	
	Integración	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Calidad del servicio	✓			✓		
CCAIoT	Usuario	✓	✓		✓	✓	✓
	Red cercana	✓		✓	✓	✓	✓
	Red publica	✓		✓			✓
	Nube	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Red empresarial	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Blockchain IoT	Redes de sensores inalámbricos	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Administradores	✓	✓	✓	✓		
	Nodo agente	✓			✓	✓	
	Contrato inteligente	✓		✓		✓	
	Red Blockchain	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Centros de gestión	✓	✓	✓	✓		✓

políticas de control; es una solución ligera debido a que no es necesario modificar los dispositivos IoT para que sean implementados, debido a que la comunicación se realiza en las redes blockchain, permitiendo una comunicación en múltiples plataformas. Esta solución permite la conexión de múltiples dispositivos IoT, ubicados en múltiples redes, a una sola red blockchain; y permite ocultar la localización de los dispositivos, así como la forma en la que se accede al recurso.

Propiedades de la tecnología Blockchain

- **Control descentralizado**
- **Auditabilidad y transparencia de los datos** Existe una copia completa de cada transacción ejecutada en el sistema.
- **Información distribuida** Cada nodo de la red mantiene una copia de la información para evitar que se privatice de manera deliberada por una parte de la misma.
- **Consenso descentralizado** Todas las transacciones son validadas por cada nodo de la red.
- **Seguro** Al utilizar esta tecnología se asegura que las transacciones no puedan ser manipuladas.

Capas de la arquitectura Blockchain

- **Redes de sensores inalámbricos** Es una red de comunicación que permite conectividad con aplicaciones de requerimientos limitados.
- **Administradores** Son los responsables de administrar los permisos de control de acceso a los dispositivos IoT.
- **Nodo agente** Es el nodo especifico responsable de desplegar el único contrato inteligente en el sistema.
- **Contrato inteligente** Este contrato es único y no puede ser borrado del sistema. Solo los administradores tienen los privilegios para interactuar con el contrato para definir nuevas políticas en el sistema.
- **Red Blockchain** Los mineros mantienen segura y estable la red al mantener copias de la cadena y realizar la aprobaciones de las transacciones.
- **Centros de gestión** Son una interfaz que transforma la información de los dispositivos IoT en mensajes que puedan ser comprendidos por los nodos de la red Blockchain.

En (Novo, 2018) se utilizo la plataforma de blockchain distribuido *Ethereum*,los centros de gestión y los dispositivos IoT, para evaluar cómo la introducción de los centros de gestión afecta en el sistema blockchain. Los resultados muestran que centros de gestión mitigan los problemas asociados con la gestión de numerosos dispositivos IoT.

Con la implementación de los centros de gestión en la red es posible conectar simultáneamente numerosas redes para así mejorar la escalabilidad del sistema. Lo cual brinda una mayor versatilidad al tener distribuidos en la red más centros de gestión para la administración de los dispositivos IoT.

5. RESULTADOS

Las arquitecturas expuestas en este documento fueron diseñadas para atender las necesidades de mayor importancia para un entorno específico, por lo cual sacrifican algunos aspectos para mejorar otros.

Los criterios utilizados para elaborar la comparación de la arquitectura son con base a los desafíos del IoT presentados en la sección 2, las marcas que se muestran en la tabla indican el desafío que se supera dependiendo de la capa de la arquitectura, con base a los resultados expuestos en (Avila et al., 2017; Novo, 2018; Pierleoni et al., 2019). En la Tabla 1 se muestra que parte de las arquitecturas

ayudan a solventar las problemáticas actuales para las aplicaciones del internet de las cosas. Estos resultados pueden ayudar a futuras investigaciones para identificar las partes específicas que solventan dicha problemática, y así implementar esas técnicas o herramientas en otras arquitecturas que se adapten más al problema que se le pueda presentar al investigador.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Como se observó en este trabajo, la arquitectura que se seleccione para implementar proyectos IoT va a influir de manera importante en el alcance y en la calidad de la solución. Es conveniente tomar en cuenta estas consideraciones al momento de desarrollar nuevos proyectos. Asimismo, es importante destacar que dado que, la tecnología evoluciona de manera muy rápida, es necesario revisar y adaptar las técnicas actuales previamente a su implementación.

Como trabajos futuros se continuará y se ampliará la búsqueda de otras propuestas de arquitecturas para IoT para generar un análisis más amplio y extenso que muestre las características que permiten solucionar los desafíos actuales, destacando las mejores prácticas y los aspectos clave de cada arquitectura.

REFERENCIAS

Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015, Fourthquarter). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, *17*(4), 2347-2376. doi: 10.1109/COMST.2015.2444095

Avila, K., Sanmartin, P., Jabba, D., & Jimeno, M. (2017). Applications based on service-oriented architecture (soa) in the field of home healthcare. *Sensors*, *17*(8), 1703.

Council, C. S. C. (2020). *Cloud customer architecture for iot.* https://www.omg.org/cloud/deliverables/CSCC-Cloud-Customer-Architecture-for-IoT.pdf.

IBM. (2020a). *The architectural style and principles.* https://www.ibm.com/developerworks/library/ws-soa-design1/.

IBM. (2020b). *Arquitectura orientada a servicios.* https://ibm.co/2P3WxkP.

Li, C., & Zhang, L.-J. (2017). A blockchain based new secure multi-layer network model for internet of things. In *2017 ieee international congress on internet of things (iciot)* (pp. 33–41).

Macedo, D., Guedes, L. A., & Silva, I. (2014, April). A dependability evaluation for internet of things incorporating redundancy aspects. In *Proceedings of the 11th ieee international conference on networking, sensing and control* (p. 417-422). doi: 10.1109/ICNSC.2014.6819662

Novo, O. (2018, April). Blockchain meets iot: An architecture for scalable access management in iot. *IEEE Internet of Things Journal*, *5*(2), 1184-1195. doi: 10.1109/JIOT.2018.2812239

Pierleoni, P., Concetti, R., Belli, A., & Palma, L. (2019). Amazon, google and microsoft solutions for iot: Architectures and a performance comparison. *IEEE Access*.

Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. (2018). Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *14*(11), 4724–4734.

Yaqoob, I., Ahmed, E., Hashem, I. A. T., Ahmed, A. I. A., Gani, A., Imran, M., & Guizani, M. (2017). Internet of things architecture: Recent advances, taxonomy, requirements, and open challenges. *IEEE wireless communications*, *24*(3), 10–16.

Yoon, T., & Jeong, B.-K. (2018). Service oriented architecture (soa) implementation: Success factors and realized benefits. *International Journal of Information Systems in the Service Sector (IJISSS)*, *10*(2), 1–21.

Estudio experimental del comportamiento de la intensidad de la señal BLE

Regino Infante-Covarrubias * **Javier Ortiz-Hernández** *
Angel Israel Daza-Castillo **

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET*
Cuernavaca, Morelos, México.
e-mail: {rinfante19ce, ortiz }@cenidet.edu.mx

** *Universidad Politécnica del Estado de Morelos*
Jiutepec, Morelos, México. e-mail: dcao167714@upemor.edu.mx

Resumen:
La mayoría de los métodos y algoritmos de localización en espacios cerrados utilizan la intensidad de las señales recibidas por teléfonos inteligentes desde dispositivos Bluetooth Low Energy, BLE, por sus siglas en inglés. Dado que la intensidad de las señales es en función de la distancia entre los dispositivos BLE (también conocidos como beacons) y el teléfono inteligente, es posible efectuar diversos cálculos para obtener la ubicación. Sin embargo, la intensidad puede variar dependiendo de diversos factores afectando la precisión de la ubicación obtenida. En este trabajo, se presenta un estudio experimental para conocer el comportamiento de la señal BLE, utilizando beacons de la marca Estimote, en particular para estimar su pérdida de precisión cuando se aleja del teléfono inteligente.

Palabras Clave: IoT, Internet of Things, Beacons, BLE, Bluetooth Low Energy, Indoor Navigation, Smart building, Estimote

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología evoluciona proporcionando de manera continua dispositivos y nuevos servicios que dan soporte a las actividades y necesidades cotidianas de las personas. Para ello, se diseñan y desarrollan herramientas que permitan a personas y objetos estar conectados en tiempo real, intercambien información y nos auxilien en nuestras tareas cotidianas buscando llevarnos a una mejor calidad de vida. Estos avances tecnológicos han dado lugar al internet de las cosas (*Internet of Things*, IoT por sus siglas en inglés).

Un problema que concierne al IoT es el posicionamiento de una persona o en general de objetos en espacios cerrados, es decir al interior de edificios, tales como centros comerciales, hospitales, escuelas, entre otros, con la finalidad de guiarles para llegar a un sitio destino, establecer polígonos de seguridad, detectar proximidad a sitios específicos, efectuar estudios de movilidad, entre otros (Rusli, Ali, Jamil, y Din, 2016).

El sistema de posicionamiento global (*Global Positioning System*, GPS por sus siglas en inglés) es una de las herramientas más utilizadas para determinar el posicionamiento de un objeto o de un dispositivo con un alto grado de precisión (Zekavat y Buehrer, 2019). El principal inconveniente que presenta, es que en espacios cerrados los datos tienen baja confiabilidad debido a que la señal se transmite con dificultad al atravesar objetos sólidos, con la consiguiente pérdida de precisión cuando se trata de ubicar personas u objetos (Orujov et al., 2018).

Es en este sentido que desde hace algunos años se han explorado nuevas tecnologías de localización en espacios cerrados. Dentro de la literatura podemos encontrar diversas tecnologías compitiendo para asegurar mayor precisión y confiabilidad, así como nuevas funcionalidades (Gu et al., 2019). La mayoría de los trabajos revisados calculan la ubicación a partir de la lectura de la intensidad de la señal de dispositivos emisores WiFI, BLE, RFID y NFC (Davidson y Piché, 2017; He y Shin, 2018; Tahat et al., 2016).

Los beacons son elementos que pueden ser parte de una infraestructura de IoT. Son pequeñas balizas de bajo consumo que de manera constante emiten una información prefijada mediante tecnología BLE (Bluetooth Low Energy, por sus siglas en inglés). Los beacons son compatibles con prácticamente todos los dispositivos móviles, lo que abre un abanico muy amplio de posibilidades para el desarrollo de soluciones basadas en esta tecnología (Caballero de Tineo, 2016).

Es importante mencionar que aunque estas tecnologías proporcionan una localización con un menor margen de error en comparación con el GPS (Kriz et al., 2016), la localización en espacios cerrados todavía cuenta con ciertas limitaciones, ya que la señal se ve afectada al atravesar objetos sólidos, ocasionando que no se cuente con datos confiables para el cálculo de la ubicación (Faragher y Harle, 2015).

Dentro de la literatura revisada no se aborda el tema de la confiabilidad de los datos que proporcionan los dispositivos

 ISSN en trámite

Tabla 1. Configuración de los beacons

Beacon	UUID	Transmit Power (TX) Estimote	Transmit Power (TX) Lectura Cel	Intervalo de transmisión de paquetes (milisegundos)	Porcentaje de Batería
1	b9407f30-f5f8-466e-aff9-25556bcf9022	0	-64	200	85
2	b9407f30-f5f8-466e-aff9-25556bbd8834	0	-64	200	89
3	b9407f30-f5f8-466e-aff9-25556bc4ebb3	0	-64	200	79
4	b9407f30-f5f8-466e-aff9-25556ba6640a	0	-64	200	92
5	b9407f30-f5f8-466e-aff9-25556b5cd338	0	-64	200	91

emisores de señales. Un factor determinante para disminuir el margen de error es la obtención de datos más confiables y con menor ruido de los dispositivos emisores de señales inalámbricas (Cervantes et al., 2019).

Dado este contexto, el objetivo de este trabajo es ofrecer un panorama acerca del comportamiento de la intensidad de la señal BLE para que sea tomado en cuenta para el cálculo de la ubicación del objeto o persona dentro de un edificio.

El artículo está estructurado de la siguiente forma: la Sección 2 describe la metodología de solución del estudio experimental; la Sección 3 presenta los resultados obtenidos en nuestro estudio, y la sección 4 presenta las conclusiones de la investigación.

2. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

En esta sección describimos el hardware y software utilizado en las pruebas, así como el entorno experimental, la configuración de los beacons y los resultados obtenidos en cada una de las pruebas.

2.1 Hardware y software

Para el estudio experimental de este artículo se utilizaron 5 dispositivos iBeacon de la marca Estimote con la tecnología BLE. En la Figura 1 se puede observar del lado izquierdo uno de los 5 beacons utilizados.

En este estudio se utilizó un teléfono inteligente marca Motorola, modelo Moto G6 Plus con sistema operativo Android, en su versión 9, para la lectura de las señales se utilizó una aplicación propia para la captura de las señales de los dispositivos beacons, utilizando la librería "AltBeacon". En la Figura 1 se puede observar del lado derecho, el teléfono inteligente utilizado en las pruebas que se mencionan.

2.2 Entorno experimental

El entorno experimental en el que se desarrollaron las pruebas fue dentro del aula 3101 del edificio de computación del CENIDET, la cual se observa en la Figura 2. Esta aula cuenta con sillas y mesas de trabajo y no cuenta con equipamiento de cómputo que pueda generar interferencias en la lectura de las señales.

Los experimentos de captura de señales se realizaron con un único beacon a la vez, en un horario de 6 pm a 8 pm en diferentes días, en el aula ya antes mencionada. Fueron realizadas en un ambiente controlado, con una



Figura 1. Uno de los 5 Beacons y el Celular utilizados para los experimentos

temperatura de 23° C y sin personas que pudieran generar la lectura de posibles datos atípicos.

Las condiciones antes mencionadas de horario y de espacio, fueron establecidas con la intención de minimizar la interferencia de las señales electromagnéticas que emiten los equipos de cómputo y/o teléfonos inteligentes de los alumnos o del personal, ya que en ese horario la afluencia de personas es mínima, además de que el aula solo cuenta con un único aparato eléctrico (el proyector, el cual se encontraba apagado).



Figura 2. Aula 3101 donde se realizaron las pruebas

2.3 Configuración de los beacons

En la Tabla 1 se presenta la configuración de los dispositivos emisores de señal BLE con la que se realizó el estudio experimental.

La primer columna de la tabla mencionada, enumera el dispositivo beacon, la segunda columna muestra su Identificador Único Universal (Universally Unique IDentifier, UUID por sus siglas en inglés). La tercera columna muestra el valor TX (potencia de transmisión) el cual representa

 ISSN en trámite

Tabla 2. Promedios de las lecturas de los beacons

	RSSI Promedio de Angulos por Beacon						
Distancia Real	Beacon 1	Beacon 2	Beacon 3	Beacon 4	Beacon 5	Máximo	Mínimo
25	-48.25806452	-60.2016129	-48.41935484	-48.98387097	-48.83064516	-48.25806452	-60.2016129
50	-52.93548387	-63.57258065	-56.97580645	-57.35483871	-55.91935484	-52.93548387	-63.57258065
75	-60.80645161	-69.11290323	-59.55645161	-60.34677419	-61.89516129	-59.55645161	-69.11290323
100	-61.85483871	-66.29032258	-63.16129032	-61.25806452	-60.70967742	-60.70967742	-66.29032258
150	-69.98387097	-74.37096774	-69.58870968	-70.66935484	-71.60483871	-69.58870968	-74.37096774
200	-69.41129032	-71.65322581	-72.59677419	-72.98387097	-71.66129032	-69.41129032	-72.98387097
250	-73.00806452	-74.37096774	-74.95967742	-77.69354839	-77.29032258	-73.00806452	-77.69354839
300	-78.12096774	-74.80645161	-77.54032258	-79.12096774	-80.01612903	-74.80645161	-80.01612903
400	-78.37903226	-76.04032258	-79.80645161	-80.49193548	-80.62903226	-76.04032258	-80.62903226
500	-80.41129032	-75.59677419	-79.52419355	-79.61290323	-81.44354839	-75.59677419	-81.44354839
600	-84.55645161	-83.31451613	-80.56451613	-81.45967742	-82.81451613	-80.56451613	-84.55645161
700	-85.20967742	-80.88709677	-82.87096774	-81.55645161	-83.88709677	-80.88709677	-85.20967742

el poder con el que el beacon transmite su señal, en esta columna se muestra el valor que se configuro desde la aplicación de Estimote, teniendo la opción de configurar desde los -30 dBm (decibelio-milivatio) hasta los $+10$ dBm. La cuarta columna de la tabla indica el TX obtenido de la lectura que obtuvo el teléfono inteligente, este dato lo envía el beacon en cada uno de sus paquetes. La quinta columna de la tabla presenta la configuración establecida desde la aplicación de Estimote para especificar cuantos milisegundos tiene que esperar el beacon para enviar otro paquete, este atributo puede tomar valores desde 100 ms hasta 2000 ms. En la sexta y última columna se muestra el porcentaje de la batería (según la aplicación de configuración de Estimote) del beacon antes de realizar las pruebas, aunque no es un dato que se pueda configurar, nos servirá para saber si la energía con la que cuenta el dispositivo es un factor a tener en cuenta.

Se optó por establecer esta configuración en el parámetro de TX (0 dBm) de los beacons debido a que se encuentra en un punto medio de su valor máximo (200 metros) y mínimo (1 metro) del rango que puede alcanzar la señal transmitida. El valor con en el que se configuraron los beacons para emitir un paquete bajo la señal BLE es de 200 ms (milisegundos), este valor es el recomendado por la marca Estimote para proyectos de localización en interiores debido a que un intervalo más corto entre cada paquete, proporciona una señal más estable (Estimote, Inc, 2018).

3. PRUEBAS Y RESULTADOS

Los dispositivos emisores (beacons) y el receptor (teléfono inteligente) se colocaron a la misma altura sobre mesas con una altura de 75 cm. Se realizaron 5 pruebas en total, una con cada emisor y con el mismo receptor en diferentes días, pero bajo el mismo escenario controlado.

El emisor se colocó a una distancia de 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600 y 700 cm con respecto al centro del receptor; en cada una de las distancias, el receptor se rotó sobre su plano horizontal a 0°, 90°, 180° y 270°, con el fin de obtener información sobre si importa la orientación del teléfono inteligente con respecto al emisor a la hora de realizar las lecturas.

En la figura 1 se muestra el celular en una orientación de 0° sobre su plano horizontal, mientras que en la figura 3 se encuentra ubicado en un ángulo de 90° en su plano horizontal.



Figura 3. Celular en un ángulo de 90° sobre su plano horizontal.

La primera prueba se realizó a una distancia de 25 cm entre los dispositivos (medidos desde el centro de cada uno) emisor y receptor, este último en una orientación de 0°, tal y como se muestra en la figura 1, con esta configuración se capturaron y almacenaron 31 señales en un periodo de 31 segundos sin que existiera manipulación alguna de los dispositivos.

Se decidió realizar este muestreo de 31 lecturas de señales BLE para obtener una distribución muestral más cercana a una distribución normal, para así calcular un promedio de las lecturas obtenidas, debido a que estás son muy variantes de un momento a otro sin que exista manipulación de los equipos (emisor y receptor).

La segunda prueba se realizó a una distancia de 25 cm entre los dispositivos (medidos desde el centro de cada uno) emisor y receptor, este último en una orientación de 90°, tal y como se muestra en la figura 3, con esta configuración también se capturaron y almacenaron 31 señales en un periodo de 31 segundos.

 ISSN en trámite

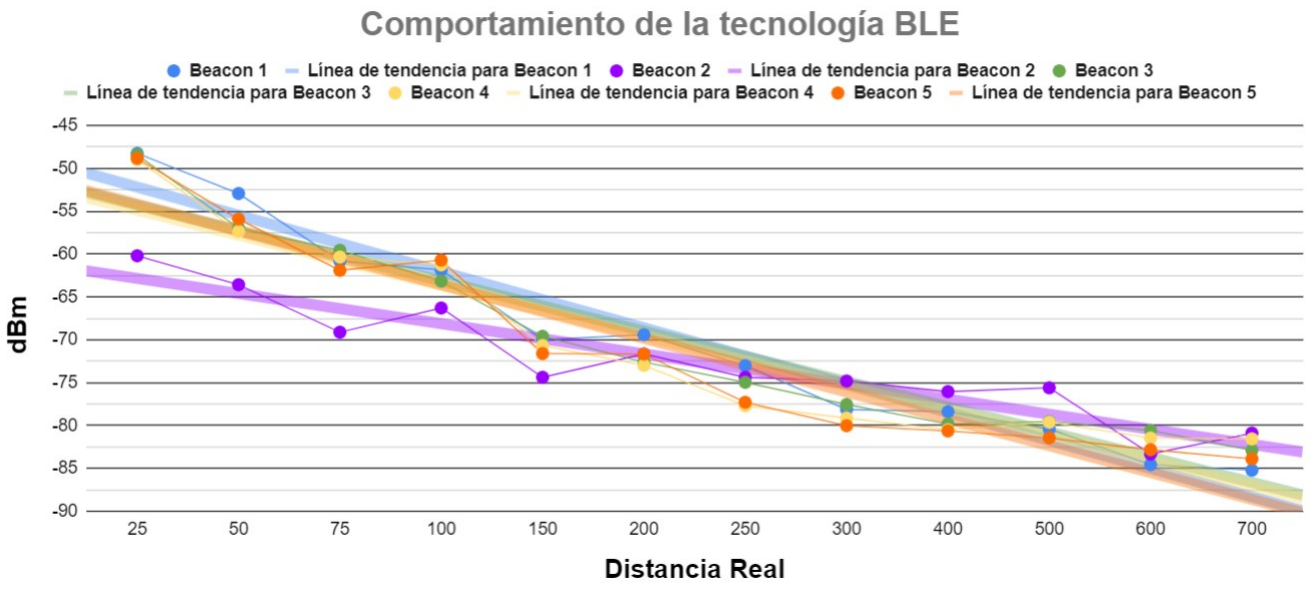


Figura 4. Gráfica del comportamiento del RSSI de los beacons

La tercer y cuarta prueba se llevaron a cabo de igual manera y con las mismas configuraciones a excepción de que el receptor se encontraba con una orientación de 180° y 270° respectivamente. Este proceso se repitió para cada una de las 12 distancias establecidas y por cada emisor (beacon). De cada emisor se obtuvieron 1488 lecturas de señales, dando un total 7440 lecturas de señales de los 5 emisores, mismas que fueron procesadas.

Una vez finalizada la etapa de recopilación de las señales se procesaron con el lenguaje de programación Pyhton para obtener los promedios de las lecturas, los cuales se presentan en la Tabla 2. En esta tabla se muestran los promedios del RSSI (Received Signal Strength Indicator, por sus siglas en inglés) obtenidos por cada distancia y en combinación con los diferentes ángulos con que se realizaron las medidas, esto con la intención de tener un valor medio del RSSI sin importar la orientación del dispositivo.

Con los datos recopilados se observa que la señal no es constante, lo cual implica un reto a la hora de calcular la localización del teléfono inteligente en el interior de un edificio.

En la figura 4 se presentan los datos de la tabla 2, así como sus valores de tendencia de cada beacon. Como se mencionó con anterioridad las lecturas de las señales que obtiene el teléfono inteligente, son muy variantes y esto se observa en la gráfica, a pesar de que los experimentos se realizaron bajo las mismas condiciones, los valores promedios son diferentes entre sí en algunos casos. Lo que se esperaba era que los valores obtenidos fueran muy similares a una misma distancia y con un valor menor mientras más alejado se encontraran los dispositivos. Se esperaba que los valores tuvieran un comportamiento muy similar a las líneas de tendencia.

Es de gran interés observar que el comportamiento del beacon 2 es muy distinto al de los demás, por lo que se presume que existió algún tipo de interferencia en el ambiente que no pudo ser controlado como las ondas de radio.

Se observa que en algunos casos el promedio de las lecturas es muy similar como en el caso del beacon 4 a una distancia de 400 cm y el beacon 1 a una distancia de 500 cm con un valor promedio de -80 dBm. Otro caso similar es el del beacon 2 que presenta un valor muy similar de -74 dBm en las distancias de 150, 250 y 300 cm.

En la gráfica se aprecia que, con la configuración utilizada de los beacons a partir de los 600 cm, los valores son muy similares a pesar de la distancia, por lo que se considera que los beacons con esta configuración solo deben de cubrir un radio de 6 metros cada uno, para así mejorar el margen de error en el cálculo de la ubicación del dispositivo en interiores.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo de investigación se presentó un estudio experimental sobre el comportamiento de la señal BLE, en el cual se utilizaron dispositivos beacons de la marca Estimote y un teléfono inteligente (Moto G6 Plus) con el que se realizaron las lecturas del RSSI de cada uno de los beacons.

Aun cuando las pruebas se realizaron en un ambiente controlado, se observó que la intensidad de la señal recibida en los teléfonos inteligentes proveniente de los dispositivos beacons es cambiante, por lo que se recomienda tratar las señales recibidas para así reducir el margen de error a la hora de estimar la localización del dispositivo dentro de un espacio cerrado.

Una ventaja sobre la forma en que se realizó la experimentación es que al utilizar un desarrollo propio y no una aplicación de terceros, se logró el almacenamiento de las 31 señales en cada una de las pruebas, evitando así la manipulación de los equipos y que el cuerpo de una persona generará posibles interferencias o cambios en las

lecturas de las señales. Otra de las ventajas sobre esta experimentación es que el ambiente de pruebas se encontraba lo más controlado posible para evitar una interferencia en las señales. Uno de los inconvenientes detectados es que los beacons no pueden apagarse, así que mientras se realizaba una prueba con alguno de los beacons, los otros permanecían asilados a la distancia envueltos en papel aluminio para evitar que las señales emitidas, generarán interferencia. Consideramos que la mejor manera de realizar las pruebas es realizarlas en un ambiente real para que así se consideren todos los factores.

Como trabajo futuro se continuará con más pruebas utilizando más dispositivos beacons, además de ampliar las configuraciones de los dispositivos beacons en cuanto a su potencia de transmisión (TX) e intervalo de envío de paquetes. También se agregarán otros teléfonos inteligentes a los experimentos para la lectura del RSSI de los beacons, esto con el fin de observar si la señal se comporta de la misma manera independientemente del teléfono inteligente o de la antena receptora que contenga. Además, se realizarán pruebas con obstáculos (comunes de espacios cerrados) entre el emisor y receptor, como muebles de oficina, muros falsos, paredes de concreto, de block, de ladrillo, puertas de vidrio y de madera, así como con personas, entre otros obstáculos.

REFERENCIAS

Caballero de Tineo, A. A. (2016). *Beacons ble (bluetooth low energy) en el sector turístico, control de afluencia y servicios de valor añadido* (Tesis Doctoral no publicada). Universitat Oberta de Catalunya.

Cervantes, D., Martínez, A., Mosiño, J., y Ortiz, J. (2019). Localización de dispositivos móviles en espacios cerrados utilizando la tecnología de beacons. *Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada*, *2*. urlhttps://www.cenidet.edu.mx/archivos/electronica/revista%20JCyTA/Revista%20JCyTA%20Vol.%202.%20Abril%20de%202019.pdf. (Accesado 07 Marzo 2020)

Davidson, P., y Piché, R. (2017, Secondquarter). A survey of selected indoor positioning methods for smartphones. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, *19*(2), 1347-1370. doi: 10.1109/COMST.2016.2637663

Estimote, Inc. (2018). *How to configure Estimote Location Beacons for Indoor Location* `https://community.estimote.com/hc/en-us/articles/203821206-How-to-configure-Estimote-Location-Beacons-for-Indoor-Location-`. (Accesado 07 Marzo 2020)

Faragher, R., y Harle, R. (2015, Nov). Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, *33*(11), 2418-2428. doi: 10.1109/JSAC.2015.2430281

Gu, F., Hu, X., Ramezani, M., Acharya, D., Khoshelham, K., Valaee, S., y Shang, J. (2019, 05). Indoor localization improved by spatial context - a survey. *ACM Computing Surveys*.

He, S., y Shin, K. G. (2018). Geomagnetism for smartphone-based indoor localization: Challenges, advances, and comparisons. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, *50*(6), 97.

Kriz, P., Maly, F., y Kozel, T. (2016, Mar). Improving indoor localization using bluetooth low energy beacons. *Hindawi Publishing Corporation*, *2016*. doi: http://dx.doi.org/10.1155/2016/2083094

Orujov, F., Maskeliunas, R., Damasevicius, R., Wei, W., y Li, Y. (2018, Jul). Smartphone based intelligent indoor positioning using fuzzy logic. *Future Generation Computer Systems*, *89*. doi: 10.1016/j.future.2018.06.030

Rusli, M. E., Ali, M., Jamil, N., y Din, M. M. (2016, July). An improved indoor positioning algorithm based on rssi-trilateration technique for internet of things (iot). En *2016 international conference on computer and communication engineering (iccce)* (p. 72-77). doi: 10.1109/ICCCE.2016.28

Tahat, A., Kaddoum, G., Yousefi, S., Valaee, S., y Gagnon, F. (2016). A look at the recent wireless positioning techniques with a focus on algorithms for moving receivers. *IEEE Access*, *4*, 6652-6680. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2606486

Zekavat, R., y Buehrer, R. M. (2019). Overview of global positioning systems. En *Handbook of position location: Theory, practice, and advances* (p. 655-705). IEEE. urlhttps://ieeexplore.ieee.org/document/8633807. doi: 10.1002/9781119434610.ch20

Estimación Paramétrica Basada en Modelos de Caja Gris para un Fotobiorreactor Vertical

Alonso Bastida Alexis * **Adam Medina Manuel** *
Franco Nava Miguel Ángel ** **Franco Ortega Juan Carlos** **

* *TECNM/CENIDET, Electronic engineering department, Cuernavaca Morelos, México. (e-mail: alexis.alonso18ea@cenidet.edu.mx).*
** *TECNM, Instituto Tecnológico de Mazatlán, Mazatlán Sinaloa, México.*

Resumen: En este trabajo se propone el desarrollo de una metodología de estimación paramétrica basada en filtros de Kalman extendidos, aplicados a un modelo matemático de la dinámica térmica de un fotobiorreactor de columna vertical con iluminación interna y un intercambiador de calor inmerso en el medio de cultivo. Con respecto a las características del modelo matemático, que se clasifica en tipo de parámetros que son medibles y que otros no lo son, con la finalidad de estimar los parámetros mediante la metodología de los filtros de Kalman extendidos y también de obtener una representación matemática de las temperaturas del fotobiorreactor estudiado que está ubicado en la región de Mazatlán, Sinaloa, México. La estimación de parámetros presentada se llevó a cabo mediante datos experimentales de las temperaturas del sistema con respecto al mes de noviembre del año 2018 de dicha región.

Palabras clave: Fotobiorreactor cerrado, Microalga, Modelos de caja gris, Filtros de Kalman extendidos, Estimación de Parámetros.

1. INTRODUCCIÓN

La problemática en la producción de biomasa microalgal, se encuentra en el control de las condiciones ambientales y nutrimentales necesarias para el crecimiento microalgal. Debido a esto surge la necesidad de desarrollar sistemas en los cuales sea posible cultivar biomasa microalgal, estos sistemas son denominados fotobiorreactores, en los cuales es posible tener un control de dichas condiciones tanto ambientales como nutrimentales, Zhuang et al. (2018).

Estos sistemas pueden ser de tipo abierto o cerrado y dependiendo de este tipo será la finalidad de la producción microalgal que se le pretende dar, ya que dependiendo las características ambientales que se le proporcionan a la microalga serán las propiedades nutrimentales que llegará a tener el producto final García-Mañas et al. (2019).

Las condiciones necesarias para un buen crecimiento de las microalgas, radican en ciertos factores como lo son la luminiscencia, la temperatura, el pH, el CO_2, la remoción de O_2, entre otros factores, donde cada uno de ellos afecta de manera específica en las propiedades de la microalga y determinan si es o no posible el crecimiento microalgal en el sistema Rost et al. (2017).Nalley et al. (2018) examina 26 especies de microalgas de 5 grupos funcionales diferentes, cultivándolas a 6 temperaturas diferentes entre 9 y 32° C, para recolectar datos de rasgos ecofisiológicos como lo son las tasas de crecimiento máximas, temperaturas óptimas, anchos de nicho térmico y límites de temperatura inferior y superior para el crecimiento. Demostrando que la temperatura afecta significativamente la productividad general de biomasa microalgal.

En este trabajo la principal problemática reside en el control del sistema térmico de un fotobiorreactor de columna vertical con iluminación interna y un intercambiador inmerso en el medio de cultivo Jiménez-González et al. (2017) , ya que actualmente no se cuenta con un modelo matemático representativo del sistema, con el cual sea posible conocer las interacciones de las temperaturas para aplicaciones de control térmico futuras.

El uso de modelos matemáticos en los fotobiorreactores representa una gran herramienta para llevar a cabo experimentación de manera virtual con la finalidad de obtener aproximaciones del comportamiento de las variables de interés del sistema Sänchez et al. (2013). Schreiber et al. (2017) desarrolla un modelo matemático para la predicción del crecimiento microalgal con respecto a la temperatura del medio ambiente de la región de Alemania. Solimeno et al. (2017) menciona que el uso de los modelos matemáticos en los fotobiorreactores va día con día en aumento debido a las nuevas características

⋆ Este trabajo se realizó con el apoyo del proyecto TecNM-6116.17-P y el CONACYT

físicas de los fotobiorreactores, con lo cual con dichos modelos se pretende tener un mayor entendimiento del proceso tan complejo que se desarrolla para la producción de biomasa microalgal y poder aplicar metodologías de control adecuadas en el sistema. Khichi et al. (2018) desarrolla un modelo matemático de un fotobiorreactor de paneles planos, el cual está basado en las condiciones de luminiscencia del sistema con respecto a la concentración de lípidos en la producción de biomasa microalgal, este modelo es desarrollado con la finalidad de predecir las dinámicas del sistema, así como obtener valores óptimos del transporte de la luz en los fotobiorreactores para la producción de biomasa y lípidos de la misma.

Debido a que, en la mayoría de los casos del desarrollo de modelos matemáticos para procesos bioquímicos, estos modelos son identificados mediante metodologías de modelos de caja gris, estos modelos no cuentan con una caracterización completa de todos los parámetros del sistema, ya que por lo general estos parámetros no están disponibles para ser medidos. Por ello es que se realizan métodos de estimación paramétrica para obtener dichos parámetros faltantes en los modelos matemáticos. Jiménez-González et al. (2017) desarrolla una identificación de un modelo de un fotobiorreactor de columna vertical basada en modelos de caja gris, para el cual utiliza algoritmos de filtros de Kalman unscented para la estimación de parámetros debido a que estos métodos han presentado buenos resultados con respecto a sistemas altamente no lineales.

Por lo tanto, con respecto a lo anteriormente mencionado lo que se busca obtener de este trabajo de investigación es una representación matemática característica de la dinámica térmica del sistema fotobiorreactor, todo esto basado en una identificación por medio de modelos de caja gris, tomando en cuenta una expresión matemática del sistema de la cual existe una falta de caracterización en ciertos parámetros del sistema que para este caso no son medibles. Por lo que es necesario implementar metodología de estimación paramétrica, con la finalidad de obtener dicha caracterización del modelo del sistema fotobiorreactor. Para este trabajo se optó por un filtro de Kalman extendido debido a que presenta bueno resultados con respecto a sistemas altamente no lineales.

1.1 Objetivo del trabajo

Realizar una estimación paramétrica por medio de la metodología de los filtros de Kalman extendidos para sistemas no lineales de un modelo térmico para un fotobiorreactor de columna vertical escala piloto con iluminación interna y un intercambiador de calor inmerso en el medio de cultivo. Con la finalidad de que en etapas posteriores se pueda realizar control mediante observadores de los estados del sistema, gracias a contar con una caracterización adecuada los parámetros que no son medibles en el sistema y pueden proporcionan una aproximación matemática representativa de las temperaturas analizadas del fotobiorreactor.

1.2 Descripción del sistema

El fotobiorreactor estudiado tiene las siguientes características descritas por Jiménez (2017):

- Fotobiorreactor: Tipo columna vertical con iluminación interna y un intercambiador de calor inmerso en el medio de cultivo.
- Dimensiones: altura del recipiente de 1,50m diámetro exterior de 0,30m, cámara interna con 0,10m de diámetro y una altura de 1,60m, capacidad volumétrica de 80m^3.
- Fuente de iluminación: Lámpara LED de 12x10$^3 lm$, esta lámpara consiste en una estructura de aluminio sobre la que van montados 16 segmentos de 1,25m de longitud de tiras LED de luz blanca a 6500K.
- Actuadores del sistema
  - Sistema de inyección de CO_2.
  - Rotámetro manual para gases.
- Instrumentos de medición
  - *Thermo Scientific Orion 5 Star* (medidor multiparámetros): Monitoreo de temperatura, salinidad y pH del cultivo.
  - *Amprobe* (CO_2-100): Monitoreo de datos de temperatura del aire y de la concentración de CO_2 atmosférico.
  - *Extech 407026* (Luxómetro).
  - *Sensor LM35*: Monitoreo de la temperatura.

En la Figura 1, se presenta un diagrama de la estructura del fotobiorreactor analizado. De esta figura se puede apreciar que el sistema se divide en subsistemas, esto con la finalidad de aplicar un análisis energético para cada uno de los subsistemas. Los subsistemas examinados son los siguientes: La cámara interna (donde se encuentra confinada la lámpara que es la fuente de iluminación de medio de cultivo), el medio de cultivo (sección donde el alga se reproduce) y el sistema del intercambiador de calor (conformado por un sistema de recirculación de refrigerante que va desde un depósito del refrigerante a un sistema de enfriamiento, posteriormente hacia el medio de cultivo para producir el intercambio de calor y por último volver a regresar al depósito del mismo).

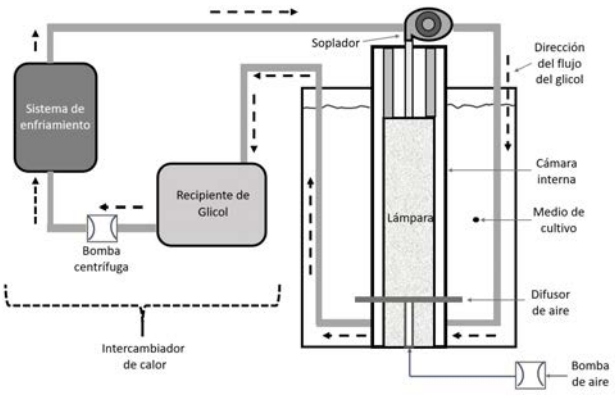


Figura 1. Esquema del fotobiorreactor analizado.

2. MODELO DE CAJA GRIS

Para el desarrollo de un modelo matemático del sistema fotobiorreactor existen diferentes enfoques de identificación, en este trabajo se propone el uso de la metodología de modelos de caja gris, para la cual por medio del conocimiento previo de la dinámica de las temperaturas de sistema, se obtiene una representación matemática que en conjunto con un filtro de Kalman extendido y datos experimentales permiten estimar los parámetros que no son medibles en el modelo para obtener una correcta caracterización del modelo matemático del sistema térmico del fotobiorreactor estudiado.

2.1 Trabajos basados en modelos de caja gris

Farza et al. (2019) desarrolla una identificación de un modelo matemático del crecimiento microalgal en un fotobiorreactor, en la cual aplica un observador de alta ganancia para la estimación de parámetros desconocidos del crecimiento microalgal con respecto a la concentración del dióxido de carbono disuelto en el medio de cultivo.

Tebbani et al. (2013) mediante de una metodología de caja gris aplica un filtro de Kalman unscented para la estimación de componentes de la concentración de dióxido de carbono y oxígeno para las concentraciones de biomasa de la microalga Chlamydomonas reinhardtii. Con respecto a datos experimentales es que se valida dicha experimentación de los parámetros para la identificación de modelo matemático del fotobiorreactor.

2.2 Modelo dinámico del sistema

El modelo matemático presentado en las ecuaciones (1-3) es el resultado del conjunto de balances de energía del sistema térmico del fotobiorreactor, de este sistema se desglosan tres interacciones principales que son la temperatura de la cámara interna del fotobiorreactor (T_{ch}, ecuación 1), la temperatura del medio de cultivo (T_w, ecuación 2) y la temperatura de salida del intercambiador de calor (T_e, ecuación 3).

$$\dot{T_{ch}} = \frac{G_{l\to ch}}{C_{ch}}\left(\left(\frac{p_l u_l + G_{l\to ch}T_{ch}}{G_{l\to ch}}\right) - T_{ch}\right) - \frac{G_{ch\to w}}{C_{ch}}\left(T_{ch} - T_w\right) - \frac{c_a}{C_{ch}}\left(u_b F_b + \rho_{ch} C^d \left(\frac{g H_{ch}\left|T_{ch} - T_r\right|}{T_r}\right)^{\frac{1}{2}}\right)\left(T_{ch} - T_r\right) \quad (1)$$

$$\dot{T_w} = \frac{G_{ch\to w}}{C_w}\left(T_{ch} - T_w\right) + \frac{G_{w\to e}}{C_w}\left(T_w - T_e\right)u_e + \frac{G_{r\to w}}{C_w}\left(T_r - T_w\right) \quad (2)$$

$$\dot{T_e} = \frac{G_{l\to e}}{C_e}\left(\left(\frac{P_l u_l + G_{lch}T_{ch}}{G_{lch}}\right) - T_e\right) - \frac{G_{w\to e}}{C_e}\left(T_w - T_e\right) + u_e\left(\frac{F_e C_{pe}}{w_{11}}\right)\left(T_e - T_{ein}\right) \quad (3)$$

Donde T_{ch} es la temperatura de la cámara interna del fotobiorreactor, T_w es la temperatura, G es la conductividad térmica, C es la capacidad calorífica, c_a es la capacidad calorífíca específica, F es el flujo másico, g es la gravedad, H es la altura, u es un ciclo de trabajo, P es la potencia de la lámpara, ρ es la densidad del aire contenido en la cámara interna del fotobiorreactor, ch es la cámara interna del sistema, w es el medio de cultivo del sistema, e es el intercambiador de calor del sistema, b es sistema de refrigeración de la lampara del sistema, r es la temperatura del laboratorio.

3. FILTRO DE KALMAN EXTENDIDO

El filtro de Kalman extendido es un algoritmo basado en métodos matemáticos recursivos, con el cual es posible estimar parámetros y estados de un sistema dinámico no lineal, Simón (2006). El filtro de Kalman extendido es compuesto por las ecuaciones presentadas en la tabla 1.

Tabla 1. Algoritmo de estimación de parámetros basado en un filtro de Kalman extendido

Sistema no lineal variante el tiempo	
$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k,$	(4)
$y_k = g(x_k, u_k) + v_k.$	(5)
Fuera de línea	
$A_k = \frac{\partial f(W_k, u_k)}{\partial_X},$	(6)
$C_k = \frac{\partial g(W_k, u_k)}{\partial_W}.$	(7)
Condiciones iniciales	
$\hat{W}_0 = E[W],$	(8)
$P_{W_0} = E[(W - \hat{W}_0)(W - \hat{W}_0)^T].$	(9)
Predicción	
$\hat{W}_k^- = \hat{W}_{k-1},$	(10)
$P_k^- = P_{k-1} + R_{k-1}.$	(11)
Corrección	
$K_k = P_k^- C_k^T (C_k P_k^- C_k^T + R)^{-1},$	(12)
$\hat{W}_k = \hat{W}_k^- + K_k e,$	(13)
$P_{Wk} = (I - K_k C_k) P_{Wk}^-.$	(14)

Como se puede apreciar en la tabla 1, es necesario contar con un sistema no lineal variante el tiempo (ecuación 4-5), donde $f(.)$ y $g(.)$ son funciones no lineales del sistema dinámico. Con respecto a dicho sistema se hace el cálculo de las matrices jacobianas (ecuaciones 6-7) del sistema dinámico y de sus mediciones. Estas matrices son calculadas analíticamente fuera de línea y son discretizadas y evaluadas en cada iteración del proceso. Cada iteración del algoritmo consta de dos etapas, la etapa de predicción y la de corrección. En la etapa de predicción se hace el cálculo a *priori* de los parámetros estimados ($\hat{W}_k^-$) y el error de covarianza (P_k^-), en la etapa de corrección se hace el cálculo de la ganancia de Kalman (K), posteriormente se calcula el parámetro estimado a *posteriori* ($\hat{W}_k$) resultado de la estimación del parámetro a *priori* y el producto de la ganancia de Kalman por el error de estimación y finalmente se desarrolla el error de covarianza a *posteriori* (P_{Wk}).

4. RESULTADOS

4.1 Condiciones de la experimentación

La estimación paramétrica del modelo matemático del sistema se desarrolló con base a los siguientes aspectos:

 ISSN en trámite

- Planteamiento del modelo matemático: Con respecto a las interacciones térmicas del sistema se plantea un balance de energía para cada uno de los subsistemas planteados, con la finalidad de obtener representaciones matemáticas de las temperaturas del sistema.
- Adecuaciones del modelo para la implementación del filtro de Kalman extendido: Se realizó un cambio de variables tanto de las temperaturas del sistema (representados por el vector X, ecuación 18) y los parámetros a estimar del sistema (representados por el vector W, ecuación 19). Las ecuaciones (15-17) representan el resultado final de este cambio de variables:

$$\dot{x_1} = w_1\left(\left(\frac{p_l u_l + w_2 x_1}{w_2}\right) - x_1\right) - w_3\left(x_1 - x_2\right) - w_4\left(u_b F_b + \rho_{ch} w_5\left(\frac{g H_{ch}\left|x_1 - T_r\right|}{T_r}\right)^{\frac{1}{2}}\right)\left(x_1 - T_r\right), \tag{15}$$

$$\dot{x_2} = w_6\left(x_1 - x_2\right) + w_7\left(x_2 - x_3\right)u_e + w_8\left(T_r - x_2\right), \tag{16}$$

$$\dot{x_3} = w_9\left(\left(\frac{P_l u_l + w_2 x_1}{w_2}\right) - x_3\right) - w_{10}\left(x_2 - x_3\right) + u_e\left(\frac{F_e C_{pe}}{w_{11}}\right)\left(x_3 - T_{ein}\right). \tag{17}$$

$$x = [T_{ch},\ T_w,\ T_e\ ] \tag{18}$$

$$w = \left[\frac{G_{l\to ch}}{C_{ch}},\ G_{l\to ch},\ \frac{G_{ch\to w}}{C_{ch}},\ \frac{c_a}{C_{ch}},\ C^d,\ \frac{G_{ch\to w}}{C_w},\ \frac{G_{w\to e}}{C_w},\ \frac{G_{r\to w}}{C_w},\ \frac{G_{l\to e}}{C_e},\ \frac{G_{w\to e}}{C_e}, C_e\right] \tag{19}$$

- Obtención de datos experimentales: Con base a las experimentaciones realizadas en el fotobiorreactor, se desarrolla una base de datos para la estimación paramétrica. En esta base de datos se consideran las mediciones de las temperaturas, así como de la dinámica de los actuadores del sistema y consta de 3800 datos, considerando un tiempo de muestreo de 12 muestras por minuto, de esta base de datos se consideran 2000 datos para la estimación y los datos restantes se consideraron para la validación del modelado.
- Puesta en marcha del filtro de Kalman extendido: Una vez obtenido tanto la representación matemática del sistema y se han definido que parámetros son necesarios estimar (en este caso particular se consideran 11 parámetros a estimar), se procede a aplicar un filtro de Kalman extendido discreto de dos grados de libertad (Considerando nuestra matriz "K" y "P" como dichos grados de libertad) con respecto a los datos experimentales obtenidos.
- Cálculo del error de las temperaturas reales del sistema con respecto a las temperaturas estimadas (dicha estimación es producto de la sustitución de los parámetros estimados en el modelo matemático propuesto).

4.2 Estimación de parámetros y estados

En la Figura 2, se presenta la temperatura de la cámara interior del fotobiorreactor con respecto a los datos experimentales del sistema y el método de estimación paramétrica utilizado. El color anaranjado representa la temperatura real del sistema a estimar y el color azul representa el filtro de Kalman extendido. Como se puede apreciar la señal es muy ruidosa debido a que se presentan muchas fluctuaciones en la temperatura por ser una temperatura del aire que se encuentra confinado en la cámara interior. Los cambios drásticos de la temperatura se deben al sistema de protección de la lámpara interior, en el cual, al sobrepasar una temperatura de 318 K, se activa un ventilador con el cual se reduce la temperatura de la lámpara.

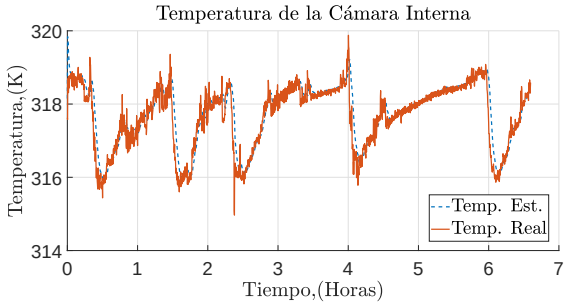


Figura 2. Comparación de las temperaturas de la cámara interna del sistema.

En Figura 3, se ilustra la temperatura del medio de cultivo del fotobiorreactor (color anaranjado), así como la temperatura estimada con respecto al método del filtro de Kalman extendido (color azul). Con el método de estimación utilizado se obtuvieron resultados adecuados, ya que la dinámica del sistema es muy parecida a la del sistema real, aun cuando el sistema presenta un comportamiento altamente no lineal la señal estimada logra obtener una gran semejanza de la real tomando en cuenta la señales de error presentadas posteriormente.

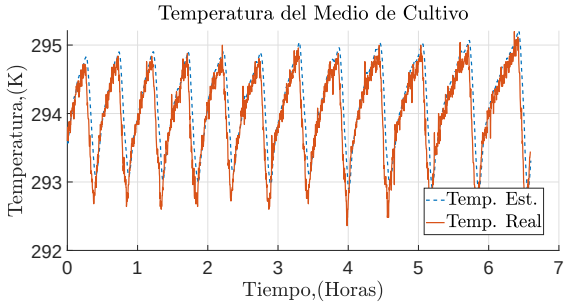


Figura 3. Comparación de las temperaturas del medio de cultivo del sistema.

Con respecto a la temperatura de salida del intercambiador de calor, en Figura 4 se presenta su dinámica real del sistema (color anaranjado), la dinámica estimada por medio del método del filtro de Kalman extendido (color azul). Como se puede apreciar por medio de la ecuación de caja gris planteada para la temperatura de la salida del intercambiador de calor no se logra la mejor estimación del sistema, esto es debido a los sobre picos del sistema real.

 ISSN en trámite

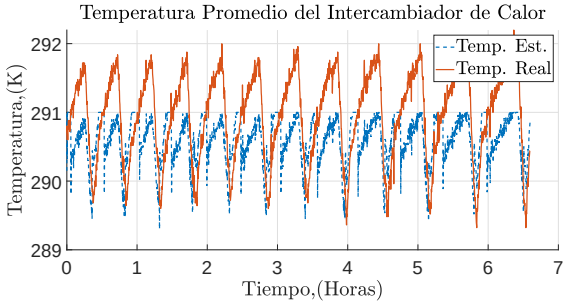


Figura 4. Comparación de las temperaturas de la salida del refrigerante del intercambiador de calor del sistema.

4.3 Parámetros estimados

Los parámetros estimados en el modelo térmico de caja gris con respecto al fotobiorreactor analizado se describen en la Tabla 2, en la cual se presenta el parámetro estimado, sus unidades y su valor estimado promedio (obtenido una vez que la estimación del filtro de Kalman entra en estado estable).

Tabla 2. Parámetros estimados del sistema

Parámetro	Unidades	Valor Númerico
$\frac{G_{l\to ch}}{C_{ch}}$	$mKs^{-2}J^{-1}$	0.0029
$G_{l\to ch}$	ms^{-2}	1.6277
$\frac{G_{ch\to w}}{C_{ch}}$	$mKs^{-2}J^{-1}$	0.0018
$\frac{c_a}{C_{ch}}$	kg^{-1}	0.0040
C^d	–	0.0204
$\frac{G_{ch\to w}}{C_w}$	$mKs^{-2}J^{-1}$	2.4777x10^{-4}
$\frac{G_{w\to e}}{C_w}$	$mKs^{-2}J^{-1}$	0.0049
$\frac{G_{r\to w}}{C_w}$	$mKs^{-2}J^{-1}$	0.0066
$\frac{G_{l\to e}}{C_e}$	$mKs^{-2}J^{-1}$	0.0020
$\frac{G_{w\to e}}{C_e}$	$mKs^{-2}J^{-1}$	1.4999
C_e	$Jkg^{-1}K^{-1}$	450

4.4 Error cuadrático medio

La Tabla 3 muestra el Error Cuadrático Medio (ECM) del modelo matemático con respecto a los datos experimentales haciendo una comparación de los estados reales del sistema versus los estados estimados (Obtenidos al sustituir los valores de los parámetros estimados en las ecuaciones del modelo matemático) con respecto a la técnica de estimación utilizada.

Tabla 3. Error cuadrático medio de los estados del sistema

Estado	Unidades	Error
T_{ch}	K	0.0869
T_w	K	0.0243
T_e	K	0.1162

4.5 Simulación del sistema en lazo abierto

En la Figura 5 se muestra la prueba considerando encendido el actuador, donde la temperatura de la cámara interna está representada por el color azul, la temperatura de medio de cultivo se encuentra representada por el color rojo y por último la temperatura a la salida del intercambiador de calor se encuentra representada por el color amarillo. Con los resultados arrojados de la simulación el sistema se determina que después de la hora 80 todas las temperaturas del sistema entran en estado estable, apreciando que la temperatura de la cámara interna es la que se tarda más en estabilizarse.

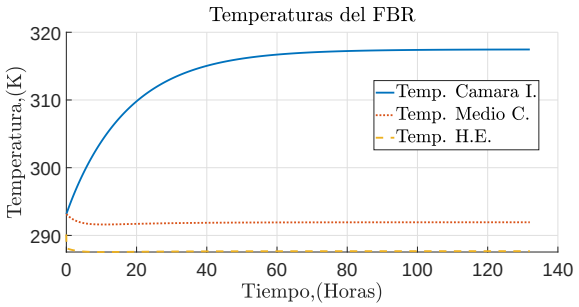


Figura 5. Simulación del modelo matemático en lazo abierto considerando $u_e = 1$.

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo matemático de las temperaturas de un fotobiorreactor de columna vertical con iluminación interna y un intercambiador de calor inmerso en el medio de cultivo. Este modelo fue desarrollado con respecto a la metodología de caja gris, en la cual se desarrollaron balances de energía para obtener las ecuaciones matemáticas del sistema y se aplicó un filtro de Kalman extendido discreto para la estimación de los parámetros no medibles del sistema, con la finalidad de caracterizar el modelo matemático propuesto. Los resultados obtenidos de la estimación paramétrica basada en un filtro de Kalman extendido discreto resultan ser viables para su aplicación en este tipo de procesos, ya que con base en el error cuadrático medio (ECM) de los valores de temperatura estimada con respecto a los valores reales de nuestro sistema, se obtuvieron valores del ECM por debajo de los 0.12 K en todas las estimaciones, lo cual nos garantiza que la estimación tendrá una dinámica muy similar a la del sistema. Cabe resaltar que para este trabajo las mejores estimaciones se obtuvieron en las temperaturas de la cámara interna y el medio de cultivo en donde el EMC obtuvo valores por debajo de 0.09 K. Por lo tanto, el aplicar modelos de caja gris para este tipo de sistemas da como resultado el tener un conocimiento más profundo de la dinámica del sistema, lo cual resulta ser de gran ayuda para diversos tipos de experimentación, ya que se pueden obtener aproximaciones de los resultados finales que nos da como resultado el conocimiento del comportamiento que puede llegar a tener el sistema real.

REFERENCIAS

Farza, M., Rodriguez-Mata, A., Robles-Magdaleno, J., and M'Saad, M. (2019). A new filtered high gain observer design for the estimation of the components concentrations in a photobioreactor in microalgae culture. *IFAC-PapersOnLine*, 52(1), 904–909. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.06.177.

García-Mañas, F., Guzmán, J., Berenguel, M., and Acién, F. (2019). Biomass estimation of an industrial raceway photobioreactor using an extended kalman filter and a dynamic model for microalgae production. *Algal Research*, 37, 103–114. doi:10.1016/j.algal.2018.11.009.

Jiménez-González, A., Adam-Medina, M., Franco-Nava, M., and Guerrero-Ramírez, G. (2017). Grey-box model identification of temperature dynamics in a photobioreactor. *Chemical Engineering Research and Design*, 121, 125–133. doi:10.1016/j.cherd.2017.03.004.

Jiménez, A.G. (2017). *Diseño, Modelado y Control de un Fotobiorreactor*. Ph.D. thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

Khichi, S.S., Anis, A., and Ghosh, S. (2018). Mathematical modeling of light energy flux balance in flat panel photobioreactor for botryococcus braunii growth, CO 2 biofixation and lipid production under varying light regimes. *Biochemical Engineering Journal*, 134, 44–56. doi:10.1016/j.bej.2018.03.001.

Nalley, J.O., ODonnell, D.R., and Litchman, E. (2018). Temperature effects on growth rates and fatty acid content in freshwater algae and cyanobacteria. *Algal Research*, 35, 500–507. doi:10.1016/j.algal.2018.09.018.

Rost, E.J., Perales, S.G., Carstens, M.R., and Pérez, L.B. (2017). Modelado de la producción de biomasa microalgal en un fotobiorreactor de burbujeo anular y configuración variable. *Información tecnológica*, 28(2), 95–104. doi:10.4067/s0718-07642017000200011.

Schreiber, C., Behrendt, D., Huber, G., Pfaff, C., Widzgowski, J., Ackermann, B., Müller, A., Zachleder, V., Moudříková, Š., Mojzeš, P., Schurr, U., Grobbelaar, J., and Nedbal, L. (2017). Growth of algal biomass in laboratory and in large-scale algal photobioreactors in the temperate climate of western germany. *Bioresource Technology*, 234, 140–149. doi: 10.1016/j.biortech.2017.03.028.

Solimeno, A., Acíen, F.G., and García, J. (2017). Mechanistic model for design, analysis, operation and control of microalgae cultures: Calibration and application to tubular photobioreactors. *Algal Research*, 21, 236–246. doi:10.1016/j.algal.2016.11.023.

Sänchez, J., Dormido, R., Duro, N., Fernändez, I., and Dormido, S. (2013). A virtual laboratory for tubular photobioreactors for outdoor microalgae culture. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(17), 297–302. doi: 10.3182/20130828-3-uk-2039.00066.

Tebbani, S., Titica, M., Caraman, S., and Boillereaux, L. (2013). Estimation of chlamydomonas reinhardtii growth in a torus photobioreactor. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(31), 72–77. doi:10.3182/20131216-3-in-2044.00053.

Zhuang, L.L., Yu, D., Zhang, J., fei Liu, F., Wu, Y.H., Zhang, T.Y., Dao, G.H., and Hu, H.Y. (2018). The characteristics and influencing factors of the attached microalgae cultivation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1110–1119. doi: 10.1016/j.rser.2018.06.006.

Validación del método activo anti-isla cambio de frecuencia sandia

Rodrigo Briones Sánchez*. Jorge Hugo Calleja Gjumlich. Rodolfo Amalio Vargas Méndez***.**

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, (Tel:2411201727; e-mail: rodrigo.briones18ea@cenidet.edu.mx)*
*** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, (e-mail: hcalleja@cenidet.edu.mx)*
**** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, (e-mail: rodolfovm@cenidet.edu.mx)*

Resumen: Este artículo resume las técnicas anti-islas más comunmente usadas en inversores fotovoltaicos. Se presenta la selección del método activo anti-isla Cambio de Frecuencia Sandia (CFS) y la simulación de un inversor monofásico interconectado a red, dando lugar a un sistema de interconexión mas robusto y seguro, capaz de cumplir con el estándar IEEE std 929-2000.

*Palabras clave**:** anti-isla; método activo; inversor monofásico; fotovoltaico; zona de no detección*

1. INTRODUCCIÓN

El constante incremento de fuentes renovables conlleva a utilizar equipos electrónicos que transforman la energía para su correcto uso, tal como el caso de la solar fotovoltaica. Un sistema solar fotovoltaico (SSFV) está comprendido por un panel fotovoltaico, un convertidor CD/CD normalmente topología *boost* y un inversor normalmente puente completo. Si el SSFV es interconectado a red, es necesario un filtro y un circuito de sincronización que garantice que la salida del inversor estará en fase con el sistema de red eléctrica.

Un SSFV es muy usado en viviendas y ayudan a disminuir el consumo energético. Al estar interconectados a red en un nodo llamado Punto de Conexión Común (PCC), el nuevo sistema inversor-red eléctrica está dirigido por la gran red, por lo que ésta impone parámetros como voltaje y frecuencia. Ambos sistemas funcionan simultáneamente, por lo que el costo de la energía que suministre una compañía es mucho menor y representa un ahorro a largo plazo. Sin embargo, es importante que el SSFV funcione únicamente cuando la red eléctrica está en funcionamiento, que, por el contrario, si hay una desconexión por parte de la red eléctrica y el SSFV sigue funcionando, se dice que se forma una isla.

Existen métodos activos y pasivos para la detección de islas en sistemas interconectados a red. Los métodos pasivos se basan en la detección y monitoreo de parámetros seleccionados, como voltaje y frecuencia, además, tienen una amplia zona de no detección (NDZ). Los tres métodos más ampliamente usados son: protección de sobre/sub tensión (PSOV/PSUV), protección de sobre/sub frecuencia (PSOF/PSUF) y salto de fase (Teoh and Tan, 2011).

Los métodos activos son aquellos que introducen perturbaciones intencionadamente, posteriormente se monitorea la respuesta para determinar si la red aún está conectada al PCC. Los métodos activos tienen una NDZ menor a los métodos pasivos, esta zona es un espacio en el que es imposible detectar si ha ocurrido una condición de isla. Los dos métodos más ampliamente usados son: cambio de frecuencia sandia (CFS) (Reis et al., 2015) y cambio de voltaje sandia (CVS) (Ye et al., 2004).

2. CAMBIO DE FRECUENCIA SANDIA

El cambio de frecuencia sandia (CFS) usa la realimentación positiva para la detección de islas. La realimentación se aplica sobre la frecuencia del voltaje en el PCC. Se detecta cualquier cambio de frecuencia para amplificarlos; si la red está conectada, impide la amplificación de tales cambios, pero si la red se desconecta, la diferencia de frecuencia será amplificada y el error aumentará hasta alcanzar los límites de PSUF/PSOF que terminarán por desactivar el inversor. Este método tiene una de las menores NDZ de entre todos los métodos activos. Una de sus desventajas es que baja ligeramente la calidad de la potencia cuando está conectada la red debido a que cualquier cambio pequeño en la red será amplificado. A pesar de ello, ofrece un buen compromiso entre eficiencia de detección de islas y calidad de la potencia del inversor (Xingchi et al., 2018).

 ISSN en trámite

El CFS consiste en la deformación de la señal de referencia del inversor, agregando tiempos muertos para aumentar la frecuencia en el PCC. La frecuencia se monitorea constantemente debido a que los tiempos muertos están en función de la frecuencia medida (Vahedi and Karrari, 2012). La Fig. 1 muestra la señal de referencia, que es una modificación de una sinusoidal agregando valores ceros o tiempos muertos que se traducen en un cruce por cero antes de lo normal, obteniendo como resultado una mayor frecuencia.

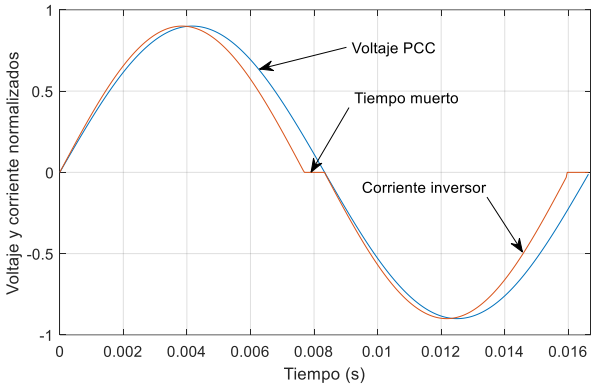


Fig. 1. Señal de corriente modificada por el método CFS. En rojo la señal modificada de corriente y en azul la señal de voltaje.

El tiempo muerto añadido se llama fracción de corte c_f y es diferente para cada ciclo, ya que depende de un corte inicial y un tiempo extra que está en función de la frecuencia medida, como se muestra en (1) (Reis et al., 2015).

$$cf_k = cf_0 + k(f_k - f_0) \qquad (1)$$

Donde c_{f0} es el corte inicial, k es el parámetro de ganancia de realimentación, f_k es la frecuencia medida en el PCC y f_0 es la frecuencia de la red. En México f_0 es de 60 Hz.

El diagrama de flujo del método CFS se muestra en la Fig. 2.

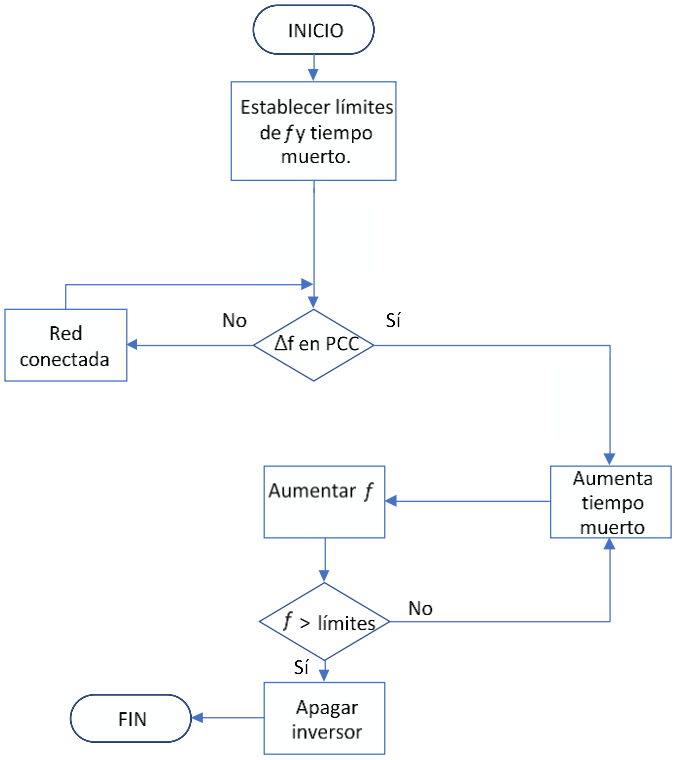


Fig. 2. Diagrama de flujo del método CFS.

3. PRUEBA DE CONDICIÓN DE ISLA

Un esquema genérico para el estudio en la detección de islas se muestra en la Fig. 3. El circuito es el mismo diagrama definido en IEEE 929-2000 y UL 1741 así como en IEEE 1547. Existen ciertas condiciones definidas para una prueba de isla, las cuales son (Ko et al., 2006):

1) La frecuencia de resonancia de la carga RLC debe ser la misma frecuencia de la red.

2) El factor de calidad debe ser igual a 1 y puede ser llevado hasta 2.5.

3) La potencia generada por la fuente de generación distribuida (GD) debe coincidir con la potencia consumida por la carga, es decir, $\Delta Q = \Delta P = 0$.

 ISSN en trámite

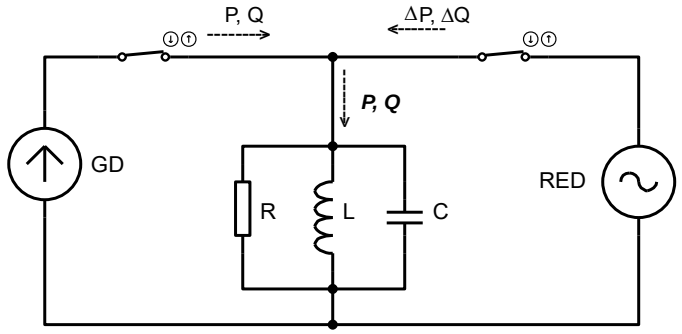


Fig. 3. Esquema genérico para el estudio de islas.

$$R = \frac{V_{RMS}^{\ 2}}{P} \tag{2}$$

$$L = \frac{V_{RMS}^{\ 2}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Q_f \cdot P} \tag{3}$$

$$C = \frac{Q_f \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_{RMS}^{\ 2}} \tag{4}$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}} \tag{5}$$

Donde:

R es la carga resistiva en ohm, C es la carga capacitiva en Faradio, L es la carga inductiva en Henry, f es la frecuencia de la red en Hz, P es la potencia real en W y Q_f es el factor de calidad (Ko et al., 2006, Ye et al., 2004).

5. SIMULACIÓN

El esquema utilizado para simular en MATLAB *Simulink* una condición de isla se muestra en la Fig. 4 (Hong and Huang, 2014).

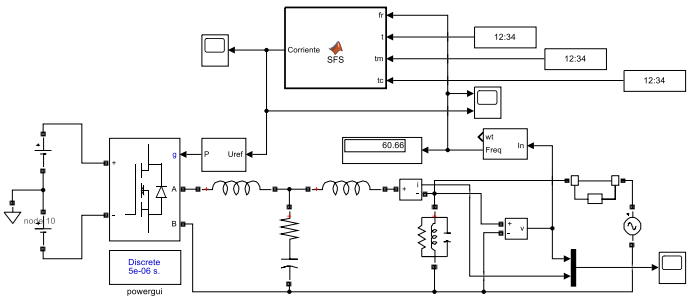


Fig. 4. Esquema de simulación en MATLAB *simulink*.

El esquema se conforma por un inversor puente completo unipolar, un filtro LCL amortiguado, una carga RLC sintonizada bajo las condiciones de la prueba de isla, la red, un interruptor programado para abrirse y desconectar la red, un PLL para medir la frecuencia y una función de MATLAB con la que se programó el método CFS. Los parámetros de la simulación se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros de simulación

Símbolo	Valor	Símbolo	Valor
V_{CD}	200 V	Q_f	1
f_{red}	60 Hz	R_{filtro}	8.73 Ohm
R_{carga}	16.2 Ohm	Li_{filtro}	20 mH
L_{carga}	43 mH	Lo_{filtro}	20 mH
C_{carga}	163.74 uF	C_{filtro}	130.99 uF
$f_{interruptor}$	7 kHz	V_{RMS}	127.27 V

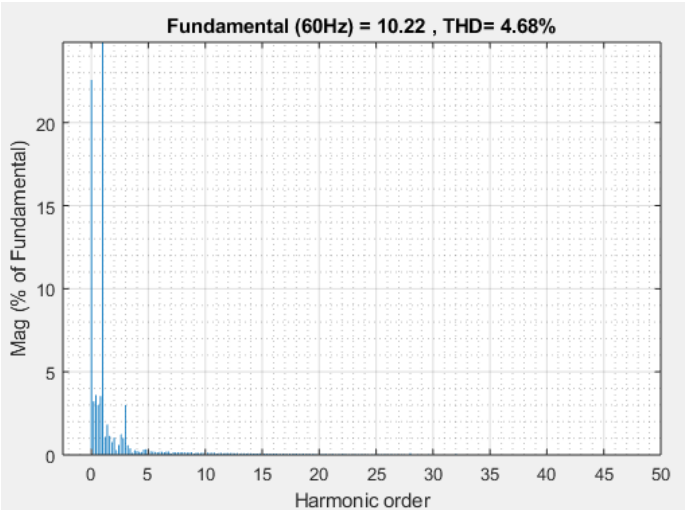


Fig. 5. THD de corriente en el PCC para un factor de calidad $Q_f = 1$.

Las figuras 5, 6, 7 y 8 muestran los resultados de simulación para una carga RLC con un factor de calidad $Q_f = 1$, para el caso del tiempo de detección es de 5 ciclos, mientras que la THD es de 4.68%. Ambos casos cumplen con IEEE 929-2000 o IEEE 1547 en donde el tiempo de detección máximo es de 6 ciclos y la máxima THD es del 5%.

 ISSN en trámite

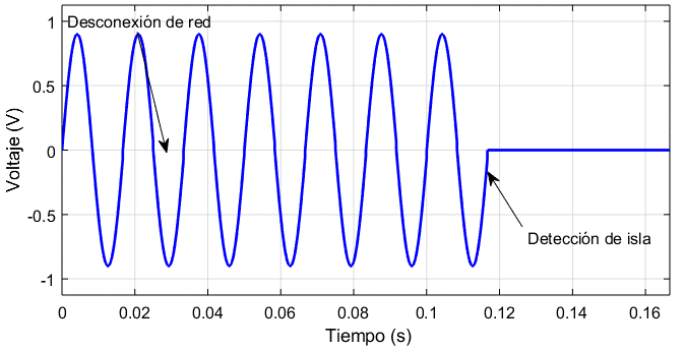


Fig. 6. Señal de referencia del inversor.

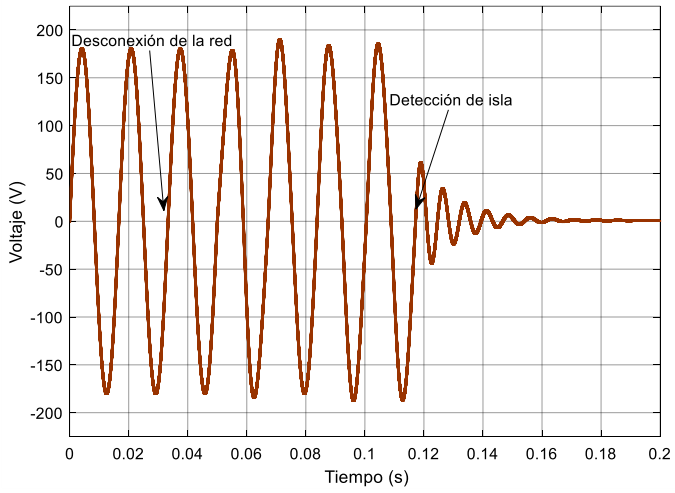


Fig. 7. Detección de isla para carga con factor de calidad Q = 1.

6. CONCLUSIONES

Con el aumento de fuentes de energía renovables como la energía solar fotovoltaica y el uso de paneles solares e inversores como fuentes de generación distribuida hacen que cada vez sea más importante la detección de islas para evitar problemas hacia personal de mantenimiento, equipos conectados y a la misma red en general.

Se realizó el rendimiento y validación del método CFS en un inversor fotovoltaico interconectado a red de 1 kW de potencia, utilizando modulación SPWM mediante el software de MATLAB (*simulink*).

Los resultados de simulación sugieren que el método CFS cumple con la norma IEEE 929-2000 que es el estándar utilizado en estados unidos, por lo que es apto para su implementación física y para someterlo a las pruebas de condición de isla.

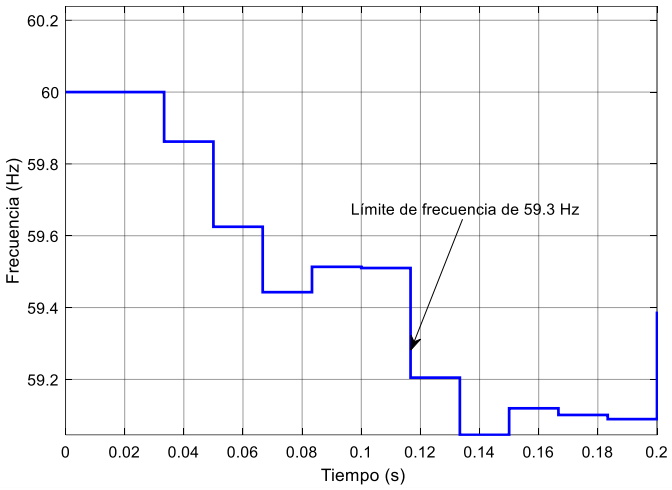


Fig. 8. Frecuencia para una carga con factor de calidad Q = 1.

REFERENCIAS

HONG, Y. & HUANG, W. Investigation of Frequency drift methods of Islanding Detection with multiple PV inverters. 2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition, 2014. IEEE, 429-434.

KO, M.-J., CHOY, I., CHOI, J.-Y., LEE, K.-O. & YU, G.-J. Simulation of active frequency drift adding zero current method for islanding detection. 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006. IEEE, 1-5.

REIS, M. V., VILLALVA, M. G., BARROS, T. A., MOREIRA, A. B. & RUPPERT, E. Active frequency drift with positive feedback anti-islanding method for a single phase two-stage grid-tied photovoltaic system. 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015. IEEE, 1-6.

TEOH, W. Y. & TAN, C. W. 2011. An overview of islanding detection methods in photovoltaic systems. *World Academy of Science, Engineering and Technology,* 58**,** 674-682.

VAHEDI, H. & KARRARI, M. 2012. Adaptive fuzzy sandia frequency-shift method for islanding protection of inverter-based distributed generation. *IEEE Transactions on Power Delivery,* 28**,** 84-92.

XINGCHI, Z., ANWEN, S. & JINBANG, X. Improved Active Frequency Drift Islanding Detection Method for Grid-Connected Photovoltaic Power Generation System. 2018 10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), 2018. IEEE, 1-6.

YE, Z., KOLWALKAR, A., ZHANG, Y., DU, P. & WALLING, R. 2004. Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept. *IEEE transactions on power electronics,* 19**,** 1171-1176.

Técnica de control inteligente para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos aislados

Ing. Saúl Rosas Romero*[1] Dr. Luis Gerardo Vela Valdés*[2] Dr. Gabriel Calzada Lara**

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, México. (Tel: 777 362 7770; e-mail: saul.rosas18ea@cenidet.edu.mx[1]; luis.vv@cenidet.tecnm.mx[2])

**Universidad Autónoma de San Luis Potosí, (UASLP), Álvaro Obregón #64, Col. Centro, C.P. 78000, México. (Tel: 444 826 2300; e-mail: gabriel.calzada@uaslp.mx)

Resumen: En este documento se presenta el análisis y simulación de una técnica de control inteligente para la localización y el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en sistemas fotovoltaicos aislados ante condiciones de operación normal, perturbación o falla (sombreado parcial). El objetivo principal es demostrar la factibilidad de implementar un algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) para el seguimiento del punto de máxima potencia. Los resultados obtenidos indican que la implementación de un algoritmo inteligente (PSO) para el MPPT, obtiene el ciclo de trabajo ideal, con el cual se extrae la máxima potencia disponible del sistema en condiciones de operación normal, perturbación o falla.

Palabras clave: Sistemas fotovoltaicos, optimización de enjambre de partículas (PSO), seguimiento del punto de máxima potencia, técnicas de control inteligente, sombreado parcial, perturbación, falla.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 25 años, la demanda mundial de energía ha incrementado a una tasa de alrededor de 2.5% anual y se ha cubierto esta necesidad principalmente por la generación mediante combustibles fósiles. Este incremento en la demanda de energía no puede ser sostenido indefinidamente debido al agotamiento de las reservas de combustible y principalmente al impacto ambiental que la combustión genera, por lo que una opción es el uso de las energías renovables para satisfacer esta demanda (Jenkins, 2017).

Se destaca particularmente de entre las energías renovables a la energía solar por el potencial de generación y por su crecimiento en los últimos años. Los sistemas fotovoltaicos se basan en la capacidad de las celdas fotovoltaicas de transformar energía solar en energía eléctrica (CD). Los dispositivos a través de los cuales se absorbe la energía solar son los paneles solares.

El término usado para designar la energía solar que incide sobre una superficie en un momento y lugar particular es la radiación solar. Cuando la irradiancia se describe como potencia, se expresa como una cantidad de watts por metro cuadrado (W/m^2) y usualmente se presenta como el valor promedio diario para cada mes. En un día claro, la irradiancia que golpea la Tierra es alrededor de 1,000 W/m^2 (Alemán-Nava et al., 2014).

2. PROBLEMÁTICA DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

Los sistemas de generación fotovoltaica sufren tres problemas principales; baja eficiencia de conversión, dependencia del clima e intermitencia de la energía eléctrica generada. Además, hay un punto único en la curva corriente voltaje (I-V) no lineal del arreglo fotovoltaico llamado punto de máxima potencia (PMP), en el que todo el sistema fotovoltaico funciona con la máxima eficiencia. Esta ubicación del PMP depende del clima y cambia con la irradiancia y la temperatura; por lo tanto, el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés) del arreglo fotovoltaico suele ser una parte esencial de todos los sistemas (Basiński et al., 2017).

Para lograr una eficiencia óptima de los módulos fotovoltaicos, es necesario utilizar algoritmos de control para el MPPT del circuito convertidor conectado al panel. Los métodos de algoritmo clásico de MPPT como conductancia incremental (CI) o perturbar y observar (P&O) permiten rastrear de manera efectiva el punto de máxima potencia del módulo en condiciones ideales de operación. El problema ocurre cuando se presenta una condición de falla o una irradiancia no uniforme a lo largo del módulo o arreglo fotovoltaico (módulos cableados en serie) que produce una curva con máximos locales y uno global, como se puede observar en la Fig. 1.

 ISSN en trámite

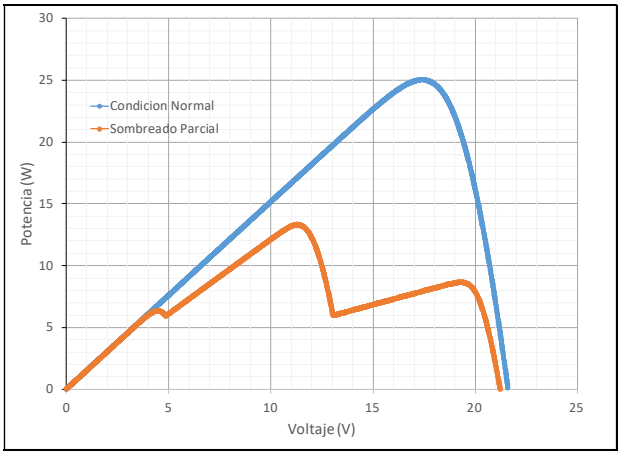


Fig. 1. Curva característica de potencia del panel fotovoltaico en condiciones normales y con sombreado parcial o falla.

Debido a la naturaleza de los métodos clásicos para el MPPT, puede ocasionar que se establezcan en un máximo local que puede ser inferior al punto de máxima potencia global, teniendo una pérdida considerable de potencia.

Una forma de resolver esto es utilizar un método no convencional, por ejemplo, un algoritmo estocástico de MPPT como el método Hill Climb adaptivo que usa PSO, o eliminar el número aleatorio en el factor de aceleración de la ecuación de velocidad del algoritmo PSO convencional (Ishaque and Salam, 2012)

Un algoritmo PSO puro puede funcionar como MPPT y establecer un ciclo de trabajo directo. Algunos autores han utilizado técnicas híbridas donde un algoritmo PSO se activa para buscar el área del pico global, y posteriormente cambia al algoritmo convencional de conductancia incremental (INC) para rastrear la salida máxima de potencia del sistema fotovoltaico con el fin de incrementar su rapidez (Shi et al., 2015).

3. TÉCNICA DE CONTROL INTELIGENTE

Se han propuesto muchas técnicas para el MPPT en la literatura con diversos algoritmos y metodologías. Se han examinado métodos fuera de línea, en línea, de estimación, computacionales e inteligentes para garantizar el estado operativo del sistema en el punto de máxima potencia (PMP) bajo diferentes condiciones climáticas. La alta precisión, la velocidad de seguimiento, la facilidad de implementación y la capacidad de rastrear el punto de máxima potencia global en condiciones de sombreado parcial o falla son las características más importantes y deseables a la hora de seleccionar la técnica (Batarseh and Za'ter, 2018).

3.1 Optimización por enjambre de partículas (PSO)

PSO es un algoritmo de optimización, sugerido por primera vez por Kennedy y Eberhart en 1995. Se representa de acuerdo con las acciones de las bandadas de pájaros. La implementación simple y la convergencia rápida son algunos de sus principales características, y se aplica bien para ubicar la mejor solución global posible en una curva no lineal, discontinua y no diferenciable. En este algoritmo se emplean varias partículas en un espacio n-dimensional. Cada partícula mantiene su posición x_i^k (dispersa al azar) y su velocidad v_i^{k+1} ($v_i^{k+1} = 0$ en un inicio). La posición de una partícula está controlada por su mejor posición actual $P_{best,i}$, y la mejor posición global de todas las partículas hasta el momento G_{best}, la posición y la velocidad de las partículas se revisan utilizando las siguientes ecuaciones (1) y (2) respectivamente (Prakash and Sahoo, 2013).

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \tag{1}$$

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1 r_1 \left\{ P_{best,i} - x_i^k \right\} + c_2 r_2 \left\{ G_{best} - x_i^k \right\} \tag{2}$$

El diagrama de flujo del algoritmo se presenta en la Fig. 2.

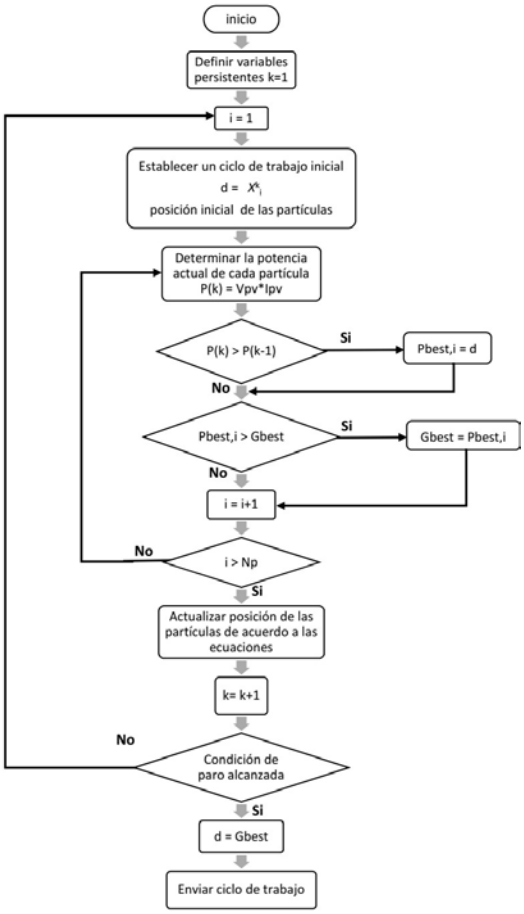


Fig. 2. Diagrama de flujo del algoritmo PSO propuesto.

 ISSN en trámite

4. MODELADO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO

Para realizar el modelado del sistema fotovoltaico se utilizó la herramienta de Simulink, (un entorno de programación visual, sobre el entorno de programación Matlab) que sirve para simular el comportamiento de los sistemas dinámicos. Cuenta con librerías y bloques de funciones necesarios para realizar el modelado del sistema en estudio, así como también programar la técnica de control inteligente (PSO) propuesta para el seguimiento del punto de máxima potencia.

4.1 Modelado del sistema fotovoltaico propuesto

En el modelado de la condición de perturbación o falla, se utilizó un panel fotovoltaico (25W, voltaje de circuito abierto (V_{oc}) = 21.6V, voltaje de máxima potencia (V_{mp}) = 17.4V, corriente de cortocircuito (I_{sc}) = 1.58A y 36 celdas en serie) dividido en 3 secciones, donde a cada una le corresponde un mismo número de celdas de acuerdo al número de zonas generadas y un nivel de irradiancia solar independiente, con lo cual se emula la condición de sombreado parcial o falla. En la Fig. 3 se muestra el panel modelado dividido en tres zonas (12 celdas) para generar una curva característica de potencia-voltaje (P-V) con presencia de dos máximos locales y un máximo global.

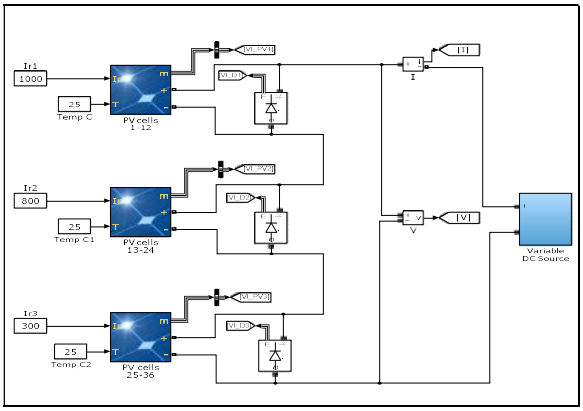


Fig. 3. Modelado de la condición de perturbación o falla en el panel fotovoltaico de 25 W dividido en 3 zonas.

El convertidor CD-CD modelado tiene la característica reductora-elevadora debido a los requerimientos del sistema fotovoltaico y a los escenarios de operación definidos. La topología propuesta en la simulación es la topología Split-pi que se adapta a los requerimientos de las energías renovables.

El convertidor CD-CD con la topología Split-pi consiste fundamentalmente en un convertidor boost seguido de un convertidor buck y la ventaja de este convertidor es que la corriente de entrada y salida son continuas y no pulsantes, tal característica es ideal cuando se requiere continuidad de la corriente de entrada y de salida, como en la interfaz de energía renovable, particularmente en sistemas fotovoltaicos (Alzahrani et al., 2017). Los datos del convertidor modelado se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de diseño del convertidor modelado

Rango de voltaje de entrada	6-30 V, 10A máximo
Rango de voltaje de salida	0-30 V, 5A máximo
Potencia máxima	150 watts
C_1 y C3	100 µF, RSE 2 *m*Ω
C2	80 µF, RSE 2 *m*Ω
L_1 y L_2	100 µH, RSE 11 *m*Ω
MOSFET	80 V, 15A, RSE 15 *m*Ω
Frecuencia de conmutación	200 kHz.

La Fig. 4 muestra el modelado del circuito del convertidor en Simulink.

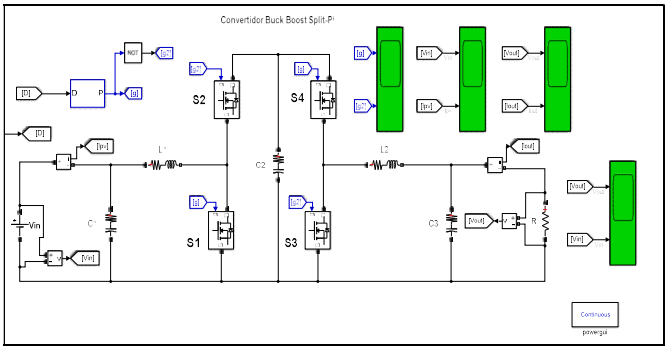


Fig. 4. Modelado del convertidor buck-boost Split-Pi.

El patrón de conmutación para la operación del convertidor en modo buck-boost se muestra en la Tabla 2

Tabla 2. Patrón de conmutación de los interruptores.

Modo	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**S_4**
Buck-Boost	D	1-D	1-D	D

La ganancia del convertidor Split-pi que funciona como buck-boost está dada por:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} \qquad (3)$$

Donde:

D= Ciclo de trabajo
V_o= Voltaje de salida del convertidor
V_{in}= Voltaje de entrada del convertidor

4.2 Implementación del algoritmo

El algoritmo PSO para el seguimiento del punto de máxima potencia y control del convertidor se implementó en un bloque de función de Simulink, donde se puede escribir una función Matlab para usar en un modelo Simulink. La función que se crea se ejecuta en la simulación y genera código para un

 ISSN en trámite

objetivo Simulink Coder. Como variables de entrada al bloque de función se tiene el voltaje y la corriente entregada por el panel fotovoltaico que son las señales de entrada al convertidor CD-CD y la salida es directamente el ciclo de trabajo para el control de conmutación de los interruptores del convertidor. En la Fig. 5 se muestra el modelo completo del sistema con el algoritmo de optimización PSO para el seguimiento del punto de máxima potencia.

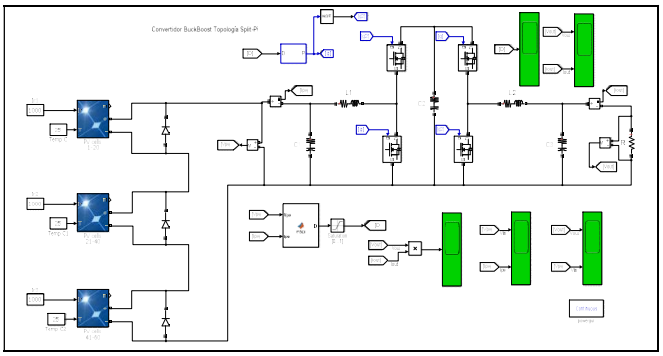


Fig. 5. Modelado completo del sistema fotovoltaico.

5. RESULTADOS EN SIMULACIÓN

Con la finalidad de mostrar el potencial de aplicar la técnica de control inteligente para el MPPT y el control del convertidor para la extracción de la máxima potencia en sistemas fotovoltaicos aislados, se establecen dos escenarios de operación, uno que emula la condición de operación normal y otro que emula la condición de falla o perturbación del sistema. A continuación, se describen las condiciones de cada uno de los escenarios propuestos.

5.1 Condición de operación normal del sistema

La condición de operación normal del sistema, se define como un perfil de generación establecido por la disponibilidad del recurso solar, en donde la irradiancia solar es uniforme en todo el sistema fotovoltaico, por lo que no se presentan curvas de potencia con máximos locales como se observa en la Fig. 6. Las variaciones de voltaje en el punto de máxima potencia son relativamente pequeñas con la variación de la irradiancia solar sobre el panel de 25 watts modelado.

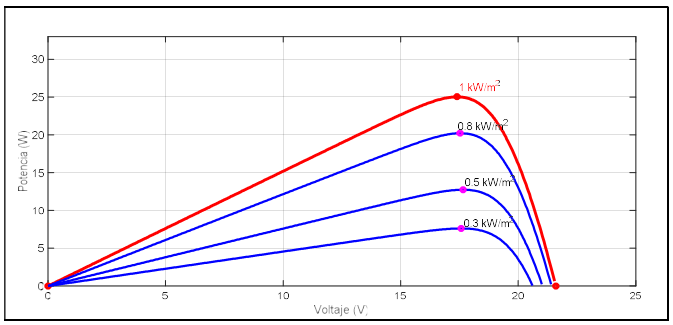


Fig. 6. Curvas de potencia generada en condición normal del sistema (1000, 800, 500, 300 W/m^2).

Con este perfil de generación se observa la presencia de un solo punto de máxima potencia (25 W @ 1000W/m^2) en la curva característica de voltaje- potencia (V-P). En la Fig. 7 se observa la variación del ciclo de trabajo de los interruptores durante la convergencia del algoritmo y en la Fig. 8 se muestra la máxima potencia obtenida del sistema fotovoltaico para la curva de 1000 W/m^2.

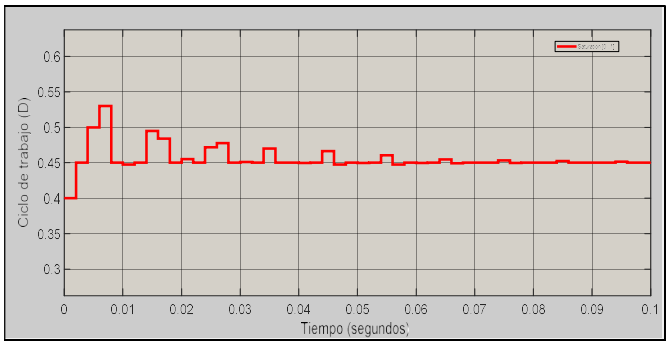


Fig. 7. Ciclo de trabajo (0.45) determinado por el algoritmo.

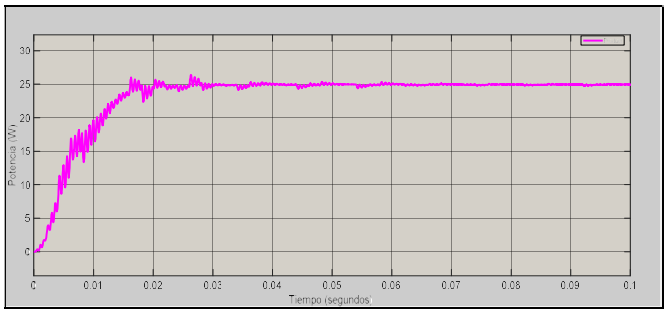


Fig. 8. Máxima potencia obtenida (24.9 W) en la condición de operación normal del sistema (1000W/m^2).

5.2 Condición de perturbación o falla del sistema

La condición de perturbación en el sistema se refiere a un cambio no permanente en el perfil de generación ocasionado por factores externos al sistema (sombreado parcial) y que generan curvas con presencia de máximos locales y uno global como se observa en Fig. 9, por lo que el algoritmo debe encontrar ese máximo global y garantizar la máxima extracción de potencia disponible en el sistema, en la simulación se estableció una irradiancia solar para cada una de las 3 zonas del sistema (Z_1=1000 W/m^2 ,Z_2=800 W/m^2 y Z_3=300 W/m^2) que en este caso es de 11.3 Watts. En este escenario de operación el proceso de búsqueda del algoritmo pasa por los dos máximos locales que se muestran en la curva de la Fig. 9, ya que las partículas se posicionan de tal manera que el proceso de búsqueda abarca esos máximos locales, obteniendo la mejor posición individual y la mejor posición global de las partículas, lo que asegura la convergencia en el máximo global de todas las partículas.

 ISSN en trámite

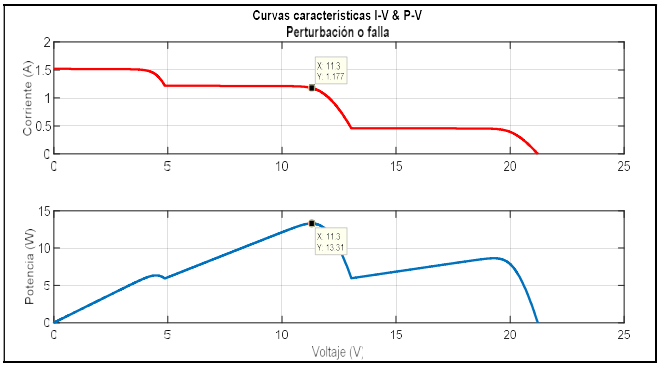


Fig. 9. Curva de potencia generada en condición de perturbación del sistema.

Con este perfil de generación se tiene la presencia de dos máximos locales y uno global (13.31 watts), por lo que el algoritmo deberá converger en el máximo global mediante la búsqueda en el espacio de la curva de potencia. En la Fig. 10 se muestra la variación del ciclo de trabajo hasta la convergencia del algoritmo. La potencia obtenida del sistema se muestra en la Fig. 11.

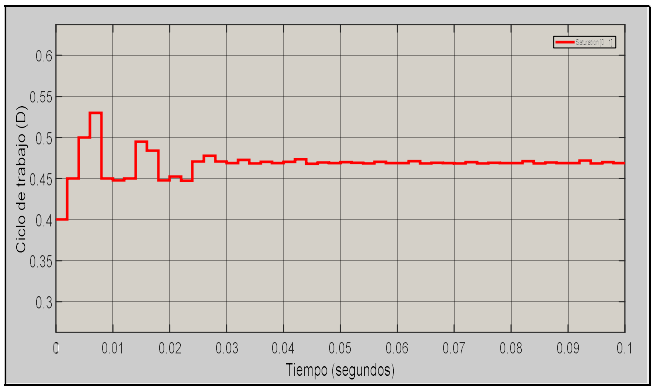


Fig. 10. Convergencia del ciclo de trabajo (0.469) en condición de perturbación del sistema

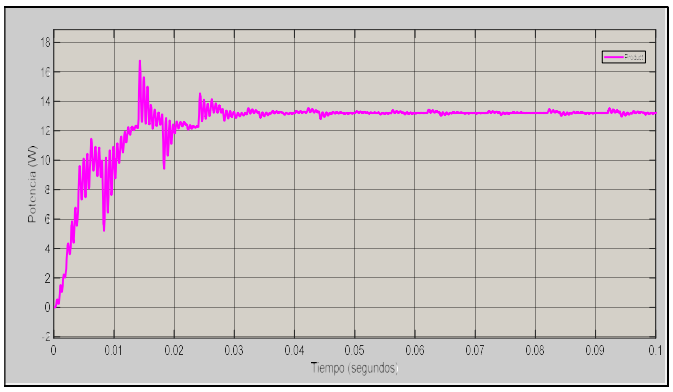


Fig. 11. Máxima potencia obtenida (13.23 W) en la condición de perturbación o falla del sistema.

6. CONCLUSIONES

El modelado y simulación del algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) que se presenta en este artículo, mostró que es efectivo para el rastreo y seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en sistemas fotovoltaicos aislados. Se probó bajo condiciones de operación normal y de perturbación o falla, mostrando en todos los casos la máxima extracción de potencia del sistema para transferir a la carga. Como trabajo futuro se pretende implementar el algoritmo en un sistema fotovoltaico a escala reducida y validar los resultados obtenidos en las simulaciones.

REFERENCIAS

Alemán-Nava, G. S., Casiano-Flores, V. H., Cárdenas-Chávez, D. L., Díaz-Chavez, R., Scarlat, N., Mahlknecht, J., Dallemand, J.-F. & Parra, R. 2014. Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 32**,** 140-153.

Alzahrani, A., Shamsi, P. & Ferdowsi, M. Single and interleaved split-pi DC-DC converter. 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2017. IEEE, 995-1000.

Basiński, K., Ufnalski, B. & Grzesiak, L. M. 2017. Hybrid MPPT algorithm for PV systems under partially shaded conditions using a stochastic evolutionary search and a deterministic hill climbing. *Power Electronics and Drives,* 2**,** 49-59.

Batarseh, M. G. & Za'ter, M. E. 2018. Hybrid maximum power point tracking techniques: A comparative survey, suggested classification and uninvestigated combinations. *Solar Energy,* 169**,** 535-555.

Ishaque, K. & Salam, Z. 2012. A deterministic particle swarm optimization maximum power point tracker for photovoltaic system under partial shading condition. *IEEE transactions on industrial electronics,* 60**,** 3195-3206.

Jenkins, J. E. N. 2017. *Renewable Energy Engineering,* United Kingdom, University Printing House.

Prakash, J. & Sahoo, S. K. Modeling of photovoltaic system and design of MPPT controller using PSO algorithm. International conference on Environment & energy, 2013. 36-41.

Shi, J., Zhang, W., Zhang, Y., Xue, F. & Yang, T. 2015. MPPT for PV systems based on a dormant PSO algorithm. *Electric Power Systems Research,* 123**,** 100-107.

Obtención de parámetros óptimos para el correcto control de corriente en transmisor inalámbrico de energía.

Ahmed M. Román Abolhosen. Leobardo Hernández González, Luis A. Sotres Jara, Eduardo S. Estevez Encarnación.

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán
e-mail: ahmed.roman@hotmail.com; Lhernandezg@ipn.mx; lasotres@hotmail.com; salvador_esee@hotmail.com

Resumen: El presente documento tiene como fin, el de realizar un estudio de los valores óptimos de V_{GS} que permitan reducir un desbalance de energía visto con anterioridad en un sistema de Transmisión Inalámbrica de Energía tipo Inductivo o *IWPT* (*Inductive Wireless Power Transfer*), en el desarrollo del artículo se mostraran como determinados parámetros del SiC Mosfet como son: T_j (Temperatura de la unión), I_D (Corriente de Drenador) y V_{GS} (Voltaje Compuerta-Fuente) se encuentran relacionados entre sí, se explicara como la modificación de alguno de estos parámetros puede influir directamente en los otros 2.

Keywords: Estudio, SiC-Mosfet, Transmisión Inalámbrica de Energía, Inductivo, IWPT

1. INTRODUCCION

Una inmensa variedad de dispositivos hoy en día portan consigo una batería, desde audífonos, celulares y lápices hasta bicicletas, motocicletas e incluso automóviles. La migración tecnológica hacia lo 100% eléctrico es una realidad, y es por ello que ha ido surgiendo la necesidad de cambiar las maneras tradicionales de transmitir energía eléctrica de una fuente estática a una portátil como lo es una batería.

Es debido a esto, que los sistemas de transmisión inalámbrica de energía o mejor conocido como *WPT* (*Wireless Power Transfer*) están presentando un rápido crecimiento en su investigación y desarrollo, los *WPT* presentan aplicaciones en diversos campos: en la medicina, mediante la implantación de receptores miniaturizados de apenas el tamaño de una moneda que proporcionan alimentación a dispositivos quirúrgicos, (Pacini, 2018) y (A. I. ,2014), así como en la transferencia inalámbrica de energía debajo del mar, para la alimentación de pequeños submarinos que permitan expandir los horizontes de la exploración marina, (Futagami, 2015), en la recarga de dispositivos celulares de última generación, (Patrick, 2015), y recientemente en la carga de vehículos eléctricos, (C. Park, 2015).

Por su impacto tecnológico, los *WPT* se han convertido en un tema de extrema relevancia y se han comenzado a explorar diferentes técnicas que permitan una transferencia cada vez más eficiente. (Nishikawa, 2013) y (Andreas, 2015) Además de esto se han explorado las desventajas que dichos sistemas poseen al ser utilizados como fuentes de alimentación constante, un claro ejemplo de esto es la cada vez más amplia necesidad de una topología que permita compensar y mantener un nivel de voltaje constante a la salida de dicho sistema, en el caso de querer alimentar cargas de mucha mayor capacidad, como lo es en aplicaciones de vehículos eléctricos. (Li, 2016)

Con lo anterior en consideración, el presente trabajo hablara acerca del correcto control de energía en un *WPT* a través de la selección de parámetros óptimos de conmutación en los convertidores de potencia utilizados en dicho sistema, el cual fue propuesto y creado con anterioridad, (Jesús Camacho, 2017), la metodología de selección permite evitar el desbalance de energía que se presenta en el *WPT*, lo que beneficia en un mayor aprovechamiento de la energía, un mejor control del flujo de energía transmitido y un escalamiento en potencia adecuado para la carga de vehículos eléctricos.

2. SiC-Mosfet

Para el desarrollo de convertidores de potencia con mayor demanda de energía, estabilidad térmica, bajas perdidas por conmutación y operación a mayor frecuencia, el Mosfet de Carburo de Silicio, SiC-Mosfet, es una opción adecuada. El principio de operación del SiC-Mosfet es similar al Si-Mosfet, donde la temperatura de unión es uno de los criterios más utilizados para obtener el comportamiento térmico del dispositivo así como el impacto que tienen las pérdidas por conmutación en aplicaciones de convertidores de potencia.

Para lograr una adecuada conducción del Mosfet, se debe de asegurar la suficiente atracción de cargas negativas entre los pozos (n^+) de Drenador y Fuente, lo que se conoce como creación del canal, como se observa en la Figura 1.

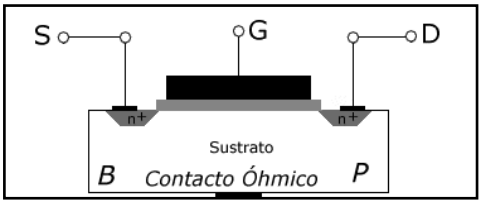


Fig. 1: Estructura Básica de un MOSFET canal N

 ISSN en trámite

Para establecer un ancho mínimo de canal y circulación de corriente, se debe de asegurar un Voltaje Compuerta-Fuente de Umbral, V_{gsth}, el cual es indicado por el fabricante.

Cuando se retira el V_{GS} o bien si este es cercano a cero no se formará un canal y por consiguiente no fluirá una corriente a través de Drenador y Fuente, a esto se le conoce como estado de bloqueo.
En estado de conducción, y para establecer un valor deseado de corriente de Drenador, se utiliza normalmente el grafico de comportamiento en temperatura de I_D vs. V_{GS}, como se muestra en la Figura 2. Donde se observa una dependencia de I_D con respecto a V_{GS}, para diferentes valores de temperatura.

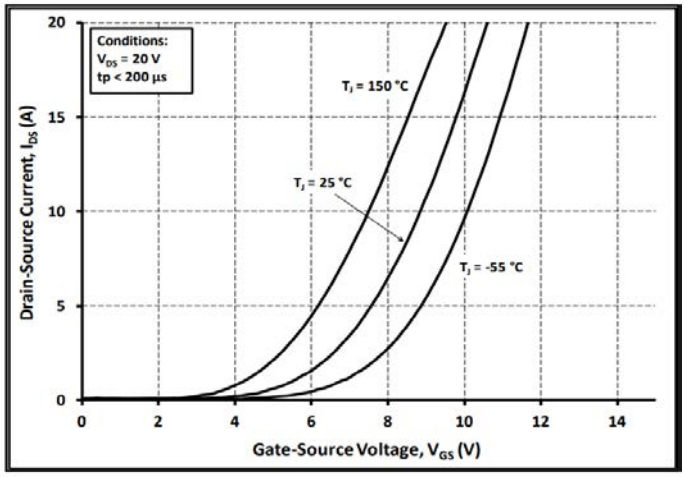


Fig. 2: Gráfica de I_D vs. V_{GS} MOSFET SiC C2M0160120D.

Como se aprecia en la Figura 2, el valor de I_D es función del parámetro interno T_j (temperatura de la unión que existe en el dispositivo), donde se cumple que a **mayor** valor de T_j **menor** V_{GS} necesario para lograr la activación, pero aumenta el valor de corriente por el canal, I_D. Es importante analizar este comportamiento ya que, cuando existan 2 o más dispositivos semiconductores de conmutación y se desee un flujo de corriente del mismo valor por ambos dispositivos, estas variables tomarán un papel fundamental.

3. DESBALANCE DE ENERGÍA EN CONVERTIDOR PROPUESTO

Como fue mencionado, el presente documento hace referencia a un convertidor DC-AC, denominado *Buck-Inverter* (B-I), el cual fue diseñado para formar parte de un sistema *WPT* en el lado del transmisor (Jesús Camacho, 2017). El convertidor fue diseñado para trasmitir a una potencia nominal de 30W, lo cual es una potencia más que suficiente para pequeños gadgets electrónicos, pero resulta insuficiente en aplicaciones de vehículos eléctricos, por lo que es de interés escalar en potencia a través de voltaje de polarización y mayor flujo de corriente en los convertidores.

Para estimar el comportamiento térmico del prototipo en un escenario de escalamiento de potencia, se procedió a realizar una toma térmica del prototipo, donde se encontró un desbalance de temperatura, específicamente entre los componentes M2 y M3, ver Figura 3.

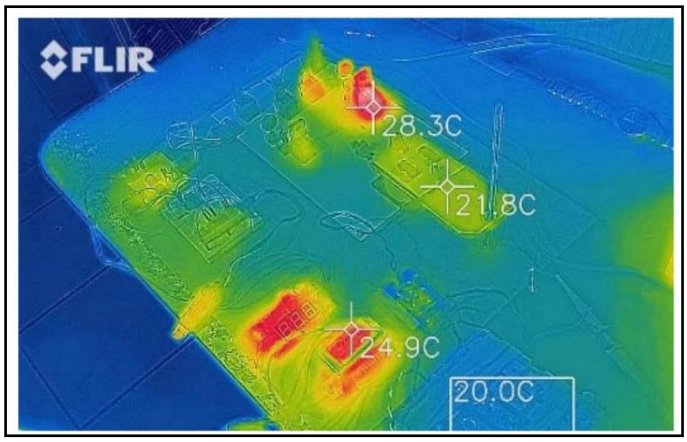


Fig. 3: Toma térmica del convertidor en operación de carga a un banco de baterías de NiMH. (Jesús Camacho, 2017)

El desbalance de temperatura es de aproximadamente 6°C, en un escenario de escalamiento de potencia es una clara problemática para el sistema IWPT propuesto, debido a que es producto de un desbalance de corriente presentado entre los *Buck's* inyectores de corriente, Superior e Inferior. Para corroborar el desbalance de energía, se procedió a comparar la I_D del MOSFET M2 contra la I_D de MOSFET M3, ver Figura 3 y 4.

Pese a que la diferencia presentada podría parecer pequeña, es importante tener en cuenta que esta diferencia en corriente contribuye a un incremento en temperatura, que a su vez contribuirá a un incremento mayor de corriente, volviéndose un ciclo generativo que provocará que la diferencia en temperatura se vuelva cada vez mayor. Para un escalamiento en potencia se necesita que el V_{IN} se incremente, lo que provoca que el diferencial $I_{D1} - I_{D2}$ aumente, ver tablas 1 y 2. Por lo que V_{IN} pasaría a ser un factor que multiplicaría el desbalance previsto, lo cual es totalmente indeseable.

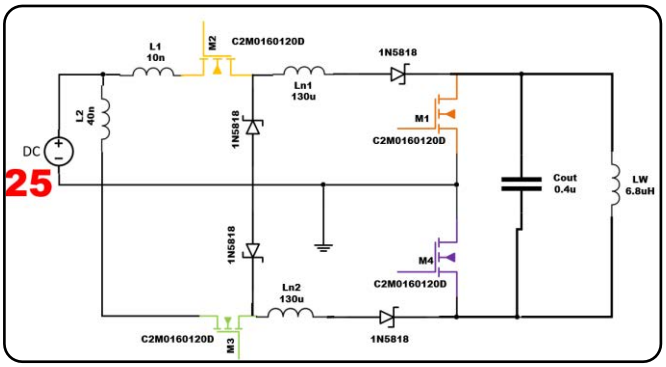


Fig. 3: Convertidor (B-I) propuesto de 30W con inductancias de cableado y V_{IN} de 25V

 ISSN en trámite

Tabla 1: Corriente de Drenador, I_D, para MOSFET'S M2 y M3 con V_{IN} de 25V

M2	M3
I_D (RMS) =166.73mA	I_D (RMS) =174.75mA
Diferencia: **8mA**	

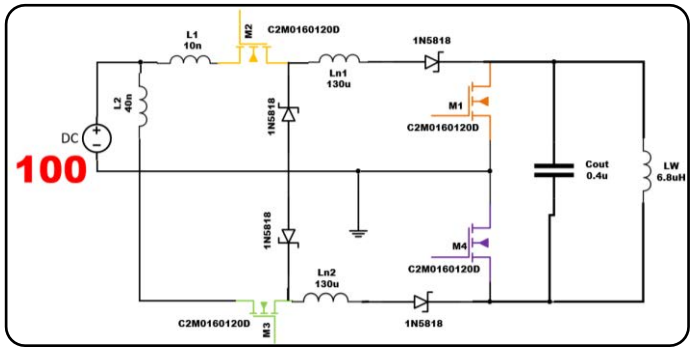


Fig. 4: Convertidor (B-I) propuesto de 30W con inductancias de cableado y VIN de 100V

Tabla 2: Corrientes de Drenador, I_D, para MOSFET'S M2 y M3 con V_{IN} de 100V

M2	M3
I_D (RMS) =185.73mA	I_D (RMS) =358.42mA
Diferencia: **172.69mA**	

Para analizar el comportamiento térmico de los Mosfet, se utilizó el modelo con auto calentamiento del MOSFET C2M0160120D proporcionado por el fabricante, dicho modelo incluye las ecuaciones matemáticas que contemplan las relaciones existentes entre T_j (Temperatura de la Unión), T_C (Temperatura del encapsulado) y la I_D (Corriente de Drenador). Se realizó una simulación para visualizar cómo evoluciona la temperatura T_j a un escalamiento de potencia, logrando obtener los resultados presentados en las tablas 3 y 4.

Tabla 3: Temperaturas de Unión para MOSFET'S M2 y M3, VIN 25V

M2	M3
T_j (RMS) =37.024°C	T_j (RMS) =37.053°C
Diferencia: **0.029°C**	

Tabla 4: Temperaturas de Unión para MOSFET'S M2 y M3, VIN 100V

M2	M3
T_j (RMS) =37.783°C	T_j (RMS) =38.618V
Diferencia: **0.827°C**	

4. OPTIMIZACIÓN DE V_{GS} PARA EL BALANCE DE ENERGÍA

Del principio de operación del Mosfet de potencia, se ha comprobado que existe un desbalance de energía en los Mosfet´s, y que la temperatura T_j guarda relación directa con V_{IN} e I_D. El comportamiento de I_D está directamente relacionado con el V_{GS} que se aplica al Mosfet, V_{GS} es un parámetro que guarda relación directa con I_D, ver Figura 2, esto quiere decir que mediante la modificación del valor de V_{GS} se puede modificar la cantidad de corriente que fluye a través del MOSFET, por consiguiente afectar el valor de T_j.

Para analizar el comportamiento de I_D - T_j con respecto a V_{GS}, se escala en potencia el convertidor a 50W, 100W, 200W y 500W, en la Tabla 5 se presentan los valores de cada circuito.

Tabla 5. Valores de componentes para 50W, 100W, 200W y 500W.

50W	100W	200W	500W
V_{IN}=100V	V_{IN}=100V	V_{IN}=400V	V_{IN}=400V
Ln1=Ln2=83.4uH	Ln1=Ln2=61uH	Ln1=Ln2=202uH	Ln1=Ln2=258uH
Cout= 0.76uF	Cout= 0.76uF	Cout= 0.76uF	Cout= 0.76uF
L_{TX}=L1‖L2=6.9uH‖6.4uH	L_{TX}=L1‖L2=6.9uH‖6.4uH	L_{TX}=L1‖L2=6.9uH‖6.4uH	L_{TX}=L1‖L2=6.9uH‖6.4uH
F_{PWM}=500Khz	F_{PWM}=500Khz	F_{PWM}=500Khz	F_{PWM}=500Khz
$F_{resonancia}$=100 Khz	$F_{resonancia}$=100 Khz	$F_{resonancia}$=100 Khz	$F_{resonancia}$=100 Khz

Con el objetivo de obtener el valor de V_{GS} óptimo de conmutación de Mosfet y disminuir el desbalance de energía, se realizaron simulaciones para distintos valores de V_{GS} (2V, 4V, 6V, 10V, 12V, 14V, 15V, 16V, 18V, 20V, 22V, 24V, 26V, 28V), tomando mediciones de las corrientes de los inductores inyectores Ln1 (I_{Ln1}) y Ln2 (I_{Ln2}) que contiene cada convertidor, Figura 3. Esto debido a que la corriente circulante por Ln1 se encuentra relacionada con la I_D de M2, al igual que la corriente circulante por Ln2 con la I_D M3. En las Figuras 5 y 6, se muestran los valores de corriente que se obtuvieron para los 4 casos de estudio.

 ISSN en trámite

Como se observa de los resultados indicados en las Figuras 5 y 6, se presentan 2 casos particulares: Un primer caso de **10 V** en el convertidor de 50W, 200W, 500W y un segundo caso **14 V** en el convertidor de 100W, en los cuales la diferencia de corriente inyectada disminuyó notoriamente con respecto a los otros valores de V_{GS}.

Este primer análisis permite seleccionar un valor adecuado de V_{GS} que asegurará la estabilidad deseada, que impactara en la conformación de una señal sinusoidal entregada en los inductores transmisores más limpia, es decir con menor contenido armónico.

Es necesario corroborar dichos valores con una temperatura de encapsulado mayor, esto con el fin de verificar como impacta dicho cambio en el valor V_{GS} óptimo. Para esto se realizó las mismas corridas para un valor de temperatura de encapsulado de 37°.

Posteriormente, es de interés visualizar el comportamiento de (I_{Ln1})-(I_{Ln2}) vs. V_{GS} para así poder reconocer un patrón que ayude a predecir el comportamiento del convertidor en escalamientos posteriores. Para esto se comienza graficando en parejas de convertidores, empezando por 50W y 100W con ambas temperaturas, ver Figura 5.

Como podemos apreciar, en valores de voltaje pequeños, desde 2V a 8V la diferencia de corriente decae hasta llegar a un valor casi despreciable, esto debido a que el valor de V_{GS} es tan pequeño que los Mosfet's no alcanzan a formar un canal, provocando que no haya paso de corriente. Además de esto es posible inferir que el comportamiento en 100W es el mismo que en 50W, sólo con un pequeño corrimiento en V_{GS}, comenzando en 10V para 50W y en 14V para 100W.

Sin embargo, como puede ser visto en la Figura 6, dicho patrón se rompe y el comportamiento logarítmico de los convertidores de 200W y 500W vuelve a partir de un V_{GS}de 10V.

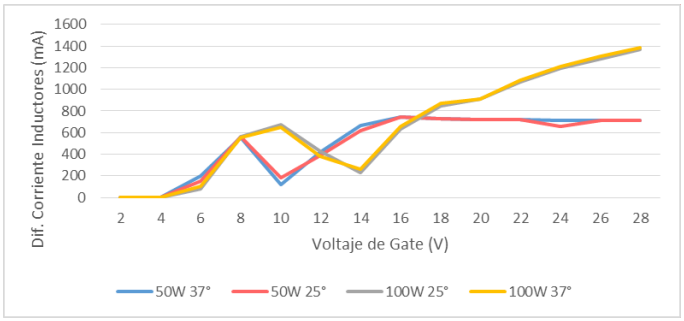


Fig. 5: Comportamiento (I_{Ln1})-(I_{Ln2}) vs. V_{GS}, para 50W y 100W, temps 25° y 37°

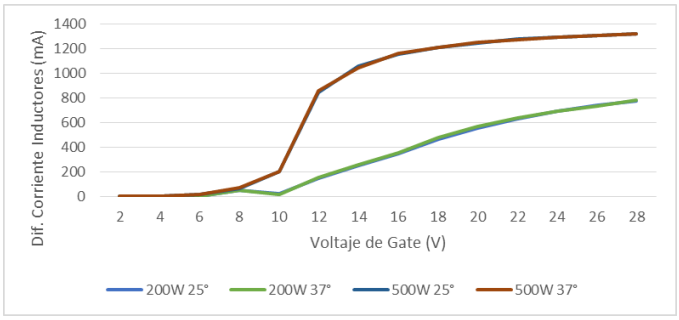


Fig. 6: Comportamiento (I_{Ln1})-(I_{Ln2}) vs. V_{GS}, para 200W y 500W, temps 25° y 37°

Por último se grafican los 3 convertidores que poseen un comportamiento logarítmico a partir de un V_{GS} de 10 (Figura 7), en los cuales puede ser visto que todos llegan a un punto en donde el incremento de V_{GS} deja de tener impacto sobre la diferencia (I_{Ln1})-(I_{Ln2}), es decir deja de incrementarla. Lo cual pasa a ser un factor significativo en la toma de decisiones y nos permite conocer aún más sobre el comportamiento general de la topología, sin importar su valor de escalamiento.

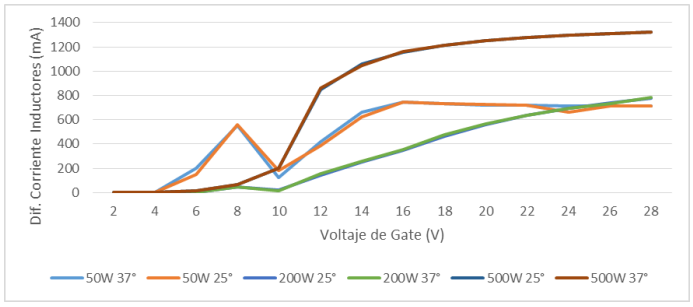


Fig.7: Comportamiento (I_{Ln1})-(I_{Ln2}) vs. V_{GS}, para 50W, 200W y 500W, temps 25° y 37°

5. CONCLUSIONES

Una vez presentado las principales resultados de simulación, es posible llegar a las siguientes conclusiones:

- El voltaje de entrada influye en la corriente de drenador cuando se consideran inductancias de cableado, propiciando así que la temperatura sea afectada por el incremento de la corriente de Drenador.
- El voltaje V_{GS} es un parámetro que influye directamente en la corriente que pasa por la terminal de Drenador del dispositivo, logrando así que la temperatura general del dispositivo cambie en función de este parámetro.
- De la presentación grafica de (I_{Ln1})-(I_{Ln2}) vs. V_{GS}, se encontró que 3 de los 4 convertidores estudiados presentaron un comportamiento de conducción logarítmico a partir de 10V de V_{GS}.

 ISSN en trámite

- Se observó que el convertidor de 100W no cumple con dicho comportamiento en la misma marca de V_{GS}, por lo cual deberá ser estudiado por separado.
- Se encontró que un pequeño cambio en la temperatura de encapsulado (25°-37°) no modificó significativamente la forma de la salida (I_{Ln1})-(I_{Ln2}) vs. V_{GS}, sin embargo falta revisar el comportamiento de T_j con los valores óptimos obtenidos en la Figura 7.

REFERENCIAS

Andreas Berger, Matteo Agostinelli, Sanna Vesti, Jesús A. Oliver, José A. Cobos and Mario Huemer, "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, NOVEMBER 2015.

A. I. Al-Kalbani, M. R. Yuce, and J. Redoute, "A biosafety comparison between capacitive and inductive coupling in biomedical implants," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 13, No. 1, pp. 1168-1171, Jun. 2014

C. Park, S. Lee, S. Jeong, G. Cho, and C. T. Rim, "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, Nov. 2015.

Futagami, D., Sawahara, Y., Ishizaki, T., & Awai, I. (2015). Study on high efficiency WPT underseas. 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)

Nishikawa, K., & Ishizaki, T. (2013). Microwave-band wireless power transfer system using ceramic dielectric resonators. 2013 IEEE Wireless Power Transfer (WPT)

Li, B., Geng, Y., Lin, F., Yang, Z., & Igarashi, S. (2016). Design of Constant Voltage Compensation Topology Applied to WPT System for Electrical Vehicles. 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)

Pacini, A., Benassi, F., Masotti, D., & Costanzo, A. (2018). Design of a Miniaturized Omni-Directional RF-to-dc IR-WPT. 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC).

Patrick S. Riehl, Anand Satyamoorthy, Hasnain Akram, Yung-Chih Yen, J.-C. Yang, Brian Juan, Chi-Min Lee, Fu-Chi Lin, Vladimir Muratov, 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, MARCH 2015.

Jesús Camacho C., L. Hernández, M. Retana & J. Marquez. Diseño y Modelado de convertidor CD-CA de una sola etapa aplicado a transmisión inalámbrica, AMCA, pp 594-6.

Estimación de parámetros del modelo de circuito eléctrico R_{int} de una batería de ion-litio con mínimos cuadrados recursivos y filtro de Kalman extendido

Donaciano Flores Gaspar *. Guadalupe López López **.
José Francisco Gómez Aguilar***

Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
** e-mail: donaciano.flores18ea@cenidet.edu.mx, ** e-mail: guadalupe.lopez.lopez@gmail.com,*
**** e-mail: jgomez@cenidet.edu.mx*

Resumen: En este trabajo se usa el modelo de circuito eléctrico equivalente llamado modelo de resistencia interna (o modelo R_{int}). Es una representación sencilla que integra una fuente de voltaje y una resistencia en serie. El modelo aproxima bien la relación corriente-voltaje de una batería si se incorpora adecuadamente la estimación del estado de carga (SOC en inglés). Su aplicación es más ventajosa cuando la exactitud del modelo no es un factor crítico y para respuestas con transitorios cortos. Uno de los objetivos de este trabajo es comparar la efectividad de tres funciones que integra el modelo para representar el voltaje en circuito abierto UOC(SOC), las cuales dependen del SOC.

Para estimar el parámetro R_0 y los coeficientes de las funciones UOC(SOC) del modelo se realizan pruebas experimentales con la batería de ion-litio. Posteriormente se aplican los algoritmos de mínimos cuadrados recursivos (MCR) y filtro de Kalman extendido (FKE) como dos alternativas para ajustar el modelo a la respuesta experimental de la batería de ion-litio. Se concluye que una función con estructura mixta de polinomios y logaritmos describe mejor el UOC(SOC) y que el FKE estima con menor variación la resistencia interna del modelo R_{int}. Esta combinación permite obtener una mejor predicción del voltaje de la batería.

Palabras clave: Modelo R_{int}, batería ion-litio, EKF, RLS, estimación de parámetros, función es UOC(SOC)

1. INTRODUCCIÓN

Muchos dispositivos electrónicos usados en la actualidad son alimentados mediante algún tipo de batería, siendo en su mayoría, baterías de ion-litio. Existen varios tipos de modelos para representar el comportamiento de una batería de ion-litio; los más comunes son modelos de caja negra, modelos electroquímicos y modelos de circuito equivalente (CE) Xiong & Shen, (2018), Li, (2019). Recientemente se han propuesto CE cuyo diseño introduce cálculo fraccionario Zhang, et al. (2020), Hidalgo-Reyes et al. (2019). El estado de carga (SOC en inglés) es un indicador de la energía que contiene una batería en uso. Es importante que un modelo de batería represente correctamente la relación voltaje-corriente en términos del SOC. Por lo tanto, la estimación del SOC es un paso esencial para el modelado de la batería. En la práctica se ha observado que establecer una dependencia de los parámetros con el SOC resulta en una mejor predicción. En este trabajo evaluamos la efectividad del modelo en circuito equivalente de resistencia interna R_{int} Xiong & Shen, (2018) y verificamos su compromiso entre complejidad y precisión. Los parámetros del modelo R_{int} se obtienen ajustando su valor para que la salida del modelo coincida con mediciones obtenidas de una batería de ion-litio Los parámetros fueron estimados con dos métodos diferentes, mínimos cuadrados recursivos (MCR) y filtro de Kalman extendido (FKE) Xiong, (2020). Los modelos son validados con pruebas dinámicas adicionales y los resultados se presentan comparando el ajuste logrado para tres funciones que representan el voltaje de circuito abierto en función del SOC y para los dos métodos de estimación de parámetros. Los modelos de CE son ampliamente usados para desarrollar estrategias de energía para sistemas híbridos Zhang et al. (2020). Algunas veces el interés es proponer métodos eficientes de estimación de parámetros Wang et al. (2020) y usar los modelos para diseño de control Saleem et al. (2020).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Modelo R_{int}

Para el modelado de la batería de ion litio se considera el modelo R_{int} Cea & Iván, (2017) mostrado en la Fig. 1.

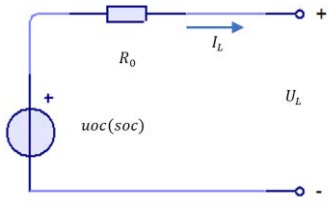


Fig. 1 Modelo R_{int}

El modelo R_{int} consta de dos elementos: UOC(SOC) es el voltaje en circuito abierto en función del SOC y una resistencia en serie

R_0 representa la resistencia interna de la batería. Las ecuaciones del modelo R_{int} y el SOC de Plett, (2015) son las siguientes:

$$\dot{soc} = -\frac{\eta I}{Q} \quad (1)$$

$$U_L = U_{oc}(SOC) - R_0 I_L \quad (2)$$

donde η es la eficiencia de Coulomb, para la cual consideramos su valor ideal de 1. I es la corriente, Q es la capacidad total de la batería en Ah. Posteriormente (1) y (2) se discretizan, obteniendo (3) y (4), en la forma necesaria para implementar los algoritmos de MCR y FKE:

$$SOC(k+1) = SOC[k] - \frac{\Delta t}{Q}\eta I[k] \quad (3)$$

$$U_L[k] = U_{oc}(SOC[k]) - R_0 I_L[k] \quad (4)$$

En cuanto a los elementos del modelo, se proponen diferentes funciones para aproximar el UOC(SOC). En primer lugar, una función polinomial Lin et al. (2017). Específicamente, se sugiere ajustar un polinomio de orden 15 como representación de UOC(SOC).

$$UOC(SOC) = c_1 + c_2 soc + c_3 soc^2 + c_4 soc^3 + c_5 soc^4 + \ldots + c_{16} soc^{15} \quad (5)$$

donde c_{1-16} son los coeficientes por estimar. Otra función para aproximar el UOC(SOC) está definida por logaritmos naturales. En particular se usó la forma (6) sugerida en Shrivastava et al. (2019).

$$UOC(SOC) = k_0 + \frac{k_1}{soc} + k_2 soc + k_3 \ln(soc) + k_4 \ln(1 - soc) \quad (6)$$

donde k_{0-4} son los coeficientes por estimar. Finalmente, se definió una combinación de polinomios y logaritmos naturales con la estructura mixta sugerida en Xiong, (2020).

$$UOC(SOC) = a_0 + a_1 soc + a_2 soc^2 + a_3 soc^3 + \frac{a_4}{soc} + a_5 \ln(soc) + a_6 \ln(1 - soc) \quad (7)$$

2.2 Algoritmo de mínimos cuadrados

El algoritmo de mínimos cuadrados recursivos de Du et al. (2018) y Meng et al. (2019) se establece con base en las ecuaciones (8)-(11).

$$K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \quad (8)$$

$$P(k) = \frac{P(k-1)K(k)\varphi^T(k)P(k-1)}{\lambda} \quad (9)$$

$$e(k) = y(k) - \varphi(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (10)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)e(k) \quad (11)$$

donde $K(k)$ es la ganancia del algoritmo, $P(k)$ es una matriz diagonal que representa la covarianza, $e(k)$ es el error entre el valor real y el estimado, $\hat{\theta}(k)$ es un vector columna y contiene a los parámetros que serán estimados de acuerdo con el modelo UOC(SOC), $\varphi(k)$ es la matriz de coeficientes que se forma con los datos de entrada y salida del sistema, y λ es el factor de olvido que puede definirse en el intervalo de .95-1, según Du et al. (2018).

2.3 Algoritmo de Filtro de Kalman Extendido

El filtro de Kalman extendido para funciones no lineales se usa para estimar parámetros, y tiene la forma (12)-(13). En donde x_k y y_k corresponden a las ecuaciones (3) y (4) del modelo, en donde la variable de estado es el SOC y la salida es el voltaje de medido en las terminales de la batería U_L.

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, \theta_k) + w_{k-1} \quad (12)$$

$$y_k = h(x_k, u_k, \theta_k) + v_k \quad (13)$$

Usando una aproximación de Taylor, se linealiza el sistema formado por las ecuaciones (3) y (4). Para ello, el Jacobiano del sistema está definido por (14)-(20).

$$A_k = \frac{\partial f(x_k, u_k, \theta_k)}{\partial x_k}\Big| x_k = \hat{x}_k \quad (14)$$

$$A_k = [1] \quad (15)$$

$$B_k = \frac{\partial f(x_k, u_k, \theta_k)}{\partial u_k}\Big| u_k = u_k \quad (16)$$

$$B_k = \left[-\frac{\Delta t \eta}{Q}\right] \quad (17)$$

$$C_k = \frac{\partial h(x_k, u_k, \theta_k)}{\partial x_k}\Big| x_k = \hat{x}_k \quad (18)$$

$$C_k = \frac{\partial (UOC(SOC))}{\partial x_k} \quad (19)$$

$$C_k^{\theta} = \frac{dh(x_k, u_k, \theta_k)}{d\theta_k}\Big| \theta_k = \hat{\theta}_k \quad (20)$$

La derivada parcial para C_k depende de la función UOC(SOC) que se esté evaluando, entre las ecuaciones (5)-(7). La derivada total que define los parámetros C_k^{θ} se escribe de la siguiente forma Plett, (2004):

$$\frac{dh(x_k, u_k, \theta_k)}{d\theta_k} = \frac{\partial h(x_k, u_k, \theta_k)}{\partial \theta} + \frac{\partial h(x_k, u_k, \theta_k)}{\partial x_k}\frac{dx_k}{d\theta} \quad (21)$$

$$\frac{dx_k}{d\theta} = \frac{\partial f(x_k,u_k,\theta_k)}{\partial \theta} + \frac{\partial f(x_k,u_k,\theta_k)}{\partial x_k}\frac{dx_{k-1}}{d\theta} \quad (22)$$

$$\frac{dx_{k-1}}{d\theta} = \frac{dx_{k-1}}{d\theta} - L_{k-1}^{x}\frac{dh(x_k,u_k,\theta_k)}{d\theta_k} \quad (23)$$

El algoritmo de FKE para estimar los estados y parámetros se obtuvo de Xiong, (2020), Jiang & Zhang, (2015), Fang et al. (2013), Plett, (2016) y Wei et al. (2018). El algoritmo se resume en los siguientes pasos:

1) Inicialización. Se definen

$$x_0, P_0, Q_0, R_0, P_0^{\theta}, Q_0^{\theta}, R_0^{\theta} \quad (24)$$

donde x_0 es el valor inicial del estado, P_0 es la covarianza del sistema, Q_0 es la covarianza de ruido en el sistema y R_0 es la covarianza de ruido en las mediciones, y las posteriores variables corresponden al parámetro a estimar.

2) Estimación del estado

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, \theta_{k-1}) \quad (25)$$

$$\hat{\theta}_k^- = \hat{\theta}_{k-1}^+ \quad (26)$$

3) Estimación del error de covarianza

$$P_k^- = A_{k-1}P_{k-1}A_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (27)$$

$$P_k^{\theta,-} = P_{k-1}^{\theta,+} + Q_{k-1}^{\theta} \quad (28)$$

4) Estimación del error de salida del sistema

$$e_k = y_k - \hat{y}_k \quad (29)$$

5) Cálculo de la matriz de ganancia de Kalman

$$K_k = P_k^- C_k^T \left[C_k P_k^- C_k^T + R_{k-1}\right]^{-1} \quad (30)$$

$$K_k^{\theta} = P_k^{\theta,-}(C_k^{\theta})^T \left[C_k^{\theta} P_k^{\theta,-}(C_k^{\theta})^T + R_{k-1}^{\theta}\right]^{-1} \quad (31)$$

6) Corrección de los estados del sistema

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k e_k \quad (32)$$

$$\hat{\theta}_k^+ = \hat{\theta}_k^- + K_k^{\theta} e_k \quad (33)$$

7) Corrección del error de covarianza

$$P_k^+ = (I - K_k C_k)P_k^- \quad (34)$$

$$P_k^{\theta,+} = (I - K_k^{\theta} C_k^{\theta})P_k^{\theta,-} \quad (35)$$

2.4 Pruebas experimentales

Se llevaron a cabo pruebas de carga y descarga con baterías para obtener el UOC(SOC). La experimentación con la batería de ion-litio se muestra en la Fig. 2. Se usaron baterías modelo IFR18650EC-1.5Ah con voltaje nominal de 3.2V y voltajes de corte de 3.7V en carga, y 2V en descarga. Las corrientes de carga máxima y mínima son de 3A y 5A, respectivamente.



Fig. 2 Batería de ion-litio

Las pruebas de carga y descarga se realizaron fijando una corriente baja de 150 mA, lo cual permitió un transitorio pequeño en la respuesta de la batería y una mejor aproximación del UOC(SOC). En la Fig. 3 se muestran los voltajes de salida y las aproximaciones del UOC(SOC) obtenidas mediante las funciones polinomial, logarítmica y mixta (la curva de descarga se invierte para mejor visualización). Los parámetros de las funciones (5)-(7) se ajustaron usando datos de carga y descarga de la batería. Los cálculos realizados en Matlab se muestran en la Tabla 1. Las funciones obtenidas resultan del promedio de dos curvas de voltaje experimentales (carga y descarga). Usando estas expresiones, se aproximaron las respuestas de voltaje, después el promedio de las dos funciones fue usado para obtener la representación del UOC(SOC).

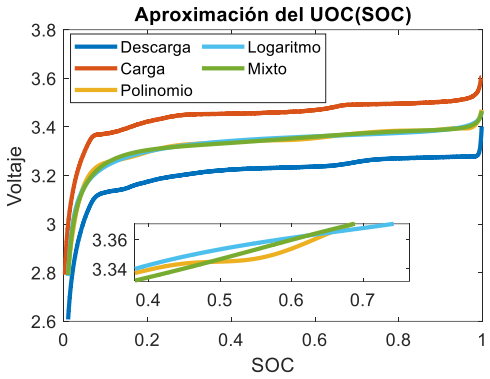


Fig. 3 Aproximaciones UOC(SOC)

Tabla 1 Coeficientes de las funciones UOC(SOC)

Coeficientes de la función polinómica	Coeficientes de la función Logarítmica	Coeficientes de la función Mixta

c16=9.9298640e+05;
c15=-7.329573e+06;
c14=2.4387186e+07;
c13=-4.832977e+07;
c12=6.351258e+07;
c11=-5.832947e+07;
c10=3.846201e+07;
c9=-1.8444080e+07;
c8=6.4631808e+06;
c7=-1.659373e+06;
c6=3.1492868e+05;
c5=-4.526158e+04;
c4=5.0679013e+03;
c3=-4.306446e+02;
c2=24.3432618;
c1=2.59857816;
	K0=3.4589419;
	K1=-0.003356;
	K2=-0.118307;
	K3=0.077296;
	K4=-0.020021;
		a0=3.8311144;
		a1=-1.3387800;
		a2=1.63502558;
		a3=-0.8242535;
		a4=-0.00138209;
		a5=0.196595388;
		a6=-0.02635107;

La segunda prueba es la caracterización de potencia de pulso híbrido (HPPC en inglés), usada para estimar la potencia disponible, la cual está documentada en Makinejad et al. (2015). Esta prueba consiste en descargar la batería mediante pulsos de corriente. En cada pulso se consume el 10% de la capacidad total de la batería, además antes de estos pulsos se aplican dos pequeños pulsos uno de descarga y otro de carga, con una duración de 10 segundos cada uno. Estos pulsos previos sirven

 ISSN en trámite

para excitar a la batería antes de aplicar el pulso de descarga. El perfil HPPC se muestra en la Fig. 4.

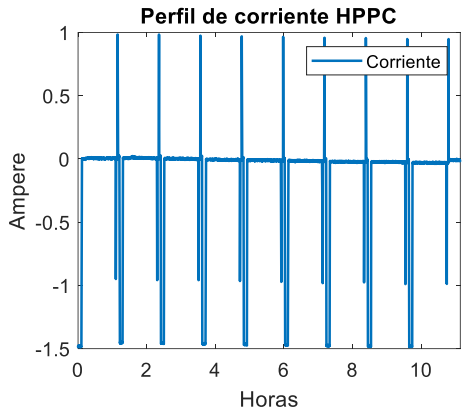


Fig. 4 Perfil de corriente HPPC

Una vez obtenida la función de UOC(SOC) se estima el parámetro de resistencia interna R_0 del modelo. Para su estimación se utilizan los algoritmos de mínimos cuadrados recursivos (MCR) con factor de olvido y el filtro de Kalman extendido (FKE).

3. RESULTADOS

Después de definir las funciones UOC(SOC), el parámetro R_0 se estimó mediante MCR a partir de los registros de los cambios de voltaje en la batería ante una demanda o entrada de corriente. En la Fig. 5 se muestra dos gráficos que presentan la variación de R_0 para distintos pulsos de descarga de la batería. Se calcula un valor de R_0 para cada una de las funciones de UOC(SOC). Como resultado, se obtuvieron los siguientes valores de R_0: 0.3205 para UOC(SOC) con forma logarítmica; 0.325 para UOC(SOC) polinomial, y 0.328 para UOC(SOC) mixto.

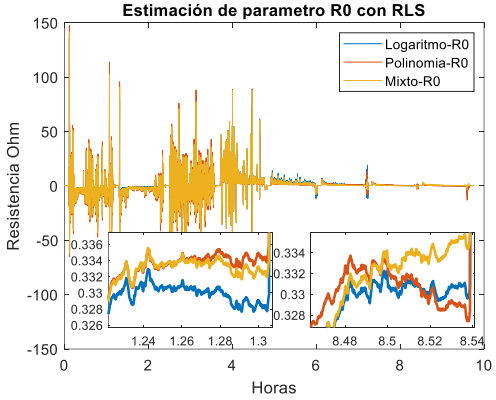


Fig. 5 Estimación de R_0 estimada con RLS

La variación de R_0 en el tiempo se observa en la Fig. 6. Aunque existe una dispersión importante, se considera R_0 como una constante con valor igual al promedio de la estimación durante el periodo en que se aplica el pulso de descarga en la batería, debido a que en el modelo R_{int} la resistencia representa la caída de voltaje que existe en la batería, por lo tanto, en los experimentos se ve mayormente reflejada en el momento del pulso de corriente de descarga. La respuesta de estos modelos (Voltaje *vs* tiempo) se muestran en la Fig. 6. El acercamiento del último pulso de descarga permite distinguir la diferencia entre las respuestas de los tres modelos de UOC(SOC).

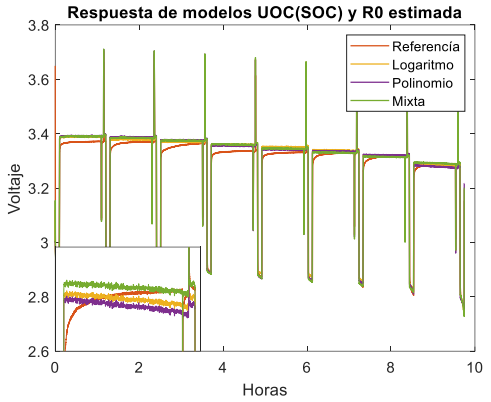


Fig. 6 Respuesta de modelos UOC(SOC) y R_0 estimada con RLS

El parámetro R_0 fue estimado también usando el FKE. La Fig. **7** muestra la variación de R_0 al aplicar los pulsos de descarga. El valor promedio es bastante similar al obtenido mediante MCR, pero la dispersión es mucho menor. La estimación de R_0 para las tres funciones UOC(SOC) son: 0.3278 para la función logarítmica, 0.331 para la función polinomial, y 0.325 para la función mixta. Integrando cada una de las tres 3 funciones UOC(SOC) y sus parámetros R_0 asociados, esta vez estimados mediante un FKE, se generaron otros tres modelos que reproducen la dinámica de la batería de ion-litio con la estructura del modelo R_{int}.

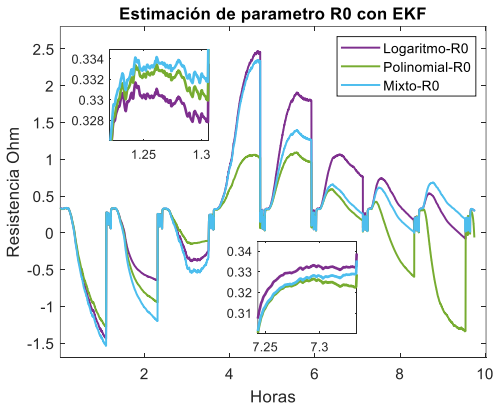


Fig. 7 Estimación de R_0 estimada con EKF

Las respuestas de los modelos (Voltaje *vs* tiempo) se muestran en la Fig. 8. El acercamiento del último pulso descarga permite distinguir la diferencia entre las respuestas de los tres modelos.

 ISSN en trámite

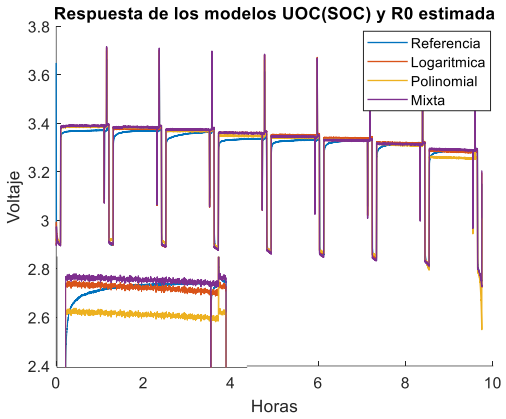


Fig. 8 Respuesta de modelos UOC(SOC) y R0 estimada con EFK

Un indicador para comparar el desempeño de los modelos R_{int} es el error cuadrado medio (Root Mean Square Error, RMSE) Cheng et al. (2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T}\sum_{k=1}^{T}\left(\hat{y}_k - y_k\right)^2} \qquad (36)$$

Los RMSE que resultan de confrontar la medición y la predicción del modelo R_{int} se reportan para seis casos. Tres casos integran las funciones UOC(SOC) logarítmica, polinomial y mixta, y sus R_0 estimados mediante MCR. Los otros tres casos integran las funciones UOC(SOC) logarítmica, polinomial y mixta, y sus R_0 estimados mediante el FKE. La Tabla 2 muestra los RMSE calculados para cada caso. Otros criterios para la evaluación del error en la estimación son la desviación estándar de la ecuación (37) y la desviación en base a la media de la ecuación (38), estos criterios se muestran en la Tabla 2.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \qquad (37)$$

$$D = \left|x_i - \bar{x}\right| \qquad (38)$$

Tabla 2 Error promedio

	EFK-RMSE	RLS-RMSE	EFK-desviación estándar	RLS-Desviación estándar	EFK-desviación en base a media	RLS-Desviación en base a media
Logaritmo	0.1655	0.1661	0.1370	0.1341	0.0132	0.0138
Polinomio	0.1656	0.1682	0.1395	0.1364	0.0096	0.0131
Mixto	0.1637	0.1606	0.1359	0.1371	0.0138	0.0130

4. CONCLUSIONES

La evaluación a través del RMSE del desempeño del modelo R_{int}, demostró que el modelo funciona bien con tres diferentes funciones para el UOC(SOC). La diferencia al usar cada una de estas funciones es pequeña, sin embargo, tienen diferencias en su comportamiento. Se observó que cuando la batería está a punto de ser descargada, el modelo con UOC(SOC) mixto sigue mejor el comportamiento de la batería que con las otras dos funciones. El modelo R_{int} permite modelar las caídas de tensión con poco error; sin embargo, al ser un modelo estático no sigue los transitorios de la batería. Aun así, para transitorios cortos, este modelo tan simple reproduce bien las variaciones de tensión de la batería de ion-litio ante una entrada dinámica. En este trabajo se concluye que modelo con función UOC(SOC) formada con polinomios y logaritmos predice mejor el voltaje de la batería. Se registraron estimaciones de R_0 por MCR y FKE próximas, sin embargo, el EKF produce menos variación en la estimación, lo cual facilita asignar un valor constante estimado al parámetro. Como resultado se observó que el EKF produce un error menor en la salida del modelo $R_{int.}$ La dificultad para implementar el FKE se encuentra en proponer valores iniciales para el ruido en el sistema y en los sensores, asimismo los valores iniciales para la covarianza. La ventaja del FKE es que puede funcionar para sistemas que contienen no linealidades y así mismo nos da la ventaja de poder estimar estados y parámetros del sistema de forma individual. En cuanto a los MCR, al encontrarnos con sistemas con más ecuaciones dinámicas se necesita desarrollar las ecuaciones del modelo para finalmente poder obtener los parámetros a estimar, sin embargo, estos parámetros quedan correlacionados entre si volviéndose difíciles de estimar individualmente.

REFERENCIAS

Cea, R., & Iván, Á. (2017). *Modelo para la batería de ion de litio de un vehículo eléctrico*. Tesis de maestría. http://uvadoc.uva.es:80/handle/10324/24673

Cheng, Z., Lv, J., Liu, Y., & Yan, Z. (2014). *Estimation of State of Charge for Lithium-Ion Battery Based on Finite Difference Extended Kalman Filter*. Journal of Applied Mathematics, 2014, 1-10. https://doi.org/10.1155/2014/348537

Du, H., Cao, D., & Zhang, H. (2018). *Modeling, Dynamics, and Control of Electrified Vehicles*. 521.

Fang, Y. Q., Cheng, X. M., & Yin, Y. L. (2013). *SOC Estimation of Lithium-Ion Battery Packs Based on Thevenin Model. Applied Mechanics and Materials*, 299, 211-215. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.299.211

Hidalgo-Reyes, J. I., Gómez-Aguilar, J. F., Alvarado-Martínez, V. M., López-López, M. G., & Escobar-Jiménez, R. F. (2019). *Battery state-of-charge estimation using fractional extended Kalman filter with Mittag-Leffler memory*. Alexandria Engineering Journal.

Jiang, J., & Zhang, C. (2015). *Performance Modeling of Lithium-ion Batteries. Fundamentals and Applications of Lithium-Ion Batteries in Electric Drive Vehicles*, 9-42. https://doi.org/10.1002/9781118414798.ch2

Lin, C., Yu, Q., Xiong, R., & Wang, L. Y. (2017). *A study on the impact of open circuit voltage tests on state of charge estimation for lithium-ion batteries*. Applied Energy, 205, 892-902. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.124

ISSN en trámite

Li, Y., Vilathgamuwa, M., Farrell, T., Tran, N. T., & Teague, J. (2019). *A physics-based distributed-parameter equivalent circuit model for lithium-ion batteries*. Electrochimica Acta, 299, 451-469.

Makinejad, K., Arunachala, R., Arnold, S., Ennifar, H., Zhou, H., Jossen, A., & Changyun, W. (2015). *A Lumped Electro-Thermal Model for Li-Ion Cells in Electric Vehicle Application*. World Electric Vehicle Journal, 7(1), 1-13. https://doi.org/10.3390/wevj7010001

Meng, J., Stroe, D.-I., Ricco, M., Luo, G., & Teodorescu, R. (2019). *A Simplified Model-Based State-of-Charge Estimation Approach for Lithium-Ion Battery With Dynamic Linear Model*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 66(10), 7717-7727. https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2880668

Plett, G. L. (2004). *Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs*. Journal of Power Sources, 134(2), 277-292. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.02.033

Plett, G. L. (2015). *Battery management systems: Battery modeling*. Volume 1. Artech House.

Plett, G. L. (2016). *Battery management systems*. Vol. 2: Equivalent-circuit methods. Artech House.

Saleem, K., Mehran, K., & Ali, Z. (2020). *Online reduced complexity parameter estimation technique for equivalent circuit model of lithium-ion battery*. Electric Power Systems Research, 185, 106356.

Shrivastava, P., Soon, T. K., Idris, M. Y. I. B., & Mekhilef, S. (2019). *Overview of model-based online state-of-charge estimation using Kalman filter family for lithium-ion batteries*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 113, 109233. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.040

Wang, S., Stroe, D. I., Fernandez, C., Yu, C., Zou, C., & Li, X. (2020). *A novel energy management strategy for the ternary lithium batteries based on the dynamic equivalent circuit modeling and differential Kalman filtering under time-varying conditions*. Journal of Power Sources, 450, 227652.

Wei, Z., Zhao, J., Zou, C., Lim, T. M., & Tseng, K. J. (2018). *Comparative study of methods for integrated model identification and state of charge estimation of lithium-ion battery*. Journal of Power Sources, 402, 189-197. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.09.034

Xiong, R. (2020). *Battery Management Algorithm for Electric Vehicles*. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0248-4

Xiong, R., & Shen, W. (Eds.). (2018). *Battery Modeling*. En Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles (pp. 31-65). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781119481652.ch2.

Zhang, Q., Shang, Y., Li, Y., Cui, N., Duan, B., & Zhang, C. (2020). *A novel fractional variable-order equivalent circuit model and parameter identification of electric vehicle li-ion batteries*. ISA transactions, 97, 448-457.

Control por modos deslizantes en un motor de CD: resultados experimentales

Rodrigo A. Napabé Ramírez * **Josué Enríquez Zárate** *
María A. Gómez López * **Teodulo I. Bravo Cruz** *

* *Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carretera Panamericana Km 1080, C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México (e-mail: napabe-07@hotmail.com)*

Resumen: En este artículo se presenta el diseño de un controlador para un motor de CD de escobillas con el objetivo de controlar la velocidad para un valor de referencia constante tipo escalón. El sistema es modelado a través del formalismo de Euler-Lagrange, y una aproximación utilizando la Transfornmada de Laplace, es establecida para representar a todo el sistema en términos de la velocidad. El controlador utilizado esta propuesto en un esquema de control robusto basado en la dinámica del modos deslizantes. Finalmente, se presentan resultados numéricos para analizar el desempeño del controlador, así como su validación a través de una plataforma experimental, comparando los resultados obtenidos.

Keywords: Modos deslizantes, resultados experimentales, control de velocidad, motor de corriente directa Brushed.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad muchos sistemas mecatrónicos requieren del uso de actuadores, que les permitan controlar una variable de interés. Estos controladores generalmente, se diseñan considerando la presencia de señales exógenas perturbadoras que intervienen en la dinámica del sistema, las cuales pueden ser: ruido eléctrico, mecánico o incluso ambientales como vibraciones debido a la presencia de automóviles, trenes subterráneos, sismos, entre otros. Algunos esquemas de control, no ofrecen una condición de robustez que reduzca el efecto de perturbaciones. En este sentido, el esquema de control por modos deslizantes es ampliamente conocido como uno de los principales controles robustos disponible en la literatura de ingeniería de control. Munoz-Gomez et al. (2018). En este trabajo se presentan los resultados numéricos y experimentales de la implementación de un controlador basado en modos deslizantes, para el seguimiento de una velocidad constante en un motor de CD. Maheswararao et al. (2011) presenta el control de un motor de CD aplicando un esquema de control por modos deslizantes. Morfín et al. (2018) establece un análisis enfocada hacia la identificación de los parámetros necesarios para el modelado de un motor de inducción tipo jaula de ardilla. Umeno and Hori (1991) propone un control de velocidad robusto para servomotores de CD basado en su parametrización, para la implementación en controladores de dos grados de libertad. Suman and Giri (2016) presenta el control de velocidad en motores de CD mediante la implementación de algoritmos genéticos para controladores PIDs, con la finalidad de optimizar los parámetros del controlador. En Linares-Flores and Sira-Ramirez (2004) se presenta una investigación basada en el diseño de un controlador basado en pasividad y planitud diferencial, para la regulación de la velocidad en un motor de CD.

El articulo esta estructurado de tal manera, que en la sección 1 se presenta una breve introducción relacionado con el estado del arte del caso de estudio, la sección 2 consiste en el modelo matemático del sistema, la sección 3 corresponde a la descripción del sistema del motor CD, en la sección 4 se presenta el diseño del esquema de control por modos deslizantes, en la sección 5 y 6 se presenta los resultados numéricos y experimentales, respectivamente y finalmente la sección 7 corresponde a las conclusiones preliminares del trabajo presente.

2. MODELADO MATEMÁTICO

El sistema es modelado mediante el formalismo de *Euler-Lagrange*, considerando como variables de interés la velocidad $\omega(t)$ y la corriente $i_a(t)$. Resultando las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dw(t)}{dt} = -\frac{b}{J}\omega(t) + \frac{K_t}{J}i_a(t) \tag{1}$$

$$\frac{di_a(t)}{dt} = -\frac{K_b}{L_a}\omega(t) - \frac{R_a}{L_a}i_a(t) + \frac{1}{L_a}V_a(t) \tag{2}$$

En forma matricial el sistema de ecuaciones pueden ser expresados como:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\omega(t)}{dt} \\ \frac{di_a}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & \frac{K_t}{J} \\ \frac{-K_b}{L_a} & \frac{-R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_a(t) \tag{3}$$

donde:

$w(t)$: Es la variable de estado del motor.
J: Es el momento de inercia.

i_a: Es la corriente de armadura.
K_t: Factor de torque.
K_b: Constante EMF en $\frac{Vs}{rad}$.
L_a: Inductancia de la armadura.
R_a: Resistencia de la armadura.
V_a: Tensión eléctrica inducida

Para simplificar el análisis en la dinámica del sistema, se propone aplicar la Transformada de *Laplace* en las ecuaciones (1) y (2), resultando que el sistema puede ser expresado como:

$$s\omega(s) = -\frac{b}{J}\omega(s) + \frac{K_t}{J}i_a(s) \quad (4)$$

$$si_a(s) = -\frac{K_b}{L_a}\omega(s) - \frac{R_a}{L_a}i_a(s) + \frac{1}{L_a}V_a(s) \quad (5)$$

A partir de la (4) es posible obtener $i_a(s)$:

$$i_a(s) = \frac{Js + b}{K_t}\omega(s) \quad (6)$$

Y sustituyendo en (5) se puede reducir la representación del sistema como:

$$s^2\omega(s) + \left(\frac{b}{J} + \frac{R_a}{L_a}\right)s\omega(s) + \left(\frac{R_ab + K_bK_t}{L_aJ}\right)\omega(s) = \frac{K_t}{L_aJ}V_a(s) \quad (7)$$

Aplicando la Transformada Inversa de *Laplace* a la ecuación (7), obtenemos que la dinámica en el tiempo de la velocidad del motor de CD queda expresado como:

$$\ddot{\omega}(t) + \left(\frac{b}{J} + \frac{R_a}{L_a}\right)\dot{\omega}(t) + \left(\frac{R_ab + K_bK_t}{L_aJ}\right)\omega(t) = \frac{K_t}{L_aJ}V_a(t). \quad (8)$$

Por lo tanto, a partir de la ecuación (8), aplicando un cambio de variable de $x_1 = \omega$ y $x_2 = \dot{x_1}$, y tomando en $u(t)$ es la entrada del control al sistema, se obtiene que la dinámica del sistema en variables de estado es:

$$\dot{x_2} = -\left(\frac{R_ab + K_bK_t}{L_a}\right)x_1 - \left(\frac{b}{J} + \frac{R_a}{L_a}\right)x_2 + \frac{K_t}{L_aJ}u(t). \quad (9)$$

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema consiste en un motor de CD de $MAXON^{®}$ modelo EI-148867 con escobillas, utilizado para aplicaciones en robótica, automatización y sistemas mecatrónicos. Las características eléctricas del actuador se presentan en la Tabla 2.

Table 1. Parámetros eléctricos

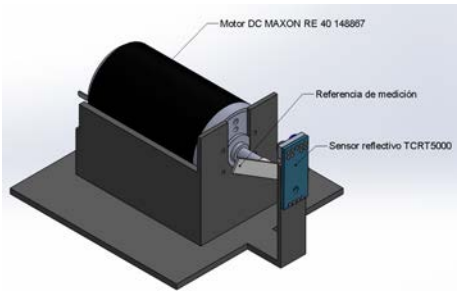
	Parámetro	Valor	Unidad
Resistencia de armadura	R_a	0.299	Ω
Constante FEM	K_b	30.2	$\frac{Vs}{seg}$
Inductancia de armadura	L_a	$8.23x10^{-2}$	H

Table 2. Parámetros mecánicos

	Parámetro	Valor	Unidad
Momento de inercia motor	J	$14.2x10^{-3}$	$Kg{\cdot}m^2$
Constante de torque	K_t	30.2	$N{\cdot}m/A$
Coeficiente de fricción viscosa	b	0.0167	-

El diseño e implementación de la instrumentación para el sistema de adquisición de datos esta basado en el módulo de $NationalInstruments^{TM}$ NI-USB-6002, que es utilizado para la manipulación de las señales entrada-salida analógicas tanto del sensor de velocidad utilizado el cual consiste en un sensor óptico reflexivo con transistor de salida modelo TCRT5000(L), así como las señales de control utilizadas por el esquema de control diseñado en $Matlab^{®}/Simulink^{®}$, combinado con la plataforma de $Arduino^{TM}$ modelo MEGA-2560, utilizada para enviar las señales PWM al motor, esto debido a que el moduloo de $NationalInstruments^{TM}$ no cuenta con una salida de este tipo de señal.

En la Figura 1 se observa un diseño en CAD del sistema a controlar, así como el sistema real o plataforma experimental.



(a)



(b)

Fig. 1. Caso de estudio: (a) Diseño esquemático; (b) Plataforma experimental

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR POR MODOS DESLIZANTES

El esquema de control por modos deslizantes, es una técnica que es ampliamente utilizada en sistemas con dinámicas no-lineales Enríquez-Zárate and Silva-Navarro (2004), y que se encuentran expuestas a presencia de incertidumbres o perturbaciones desconocidas. Este tipo de controlador conocido como robusto, utiliza una superficie de conmutación con cierto valor de frecuencia conocido como chattering. Lo que permite una respuesta rápida por parte del control con un esfuerzo de control admisible Enríquez-Zárate et al. (2000).

Es importante mencionar que el fenómeno del chattering compromete en un porcentaje la vida útil de un actuador eléctrico. Sin embargo, es posible justificar la implementación de un esquema de control robusto, debido a su desempeño para la minimización en la dinámica de un sistema. como menciona

Para el caso de estudio que consiste en el control de velocidad del motor de CD, se propone la siguiente superficie de

conmutación que asegura un seguimiento asintótico para una referencia tipo escalón.

$$\sigma = \lambda e + x_2 \tag{10}$$

donde e representa al error de seguimiento entre la señal de referencia y_s y la salida a controlar $w(t)$=x_1:

$$e = y_s - x_1 \tag{11}$$

sustituyendo en la ecuación (10) se obtiene que:

$$\sigma = \lambda(y_s - x_1) + x_2 \tag{12}$$

y derivando la superficie de conmutación σ, con una referencia y_s tipo escalón resulta que:

$$\dot{\sigma} = \dot{x_2} - \lambda x_2 \tag{13}$$

Considerando la superficie de conmutación σ, el esquema de control por modos deslizantes queda representado como:

$$U = u_d + u_c \tag{14}$$

$$u_d = -L\frac{\sigma}{||\sigma|| + \epsilon} \tag{15}$$

donde L es la ganancia del controlador discontinuo y ϵ es el coeficiente de saturación que tiene efecto en el chattering.

Expresado en términos del control continuo o equivalente y del discontinuo, u_c y u_d, respectivamente. Por lo tanto, el controlador por modos deslizantes resultante es:

$$u_c = \frac{L_a J}{K_t}\left(\frac{R_a b + K_t K_b}{L_a}x_1 + \frac{\lambda + R_a J + L_a b}{L_a J}x_2\right) \tag{16}$$

Despejando x_2 de la ecuación (13) en la ecuación (9), se tiene que el controlador queda expresado como:

$$U = \frac{L_a J}{K_t}\left(\frac{R_a b + K_t K_b}{L_a}x_1 + \frac{\lambda + (R_a J + L_a b)}{L_a J}x_2\right) + u_d \tag{17}$$

Los resultados del controlador resultante son evaluados considerando inicialmente las dinámicas no modeladas del sistema original, las cuales se representan en un primer caso de estudio como las perturbaciones $p(t)$ asociados al controlador discontinuo.

5. RESULTADOS NUMÉRICOS

El sistema es evaluado considerando una señal de referencia y_d constante tipo escalón en términos de la velocidad $\omega(t) = 1800$ RPM. Para implementar el esquema de control por modos deslizantes, se consideran los valores de la Tabla 3 en los parámetros del controlador, que posteriormente son utilizados para analizar el desempeño de la plataforma experimental.
Para evaluar el desempeño del controlador, se consideraron los siguientes parámetros de simulación: el método de integración corresponde al tipo Runge Kutta y el paso de muestreo fue $t_s = 0.01$.
Nota: importante mencionar que los parámetros del controlador se propusieron experimentalmente, considerando un valor de ganancia L suave y rápido, observando la respuesta del sistema en varias pruebas, con diferentes valores de L. Finalmente, el valor del ϵ se propuso significativamente pequeño, con la finalidad de minimizar el desempeño dinámico del actuador por efecto de chattering del controlador.

Table 3. Descripción de los parámetros de control

	Parámetro	**Valor**
Lambda	λ	0.1
Coeficiente de saturación	ϵ	1x10^{-9}
Ganancia de control	L	1

5.1 Señal de referencia tipo escalón

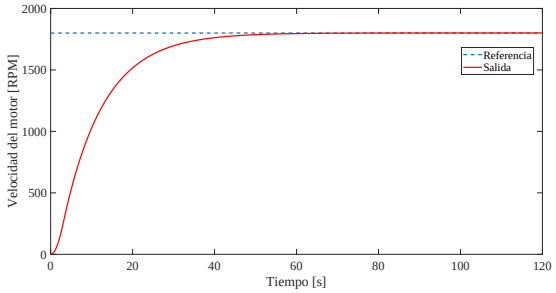


Fig. 2. Seguimiento de una referencia a 1800 RPM

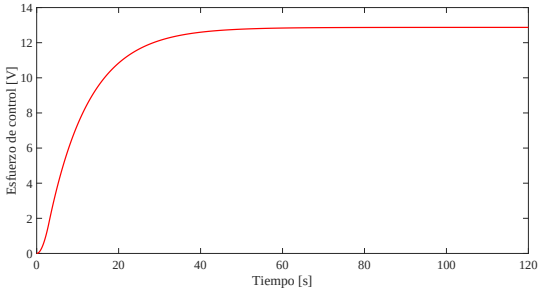


Fig. 3. Control total por modos deslizantes

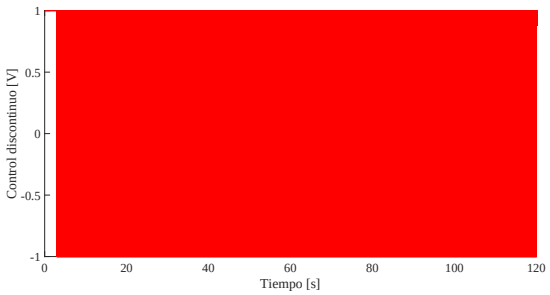


Fig. 4. Control discontinuo

En la respuesta numérica del sistema (ver Fig. 2) se observa que el seguimiento hacia la referencia es suave, estabilizándose en periodo de tiempo $t = 60s$, aplicando

 ISSN en trámite

un esfuerzo de control total alrededor de 13 Volts. Es importante observar que el control discontinuo, conmuta en valores entre 1 y -1 Volts, con un valor de saturación $\epsilon = 1x10^{-9}$.

5.2 Señal de referencia tipo sinusoidal

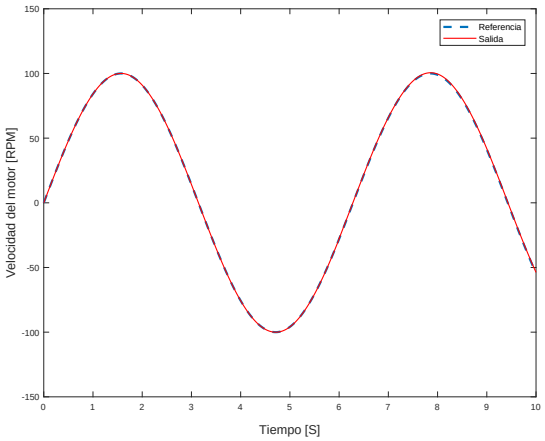


Fig. 5. Seguimiento de una referencia a 1800 RPM

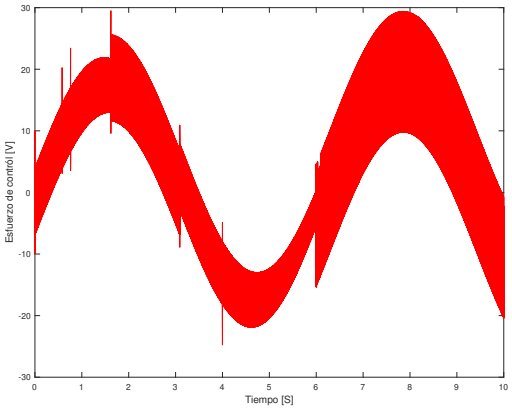


Fig. 6. Control total por modos deslizantes

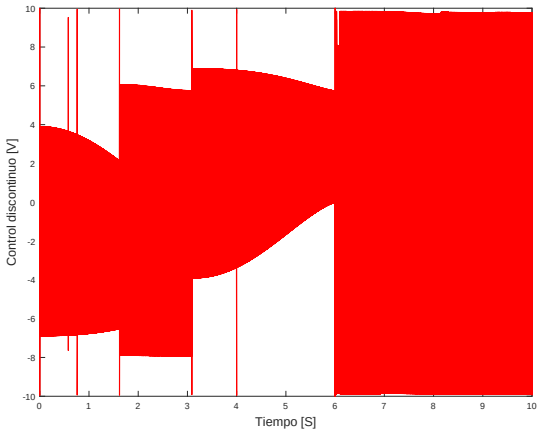


Fig. 7. Control discontinuo

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La validación del modelo matemático obtenido del motor de CD, se realiza aplicando una velocidad de referencia y_d similar al utilizado en la evaluación numérica. En este caso no se considera la presencia de perturbaciones $p(t)$ en la dinámica del sistema.

La respuesta de la plataforma experimental (Fig. 8 - 10) indica un seguimiento asintótico de la velocidad del motor $\omega(t)$ hacia el valor de la referencia $y_d = 1800$ RPM. En este sentido, se observa que el sistema alcanza a la referencia en un tiempo $t = 60s$, con un esfuerzo de control total alrededor de 18 Volts. Por otro lado, el control discontinuo presenta una respuesta de conmutación con valores entre 1 y -1 Volts, con valor de saturación 1x10^{-9}.

Es importante observar que la salida del sistema $\omega(t)$, alcanza a la referencia $y_(s)$ de manera suave en un tiempo (t) aceptable. sin embargo, existe un seguimiento con ciertas oscilaciones sobre la referencia, lo cual, se asume que se puede resolver estableciendo una mejor sintonización del controlador e identificación de los parámetros físicos del sistema de manera experimental.

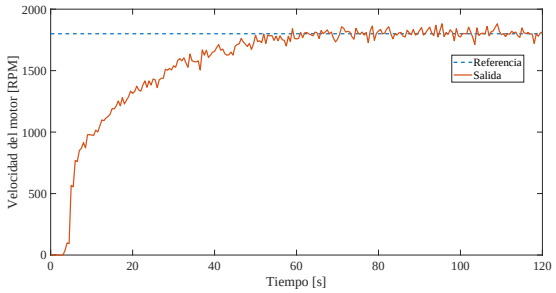


Fig. 8. Seguimiento de una referencia a 1800 RPM

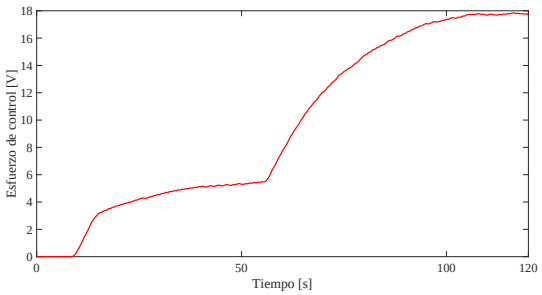


Fig. 9. Control total por modos deslizantes

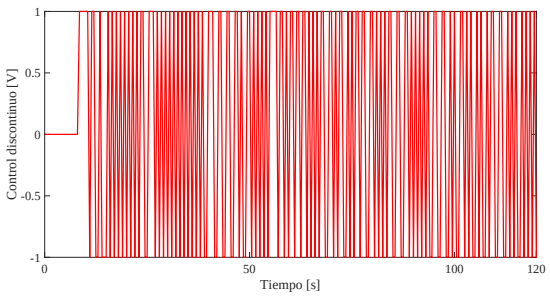


Fig. 10. Control discontinuo

7. CONCLUSIONES

El control de velocidad en motores de CD, utilizando técnicas de control robustos como el basado en modos deslizantes, permite asegurar un seguimiento asintótica para velocidades con referencias constantes, permitiendo incluso minimizar el efecto de señales perturbadoras en la dinámica de todo el sistema. El modelo numérico es validado con la respuesta de la plataforma experimental, obteniéndose una diferencia de aproximadamente 5 Volts en la respuesta del control total $u(t)$. Finalmente, como trabajos a futuro se propone realizar un análisis comparativo con respecto al desempeño del controlador, implementando esquemas de control basados en la teoría de Modos Deslizantes Integral, *Takagi-Sugeno* y MPCs.

REFERENCES

Choi, H.s., Park, Y.h., Cho, Y., and Lee, M. (2001). Global sliding-mode control. improved design for a brushless dc motor. *IEEE control systems magazine*, 21(3), 27–35.

Divandari, M., Rezaie, B., and Noei, A.R. (2019). Speed control of switched reluctance motor via fuzzy fast terminal sliding-mode control. *Computers & Electrical Engineering*, 80, 106472.

El-Samahy, A.A. and Shamseldin, M.A. (2018). Brushless dc motor tracking control using self-tuning fuzzy pid control and model reference adaptive control. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(3), 341–352.

Enríquez-Zárate, J. and Silva-Navarro, G. (2004). Active vibration control in a nonlinear mechanical system using a flatness based sliding-mode control: experimental results. In *(ICEEE). 1st International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 2004.*, 327–332. IEEE.

Enríquez-Zárate, J., Silva-Navarro, G., and Sira-Ramírez, H. (2000). Sliding mode control of a differentially flat vibrational mechanical system: Experimental results. In *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 00CH37187)*, volume 2, 1679–1684. IEEE.

Linares-Flores, J. and Sira-Ramirez, H. (2004). Dc motor velocity control through a dc-to-dc power converter. In *2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)(IEEE Cat. No. 04CH37601)*, volume 5, 5297–5302. IEEE.

Maheswararao, C.U., Babu, Y.K., and Amaresh, K. (2011). Sliding mode speed control of a dc motor. In *2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, 387–391. IEEE.

Mishra, R.N. and Mohanty, K.B. (2020). Development and implementation of induction motor drive using sliding-mode based simplified neuro-fuzzy control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 91, 103593.

Morfín, O.A., Castañeda, C.E., Ruiz-Cruz, R., Valenzuela, F.A., Murillo, M.A., Quezada, A.E., and Padilla, N. (2018). The squirrel-cage induction motor model and its parameter identification via steady and dynamic tests. *Electric Power Components and Systems*, 46(3), 302–315.

Munoz-Gomez, G., Alanis, A.Y., and Rivera, J. (2018). Nested high order sliding mode controller applied to a brushless direct current motor. *IFAC-PapersOnLine*, 51(13), 174–179.

Suman, S.K. and Giri, V.K. (2016). Speed control of dc motor using optimization techniques based pid controller. In *2016 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH)*, 581–587. IEEE.

Umeno, T. and Hori, Y. (1991). Robust speed control of dc servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 38(5), 363–368.

Comparación de Tres Estrategias de Detección y Diagnóstico de Fallas para un Sistema de Conversión de Energía Eólica

Diego Enrique Rivera Espinoza*. Gerardo Vicente Ramírez Guerrero*
Manuel Adam Medina. Jarniel García Morales****

**TecNM/CENIDET, Electronic Engineering Deparment, Cuernavaca Morelos, México (e-mail: diego.rivera18ea@ cenidet.edu.mx).*

Resumen: En este artículo se presenta la comparación de tres estrategias de detección y diagnóstico de fallas aplicadas a los subsistemas *Pitch* y eléctrico de un sistema de conversión de energía eólica (WECS, por sus siglas en inglés), dos algoritmos de detección y diagnóstico basados en modelo y uno en procesamiento de señales. Para realizar el análisis del desempeño de las estrategias seleccionadas, se realizó la simulación de ocho escenarios de falla basados en un modelo *Benchmark* el cual emula el comportamiento dinámico de un WECS de 4.8 MW. Adicionalmente, se realizó la comparación del desempeño de los tres esquemas de detección y diagnóstico considerados en este estudio.

Keywords: *WECS*, Subsistema *Pitch*, Subsistema eléctrico, Filtro de Kalman, Observador por modos deslizantes, Red Neuronal Artificial, Detección de Fallas, Diagnóstico de Fallas, *Benchmark*

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos veinte años se ha incrementado considerablemente la demanda de energía eléctrica producida a través de fuentes de energía limpia debido al aumento de los costos, reservas limitadas y el impacto ambiental que producen los combustibles fósiles. Por tal motivo, la producción de energía eléctrica por medio de la energía procedente del viento, se ha convertido en una de las principales fuentes de energía limpia, REN 21, (2019).

Un estudio realizado a los parques eólicos de Suecia durante el período 1997-2005 presenta la distribución del número de fallas reportadas durante 2000-2004, así como el tiempo de paro correspondiente a los subsistemas dañados, siendo el sistema eléctrico el subsistema con mayor índice de fallas reportadas, Ribrant, et al. (2017). Conjuntamente las fallas en el sistema de engranaje ocasionan un tiempo de paro mayor al tiempo considerado para la rehabilitación de fallas en el sistema eléctrico. En el 2013 el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), presenta una evaluación de la confiabilidad de los principales subsistemas que conforman al WECS, estudiando una base de datos de los registros históricos de operación obtenidos de dos parques eólicos instalados en Europa, en donde se indica que el sistema *Pitch* es el subsistema con mayor número de incidencias reportadas durante el periodo de análisis establecido, NREL, (2013). Durante el periodo del 2009-2013, en China se realizó un análisis de la frecuencia de falla de los diferentes componentes del WECS de una granja eólica local, en donde el sistema de control presentó la tasa de falla más elevada durante el periodo de estudio considerado Su, et al. (2016). En Alhmoud, et al. (2017), se realizó un análisis de confiabilidad basado en la información literaria, para identificar y clasificar el tipo de fallas presentes en los sistemas de conversión de energía eólica, dando como resultado que se ha reportado un número mayor de fallas para el sistema *Pitch* en comparación con los subsistemas caja de cambios, sistema *Yaw*, convertidor de potencia y generador eléctrico. En el año 2018, se realizó un análisis de confiabilidad de las turbinas de viento instaladas en los principales países generadores de energía eléctrica a través de la energía cinética del viento, en dónde se destaca el sistema eléctrico como principal componente susceptible a falla seguido por los sensores de medición y el sistema *Pitch,* adicionalmente se indica el tiempo que transcurre para poder rehabilitase el componente dañado, Zhu, et al. (2018).

Actualmente, los esquemas y/o algoritmos de detección y diagnóstico de fallas en un WECS generalmente poseen una esencia conservadora, careciendo de profundidad en su análisis, toma de decisiones y resultados. En la última década los diseñadores de WECS a nivel mundial han incursionado en el desarrollo de algoritmos de detección y diagnóstico de fallas basados en el procesamiento de señales y modelos matemáticos. Sin embargo, aún persiste la disyuntiva acerca del escenario óptimo de implementación de un algoritmo basado en modelo y un método fundamentado en el procesamiento de señales.

En este artículo se realiza un análisis comparativo de tres estrategias de detección y diagnóstico de fallas, dos de ellas basadas en modelo matemático y una en procesamiento de señales. Los esquemas de detección y diagnóstico de fallas fueron enfocados en analizar los comportamientos anómalos presentes en los subsistemas *Pitch* y eléctrico. La comparación se realizó tomando en cuenta las mismas condiciones iniciales, tiempo de simulación y señales de medición con ruido,

simulando las estrategias de detección y diagnóstico de fallas propuestas en un modelo *Benchmark*, el cuál emula el comportamiento dinámico de una turbina eólica horizontal de tres aspas con una capacidad de 4.8 MW. Odgaard, et al. (2009)

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

2.1 Descripción general del sistema

El sistema de conversión de energía eólica transforma la energía cinética proveniente del viento en energía mecánica mediante el movimiento de las aspas del rotor de la turbina eólica; posteriormente, ésta energía es transmitida mediante un eje de transmisión de baja velocidad hacia una caja de cambios multiplicadora la cual se interconecta con un eje de transmisión de alta velocidad conectado con el generador eléctrico para convertir la energía mecánica en energía eléctrica. En la Fig. 1, se muestra el diagrama de bloques de los principales subsistemas que conforman al WECS, así como la relación entre las variables de entrada y salida de los diferentes subsistemas que conforman al WECS: aerodinámico, *Pitch, Yaw,* tren de transmisión y eléctrico (generador y convertidor eléctrico).

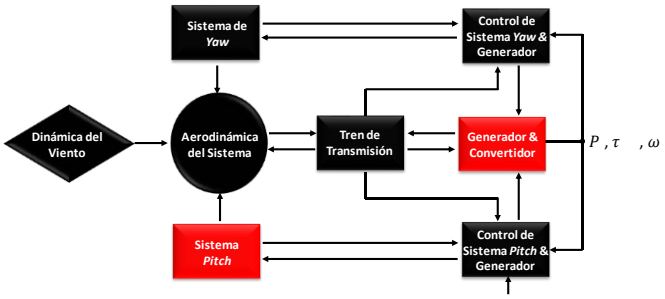


Fig. 1. Diagramas de bloques de los subsistemas que conforman al sistema de conversión de energía eólica

A continuación, se describen los componentes del modelo *Benchmark* utilizado para realizar la comparación de los tres métodos de detección y diagnóstico de fallas propuestos en este trabajo.

2.1 Subsistema aerodinámico

El modelo del subsistema aerodinámico considera una turbina eólica horizontal de tres aspas, en donde la posición de cada aspa es medida por dos sensores de forma redundante, Odgaard, et al. (2009). Tomando en cuenta que el viento impacta directamente las aspas de la turbina eólica generando un par aerodinámico el cual es definido mediante la ecuación indicada en (1).

$$\tau_r(t) = \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q\left(\lambda(t), \beta_i(t)\right) v_w^2(t) \qquad (1)$$

En donde C_q es el coeficiente de par en función del ángulo de *Pitch* y la relación de la velocidad en la punta del aspa. R corresponde al radio de las aspas de la turbina de viento. El ángulo de inclinación de las aspas se define como β y el subíndice i corresponde al número de aspas de la turbina eólica. λ es la relación existente entre la velocidad en la punta del aspa y v_w la velocidad del viento tal y como se establece en (2).

$$\lambda = \frac{\omega_r \cdot R}{v_w^2} \qquad (2)$$

Donde, ω_r corresponde a la velocidad angular del rotor de la turbina eólica.

2.2 Subsistema Pitch

El subsistema *Pitch* es modelado como una función de transferencia de segundo orden en lazo cerrado, la cual representa la relación entre el ángulo de referencia de *Pitch* requerido por el sistema de control y el ángulo de *Pitch* de cada aspa definido por el comportamiento dinámico de un mecanismo de paso simple impulsado por un servomotor con retorno por resorte como se muestra en (3), retomada de Odgaard, et al. (2009).

$$\frac{\beta(s)}{\beta_r(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \qquad (3)$$

En donde β_r, corresponde al ángulo de inclinación de referencia requerido por el sistema de control del WECS, mientras que ξ y ω_n son los coeficientes de amortiguamiento y la frecuencia natural del sistema respectivamente, Xiahou, et al. (2017).

2.3 Subsistema del tren de transmisión

El tren de transmisión es modelado como la interconexión del eje de baja velocidad proveniente del rotor de la turbina eólica y el eje de alta velocidad acoplado al generador eléctrico, mediante una caja multiplicadora elevadora de engranes. Las ecuaciones que definen el comportamiento dinámico del tren de transmisión se representan en el espacio de estados indicado en (4), retomado de Odgaard, et al. (2009).

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_r(t) \\ \dot{\omega}_g(t) \\ \dot{\theta}_\Delta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_{dt}-B_r}{J_r} & -\frac{B_{dt}}{N_g J_r} & -\frac{K_{dt}}{J_r} \\ \frac{\eta B_{dt}}{N_g J_g} & -\frac{\eta B_{dt}}{N_g^2 J_g} & \frac{\eta K_{dt}}{N_g J_g} \\ 1 & -\frac{1}{N_g} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r(t) \\ \omega_g(t) \\ \theta_\Delta(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_r(t) \\ \tau_g(t) \end{bmatrix} \qquad (4)$$

En donde ω_r y ω_g, representan las velocidades angulares del rotor de la turbina eólica y del generador eléctrico respectivamente, mientras que θ_Δ es el desplazamiento angular entre el tren de baja y alta velocidad. τ_r y τ_g se refieren a los pares producidos por la turbina eólica y generador eléctrico. B_{dt}

y B_r corresponde a los coeficientes de fricción viscosa del tren de transmisión y del rotor de la turbina eólica. K_{dt}, es la constante de rigidez del tren de transmisión, J_g el momento de inercia del eje de alta velocidad, mientras que N_g indica la relación de engranes de la caja de cambios y η define la eficiencia del tren de transmisión, Odgaard, et al. (2009).

2.4 Subsistema eléctrico

El comportamiento dinámico del subsistema eléctrico es representado mediante la función de transferencia mostrada en (5) y retomada de Odgaard, et al. (2009).

$$\frac{\tau_g(s)}{\tau_{gr}(s)} = \frac{\alpha_{gc}}{s+\alpha_{gc}} \tag{5}$$

La potencia producida por el generador se define en (6).

$$P_g(t) = \eta_g \omega_g(t) \tau_g(t) \tag{6}$$

En donde η_g representa la eficiencia del generador eléctrico.

2.5 Control del sistema Pitch

La operación normal de una turbina eólica se divide en cuatro zonas de operación. La primera zona corresponde a la etapa de arranque de la turbina, la segunda zona comprende la optimización de la potencia de la turbina. La tercera zona considera la producción de potencia constante, mientras que la cuarta zona se refiere a la máxima potencia producida. El *Benchmark* utilizado presenta una estrategia de control que incide directamente en la primera y segunda zona de operación de la turbina eólica, Odgaard, et al. (2009).

3. ESTRATEGIAS DE DETECCIÓN DE FALLA CONSIDERADAS

3.1 Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo matemático, óptimo y recursivo, considerado un método basado en modelo capaz de estimar estados y señales a través de la minimización del error cuadrático medio, tomando en cuenta el ruido en las observaciones de las variables y la incertidumbre implícita en la dinámica del sistema, Xiahou et al. (2017). El algoritmo se divide en dos etapas fundamentales: predicción y corrección. En (7) a (13) se presenta el algoritmo del filtro de Kalman para un sistema lineal discreto.

Definición de las condiciones iniciales:

$$\hat{x}(k) \; y \; P(k) \tag{7}$$

Etapa de predicción:

Predicción del estado

$$x^{-}(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \tag{8}$$

Predicción de la matriz de covarianzas

$$P^{-}(k+1) = AP(k)A^{T} + Q \tag{9}$$

Etapa de corrección:

Cálculo del vector de ganancias

$$K(k+1) = CP^{-}(k+1)[CP^{-}(k+1)C^{T} \ldots + \ldots R(k+1)]^{-1} \tag{10}$$

Actualización del estado

$$\hat{x}(k+1) = x^{-}(k+1) + K(k+1)[y(k+1) \ldots - \ldots Cx^{-}(k+1)] \tag{11}$$

Actualización de la matriz de covarianza

$$P(k+1) = [1 - KC]P^{-}(k+1) \tag{12}$$

3.2 Observador por modos deslizantes super-twisting

Una de las principales características que posee el observador por modos deslizantes basado en el algoritmo s*uper-twisting* es su robustez ante perturbaciones e incertidumbre paramétrica, amplitud y derivadas acotadas, que satisfacen las condiciones de acoplamiento, garantizando la convergencia en tiempo finito. El algoritmo es capaz de reconstruir una señal dañada a partir de cualquier señal emitida por un sensor de entrada o salida. Adicionalmente, es considerado como un estimador preciso de estados y funciones desconocidas, capaz de detectar y aislar fallas simultáneas. En (13), (14) y (15), se presenta el modelo general del observador por modos deslizantes basado en el algoritmo s*uper-twisting*, Davila, et al. (2005).

$$\dot{\hat{x}}_{\lambda i} = \dot{\hat{x}}_{\lambda i+1}, \; i = 1, \ldots m-1 \tag{13}$$

$$\dot{\hat{x}}_{\lambda i} = f_{\lambda}(x) + g_{\lambda}(x)u_{\lambda} + w_{\lambda}(x) \tag{14}$$

$$y_{\lambda} = x_{\lambda} \tag{15}$$

$$|w_{\lambda}(x)| \le \delta_{\lambda}, |\dot{w}_{\lambda}(x)| \le \delta'_{\lambda} \tag{16}$$

En donde λ representa el número de subsistemas, i el estado analizado, x_λ e y_λ corresponden al vector de estados y la salida del subsistema correspondiente. $f_\lambda(x)$ y $g_\lambda(x)$ definen las funciones continuamente diferenciables. u_λ es la entrada de control, mientras que $w_\lambda(x)$ simboliza la perturbación que depende del estado del sistema desconocida pero acotada en (16).

3.3 Red Neuronal Artificial

Típicamente la red neuronal está conformada por un conjunto de nodos clasificados en tres capas: entrada, oculta y salida. Las señales de entrada son propagadas en dirección hacia adelante a través de las diferentes capas interconectadas entre sí, mientras que en el paso hacia atrás los pesos sinápticos son ajustados de acuerdo con la señal de error obtenida de la diferencia entre la señal deseada y la señal obtenida de la respuesta de la red neuronal. Este tipo de redes neuronales es conocido como *Perceptron Multicapa* y utilizan el algoritmo de retropropagación del error dividido en dos partes, hacia adelante y atrás, Haykin, (1999). En (17) se presenta la ecuación característica de la señal de salida de la red neuronal.

$$y_j(n) = \varphi_j\left(\sum_{i=0}^{m} \omega_{ji}^{k}(n)\, x_i(n) + b_j(n)\right) \quad (17)$$

En donde φ_j función de activación, $\omega(n)$ pesos sinápticos dela red, n es número de iteración, y_j corresponde a la señal de salida (estimación) de la red neuronal.

4. ESCENARIOS DE FALLA

Para el desarrollo de este trabajo se analizaron ocho escenarios de falla, cuatro para el subsistema *Pitch* y cuatro para el subsistema eléctrico. Los ocho escenarios consideran fallas en sensores y actuadores originadas por la presencia de comportamientos anómalos de esencia mecánica y eléctrica, tal como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1 Escenarios de falla

No.	Elemento con falla	Tipo de falla	Severidad
1	β_{1m1}	Abrupta	Baja
2	β_{2m1}	Abrupta	Baja
3	B_{3m1}	Incipiente	Media
4	τ_g	Permanente	Alta
5	P_{gm}	Abrupta	Media
6	τ_{gm}	Abrupta	Media
7	ω_g	Abrupta	Alta
8	τ_{gr}	Permanente	Alta

4.1 Parámetros del modelo WECS

Los parámetros utilizados en el modelo de prueba *Benchmark* para el estudio de los escenarios de falla, se describen a continuación: Subsistema *Pitch:* R=5.75, ρ=1.225, ξ=0.6, ω_n=11.11, ξ_2=0.45, ω_{n2}=5.73, ξ_3=0.9, ω_{n3}=3.42. Subsistema tren de transmisión: B_{dt}=9.45, B_r=0, B_g=0, N_g=95, K_{dt}=2.7e9, η_{dt}=0.97, J_g=390, J_r=55e6. Control: K_{opt}=1.2171, K_i=1, K_p=4, ω_{nom}=162, P_r=4.8e6. Tiempo de simulación: 4400 s. En la Fig.2 se muestra el perfil del viento contenido el *Benchmark.*

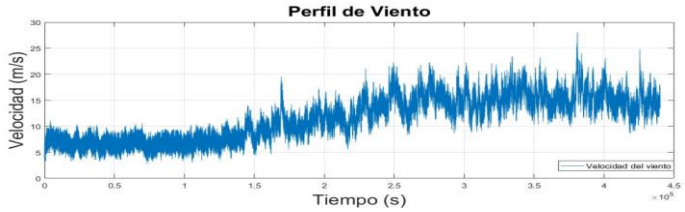


Fig. 2. Perfil del viento contenido en el *Benchmark*, Odgaard, et al. (2009)

4.1 Generación de residuos

En las Figs. 3 y 4, se presentan los esquemas de generación de residuos para los subsistemas *Pitch* y eléctrico respectivamente.

Dentro del modelo *Benchmark,* el subsistema *Pitch* se encuentra embebido en el subsistema aerodinámico debido a la correlación existente entre las señales de entrada y salida de ambos subsistemas. La señal de salida medible del subsistema *Pitch* es el ángulo de inclinación de las aspas de la turbina eólica, mientras que para el subsistema eléctrico las señales conocidas son la potencia y el par generado. Las estrategias de detección y diagnóstico de fallas referentes al *Pitch,* son alimentadas por la señal del ángulo de referencia requerido por el sistema de control del WECS y la señal de medición del ángulo de inclinación del aspa de la turbina eólica. Para el caso del subsistema eléctrico los algoritmos de detección y diagnóstico de fallas son alimentados por la velocidad angular proveniente del tren de transmisión de alta velocidad y el par de referencia requerido por el sistema de control del WECS. Los esquemas mostrados en las Figs. 3 y 4 son utilizados para realizar la generación de residuos de los escenarios de falla indicados en la Tabla 2.

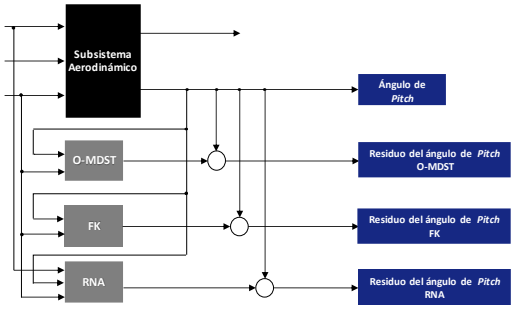


Fig. 3. Esquema de residuos para el subsistema *Pitch*

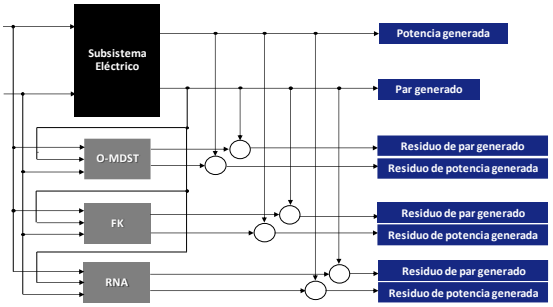


Fig. 4. Esquema de residuos para el subsistema eléctrico

4. RESULTADOS

Se realizó la simulación en el modelo *Benchmark* de los ocho escenarios de falla tomando en cuenta los parámetros establecidos en la sección 4.1, las condiciones de falla definidas en la Tabla 2 y las estrategias de detección y diagnóstico de fallas propuestas.

Tabla 2 Dimensionamiento de los escenarios de falla

No.	Modo de falla	Tiempo de aparición de la falla	Elemento con falla	Elemento saludable
1	β_{1m1}=5°	2000-1000 s	β_{1m1}	β_{1m2}
2	$1.2\beta_{2m1}$	2300-2400 s	β_{2m1}	β_{2m2}
3	$0.9\beta_{3m1}$	2900-3300 s	β_{3m1}	β_{3m2}
4	τ_g-2000	3300-3600 s	τ_g	-
5	$0.8P_{gm}$	1000-4400 s	P_{gm}	τ_{gm}
6	τ_{gm}+200	3800-3900 s	τ_{gm}	P_{gm}
7	$1.4\omega_g$	1500-1600	ω_g	-
8	τ_{gr}-2000	1800-2300 s	τ_{gr}	-

 ISSN en trámite

Posteriormente, se realizó la comparación entre las señales de salida con falla de los subsistemas *Pitch y* generador eléctrico, con las señales de salida estimadas por las técnicas de detección objeto de análisis para la generación de residuos. Las señales de residuo fueron comparadas contra el umbral máximo de operación permisible de las variables de salida β_{1m1}, β_{2m1}, τ_{gm} y P_{gm} correspondientes a los subsistemas *Pitch* y eléctrico establecidos en Odgaard, et al. (2009), Talebi, et al. (2014) y Satadru, et al. (2015).

En las Fig. 5 se presentan los residuos generados del comparativo entre las señales de salida de los subsistemas objeto de estudio y las estrategias de detección y diagnóstico de fallas, basadas en modelo: filtro de Kalman (FK) y observador por modos deslizantes *super-twisting* (O-MDST), y en procesamiento de señales: red neuronal artificial (RNA).

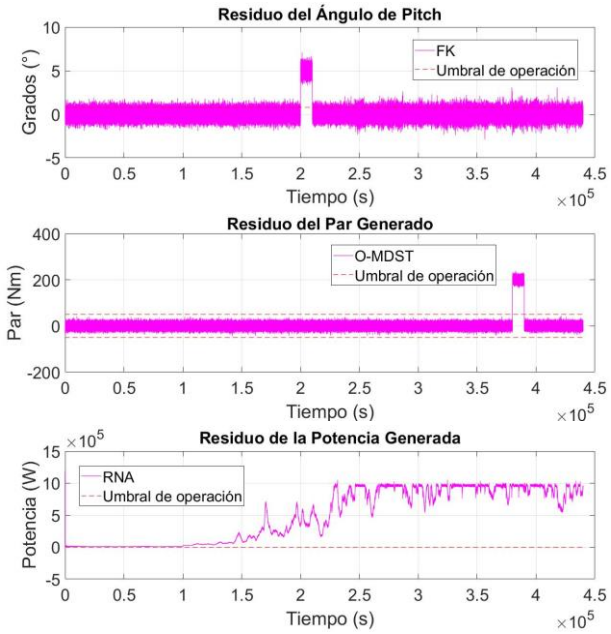


Fig. 5. Residuos de par generado, potencia generada y ángulo de *Pitch* resultantes de la implementación de las estrategias de detección y diagnóstico de fallas O-MDST, RNA y FK

Posteriormente, se realizó un análisis comparativo entre los resultados de los tres algoritmos de detección y diagnóstico de fallas considerados. Las estrategias de detección y diagnóstico fueron aplicadas a los ocho escenarios de falla indicados en la Tabla 2. Consecutivamente, con el objetivo de comparar el desempeño de los tres métodos de detección y diagnóstico de fallas se realizó una comparativa tomando en cuenta los criterios de: raíz cuadrada del error cuadrático medio, desviación estándar, tiempo de detección de la falla, falsas alarmas y omisión de alarmas. Los resultados de la evaluación se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 Evaluación de los escenarios de falla

	FK	O-MDST	RNA
RMSE-P	0.0263	0.04	0.5246
STD-P	0.4479	0.4489	0.6901
RMSE-M	30.2249	4.61e-10	127.9359
STD-M	31.6783	9.48	120.4888
Escenario 1			
TD	2000.01	2000.01	2000.01
OA	1	1	1
FA	31922	32195	74575
Escenario 2			
TD	2300.01	2300.01	2300.00
OA	8343	8348	8196
FA	23510	23761	65985
Escenario 3			
TD	2900.07	2900.07	2900.07
OA	35462	35380	31206
FA	11229	11354	36330
Escenario 4			
TD	3300.02	3300.02	3300.01
OA	18409	18329	14371
FA	17644	17875	48888
Escenario 5			
TD	1000.00	1000.01	1000.00
OA	0	1	1
FA	79659	1	99998
Escenario 6			
TD	3800.01	3800.01	3800.00
OA	3	1	136
FA	31620	0	326160
Escenario 7			
TD	1500.02	1500.01	1500.00
OA	0	0	0
FA	389304	402812	426859
Escenario 8			
TD	1800	1800	1800
OA	33	47	52
FA	351064	363612	387322

6. CONCLUSIONES

Se desarrolló un análisis comparativo, de tres estrategias de detección y diagnóstico de fallas, dos basadas en modelo y una de ellas basada en procesamiento de señales mediante la simulación de ocho escenarios de falla en un modelo *Benchmark* el cual representa la dinámica de un WECS de 4.8 MW. Los algoritmos utilizados fueron: Filtro de Kalman, Observados por modos deslizantes *super-twisting* y red neuronal artificial tipo *perceptron multicapa.* Las tres estrategias fueron comparadas tomando en cuenta los criterios de raíz cuadrada del error medio cuadrático medio (RMSE), desviación estándar (STD), tiempo de detección de falla (TD), omisión de alarmas (OA) y falsa alarma (FA), siendo el FK el esquema de detección y diagnóstico con mejor desempeño para

el subsistema *Pitch,* mientras que el O-MDST presentó mejor desempeño durante la detección y diagnóstico de fallas en el subsistema eléctrico.

REFERENCIAS

REN21. (2019) Renwables 2019 Global Status Report. Paris, France. *Renewable Energy Policy Netwotk for the 21st Century*. Volumen (14), 336.

Ribrant, J.; and Bertling, I. (2007). Survey of Failures in Wind Power Systems with Focus on Swedish Wind Power Plants During 1997-2005. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1-8.

NREL. (2013). Report on Wind Turbine Subsystem Reliability A Survey of Various Databases. *National Renewable Energy Laboratory*. NREL/PR-5000-59111, 43.

Su, C; Yang, Y.;Wang, X.; and Hu, Z.(2016). Failures Analysis of Wind Turbines: Case Study of a Chinese Wind Farm. *Prognostics and System Health Management Conference* (PHM-Chengdu).1-6.

Alhmoud, L.; and Wang, B. (2017). A review of the state of the art in wind energy reliability analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 1-9.

Zhu, C. and Li, Y. (2018). *Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines*. 170-186, Chapter 9. IntechOpen. Rijeka, Croatia.

Odgaard, P.; Stroustrup, J.; and Kinnaert, M. (2009). Fault Tolerant Control of Wind Turbines - a benchmark model. *IFAC, Fault Detection, Supervision of Technical Processes*. 1-6.

Xiahou, K.; Lin, X.; and Wu, Q. (2017). Current Sensor Fault-Tolerant Control of DFIG Using Stator Currente Regulators an Kalman Filters. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*.1-5.

Davila, J.; Fridman, L.; and Levant, A. (2005). Second-Order Sliding-Mode Observer for Mechanical Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1-6.

Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Haykin, S. (2009).178-278, Chapter 4. Pearson Prentice Hall. Ontario, Canada.

Talebi, N.; Ali, M.; and Darabi, A. (2014). Robust Fault Detection of Wind Energy Conversion Systems Based on Dynamic Neural Networks. *Hindawi Publishing Corporation Computational Intelligence and Neuroscience*. 1-13.

Satadru, D.; Pisu, P.;and Ayalew, B. (2015). A Comparative Study of Three Fault Diagnosis Schemes for Wind Turbines. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*.1-16.

Control de una Máquina Saponificadora en la Sección del Tanque de Agitado Aplicando Inteligencia Artificial

Martínez-Mederos, C.*. Ríos-Rojas, C. Enciso-Sáenz, S.**

**Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carretera Panam. Km1080, Cp. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. (Tel:244-133-4300, e-mail: camila.martinezmederos@gmail.com)*

Resumen: En el presente artículo se realiza el control de temperatura en la sección del tanque de agitado en una máquina saponificadora, usando un sistema Neurodifuso. La máquina funciona como un reactor tipo batch, con agitador y acondicionamiento de la temperatura de la reacción. Se analizan las variables involucradas en el proceso de saponificación, reacción química que produce jabón, teniendo en cuenta la maetria prima como aceites de desecho que ya han sufrido un estrés térmico previo a la reacción.

Keywords: Saponificación, sistemas neurodifusos, aceite de desecho, reactor batch

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas híbridos (neurodifusos), son sistemas que en la actualidad presentan gran aplicabilidad en la solución de problemas altamente no lineales. Sánchez, (2007). En la industria existen procesos químicos altamente no lineales y con dinámicas variantes en el tiempo debido a la complejidad de las reacciones químicas internas. Pineda, (2000). Estas características hacen que sea muy difícil y costoso obtener un modelo analítico del proceso que sea razonablemente exacto en un intervalo de operación suficientemente grande. En el caso de contar con un modelo matemático, este puede presentar errores de modelado debido a la presencia de dinámicas no modeladas, cambios en las condiciones de operación o fallas en el sistema que induzcan variaciones en los parámetros de la planta. Pineda, (2000).

La gran mayoría de los procesos químicos, ocurren en reactores químicos, en todas sus variantes, dependiendo de las características que requiere cada reacción. La reacción que ocupa la investigación, tiene lugar en una máquina saponificadora, producto de una tesis de Maestría en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. La saponificadora funciona como un reactor por lotes, brinda agitación y temperatura a la reacción, permitiendo las condiciones oportunas para el proceso.

Las materias primas utilizadas en el proceso son un material graso y una base fuerte, en el caso de nuestra investigación, los reactivos fueron aceite de desecho como material graso, e hidróxido de sodio como base fuerte.

Los aceites vegetales de desecho, son aquellos que han sido utilizados en los procesos de cocción de restaurantes, comedores colectivos, industrias alimenticias, etc. Se estima que más de 10 millones de toneladas de aceite vegetal de desecho se generan en el mundo cada año. Bombón, (2014).

El aceite debido a su densidad menor que la del agua y al tratarse de sustancias no polares de naturaleza hidrófoba, flotan en la superficie del agua, formando una capa de aceite, lo que provoca problemas de contaminación como reducción de penetración de la luz hacia la fase acuosa, obstaculiza la transferencia de oxigeno disuelto en el fondo del agua, dificulta la vida de los peces y demás seres acuáticos provocando una alteración en el ecosistema. Bombón, (2014).

La creación de jabón a partir de aceites residuales es una opción de cercano alcance para darle un valor agregado a lo que es considerado desperdicio, generando un beneficio económico adicional y disminuyendo la contaminación del medio ambiente. Deng, (2009).

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección II se describen los componentes de la maquina saponificadora donde se desarrolla la investigación. En la sección III se describe el proceso de saponificación y las variables que involucra. En la sección IV se muestra los resultados del modelo obtenido. Finalmente, en la sección V, se presentan las conclusiones.

2. MÁQUINA SAPONIFICADORA: SECCIÓN DEL TANQUE DE AGITADO.

2.1 Descripción de la saponificadora

La máquina saponificadora es un prototipo basado en el funcionamiento de las máquinas de control numérico (CNC). Mediante el uso de tres motores a pasos se generan movimientos sobre los ejes X, Y, Z que están acopladas a dos

bandas por un tornillo trapezoidal de rosca doble. Cada eje tiene un sensor inductivo que restringe el movimiento más allá de sus límites, evitando colisiones entre las partes móviles. Alfonso, (2019). Para el mezclado de los reactivos y aportarle energía necesaria a la reacción, se instaló una batidora de inmersión sobre el tanque de agitado. Alfonso, (2019). Además, se instaló una cama térmica bajo el recipiente de la reacción para acondicionar la temperatura. La Figura 1 muestra la descripción grafica de la máquina saponificadora.

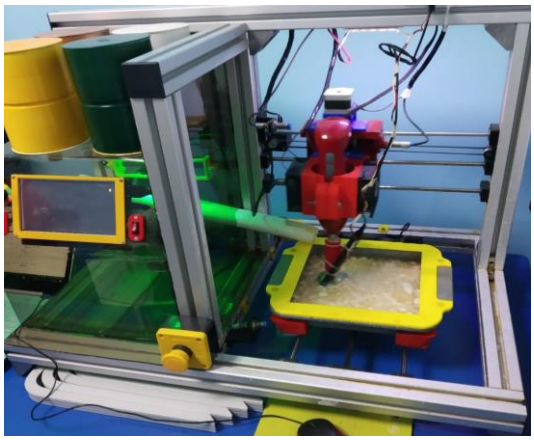


Fig. 1. Máquina saponificadora.

2.2 Sección de tanque de agitado: reactor por lotes.

Un reactor tipo batch es un reactor donde no existe flujo de entrada ni de salida. Es un tanque con agitador que homogeneiza la mezcla, donde se ha permitido que ocurra una reacción. Sánchez, (2007). Una vez que se ha tratado un lote, se vacía el reactor, y se puede entonces, tratar un segundo lote.

Cuando la reacción se está llevando a cabo, ningún compuesto ingresa o sale del reactor hasta que la reacción culmine. El calentamiento o enfriamiento se realiza con el uso de una chaqueta alrededor del tanque.

En un reactor batch, el cambio de la concentración a lo largo del tiempo es solo el resultado de la reacción química y no de cambios de flujo entrada salida de los reactivos o los productos.

Para que una reacción ocurra es necesario que las moléculas de los reaccionantes choquen, con una energía capaz de sobrepasar la energía de activación y con una dirección determinada. Ahmed, (2015). Entonces es necesario aportarle al sistema suficiente energía para los reaccionantes se conviertan en producto. La reacción de saponificación necesita un ambiente que propicie este tipo de condiciones para que tenga lugar la formación de producto en este caso el jabón.

La sección del tanque de agitado de la máquina saponificadora cumple con las características del reactor tipo batch. La función de la chaqueta la cumple una cama térmica colocada debajo de la charola donde ocurre la reacción. El sistema cuenta con mediciones en línea de pH y temperatura de la mezcla, para el seguimiento de las variables en tiempo real.

3. REACCIÓN DE SAPONIFICACIÓN. VARIABLES DEL PROCESO

La saponificación es la reacción química donde la unión de un material graso y una base fuerte producen jabón y glicerina. Proaño, (2015). Los aceites están formados principalmente por triglicéridos, el cual es un compuesto químico que contiene una molécula de glicerol y tres ácidos grasos. Guerrero, (2014). En términos químicos el jabón es la sal de un ácido graso obtenida por la hidrólisis alcalina de los ésteres contenidos en los materiales grasos. Bombón, (2014). Lo que ocurre a grandes rasgos, es el rompimiento de los enlaces, dando lugar a la sal de sodio y la glicerina. La Figura 2 muestra la reacción antes descrita.

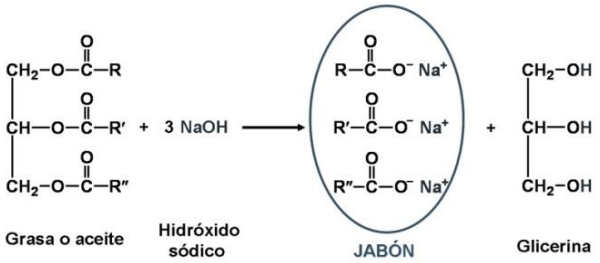


Fig. 2. Reacción de saponificación.

Como ocurre con todas las sales, la sal sódica formada se disolverá en agua. La molécula de jabón se conforma por una parte polar o parte hidrófila con afinidad con el agua, y otra apolar o hidrófoba que tiene afinidad con grasas y aceites. Cuando entra en contacto con el agua, la molécula se polariza y orienta su parte hidrófila hacia el agua y la hidrófoba hacia la grasa, encapsulándola. De esta manera queda la grasa en el interior y puede ser eliminada con el agua

El índice de saponificación se define como los miligramos de hidróxido de potasio (KOH) necesarios para saponificar un gramo de lípido. Zayas, (2019). Este índice es propio de cada material graso y se calcula previamente en laboratorio.

La reacción de saponificación se clasifica como exotérmica, una reacción química de naturaleza exotérmica es aquella que transcurre generando calor y este desprendimiento de energía, puede incluso ocasionar efectos catastróficos si se descontrola totalmente. Sánchez, (2007)

Los aceites están sujetos a reacciones químicas que modifican sus características. La velocidad de estas reacciones aumenta con la temperatura. Las reacciones químicas que tienes lugar durante el proceso de fritura son la termooxidacion, hidrólisis y polimerización, las cuales pueden causar cambios irreversibles en la composición molecular del aceite. Vela, (2018). Por lo tanto, los aceites que ya hayan sido sometidos a frituras no deben sufrir grandes cambios de temperatura. Debido a ello, se establece una temperatura de referencia en la reacción de 50°C,

la cual es suficiente para la reacción de saponificación y limita los procesos de degradación del aceite.

En la industria, la variable pH se utiliza ampliamente para medir el estado que guarda una reacción. Una de las principales características de esta variable es su naturaleza logarítmica. Una sustancia base es aquella que tiene una muy alta concentración de iones OH-, respecto a la concentración de iones H+ y viceversa. La curva de pH es la propiedad que caracteriza a todo sistema acido-base, la forma de la curva se relaciona con las constantes de equilibrio, con la ionización del acido y de la base, así como con las concentraciones de los iones. Pineda, (2014). La base del sistema coordenado es logarítmica debido a que el pH está definido como el logaritmo negativo de la concentración de iones H+. En el caso de la saponificación variable pH se tiene en cuenta para determinar la culminación del proceso reactivo y la completa formación de productos

4. RESULTADOS

Para el diseño del controlador fue utilizada la aplicación Neuro-Fuzzy Designer, el cual permite diseñar, entrenar y probar sistemas adaptativos de inferencia neuro-difusa (ANFIS) de tipo Sugeno, utilizando datos de entrenamiento de entrada-salida. La figura 3 muestra la estructura del modelo Neurodifuso, se tomaron datos de pH y temperatura de la reacción para entrenar el sistema. El cual cuenta con dos entradas, pH y temperatura de la mezcla, y una salida, la temperatura de la cama térmica que se va a encargar de aportar calor a la reacción.

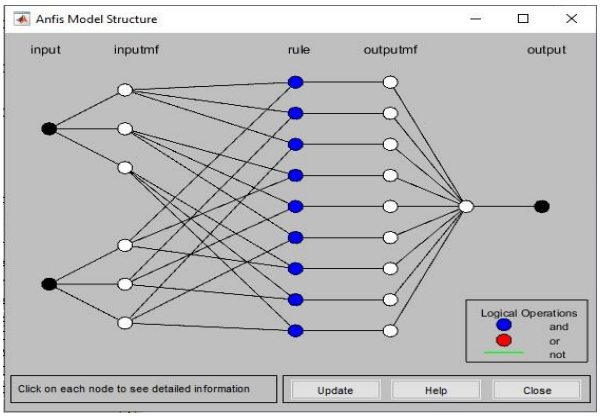


Fig. 3. Estructura del modelo neuro-difuso para la temperatura

Para el aprendizaje del controlador difuso se diseña una red neuronal, que se muestra en la figura 3, en la cual se plantean:

- 3 entradas porcada una de las 2 variables de entrada, las cuales serán proporcionales a los conjuntos difusos, así como a las funciones de membresía.
- 9 salidas definidas como funciones por un controlador del tipo Sugeno, las cuales serán los conjuntos difusos y sus respectivas funciones de membresía.
- Entrenamiento de la red con 10 épocas, ya que permite un grado de error mínimo y no se incurre en el sobre entrenamiento de la red.
- Tolerancia de error 0.
- Método para generar el controlador Grid partition, celdas de igual tamaño e igual distribución.
- 9 reglas difusas que logren satisfacer las relaciones existentes entre cada uno de los conjuntos difusos de ambas variables de entrada y así propiciar una salida.

Las funciones de membresía de cada una de las variables son de tipo gaussiana conformadas por los parámetros de amplitud de la campana y el punto medio de esta, mostrada en la figura 4.

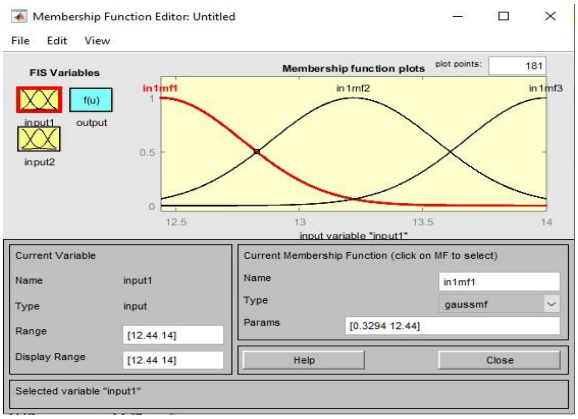


Fig. 4. Funciones de membresía del modelo neuro-difuso.

Dadas las variables de entrada error de pH y error de temperatura se estima la salida temperatura de la cama térmica mediante un conjunto de reglas difusas designadas con ayuda de la red neuronal, las cuales se enlistan en la tabla 1.

Tabla 1. Reglas difusas

Regla	Error de pH (EP)	Error de temperatura (ET)	Temperatura de la cama térmica (TC)
and	EP1	ET1	TC1
and	EP2	ET2	TC2
and	EP3	ET3	TC3
and	EP4	ET4	TC4
and	EP5	ET5	TC5
and	EP6	ET6	TC6
and	EP7	ET7	TC7
and	EP8	ET8	TC8
and	EP9	ET9	TC9

 ISSN en trámite

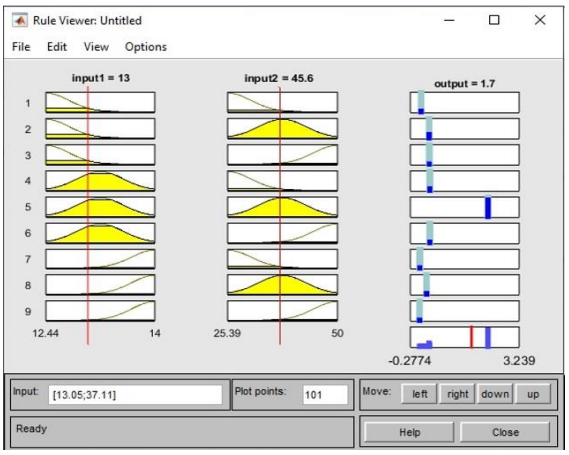


Fig. 5. Base de reglas del modelo neuro-difuso.

La variable de salida del controlador difuso de tipo Sugeno es de tipo lineal y se conforma por nueve conjuntos difusos, cada uno con su respectiva función de membresía, la tabla 2

Tabla 2. Parámetros de las funciones de salida

Temperatura de la cama térmica (TC)	Parámetros
TC1	[0.0007008 0.001668 5.485e-05]
TC2	[0.002391 0.007131 0.0001861]
TC3	[0.002383 0.008532 0.0001881]
TC4	[0.002747 0.00713 0.0002114]
TC5	[0.01957 0.05388 0.001499]
TC6	[0.002581 0.008488 0.0002004]
TC7	[0.0002093 0.0005564 1.596e-05]
TC8	[0.001909 0.005222 0.000145]
TC9	[0.0002005 0.0006301 1.521e-05]

La figura 6 muestra la superficie del sistema Neurodifuso teniendo en cuenta las dos entradas y la salida lineal.

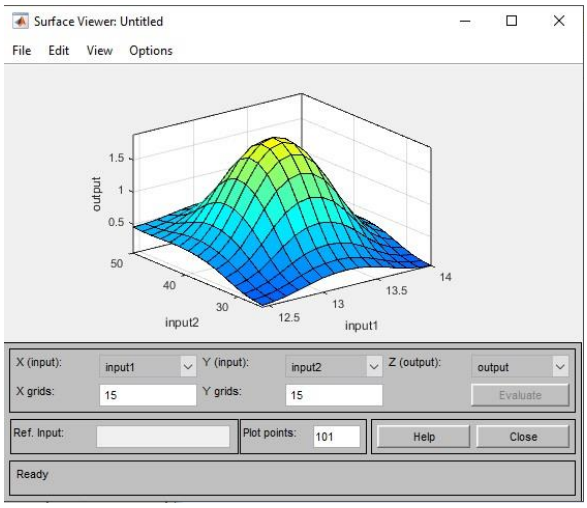


Fig. 6. Superficie del modelo.

Las figuras 7 y 8 muestran el comportamiento en tiempo real de la temperatura y el pH de la reacción, respectivamente. Las variables alcanzan el valor de la referencia usando el controlador neurodifuso.

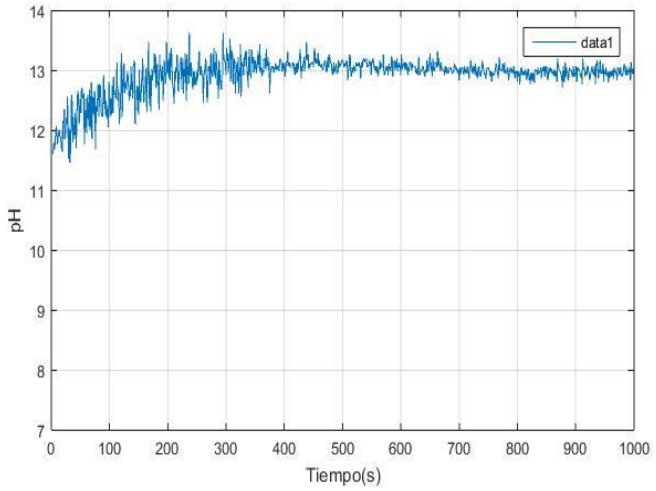


Fig. 7. Comportamiento del pH en el tiempo.

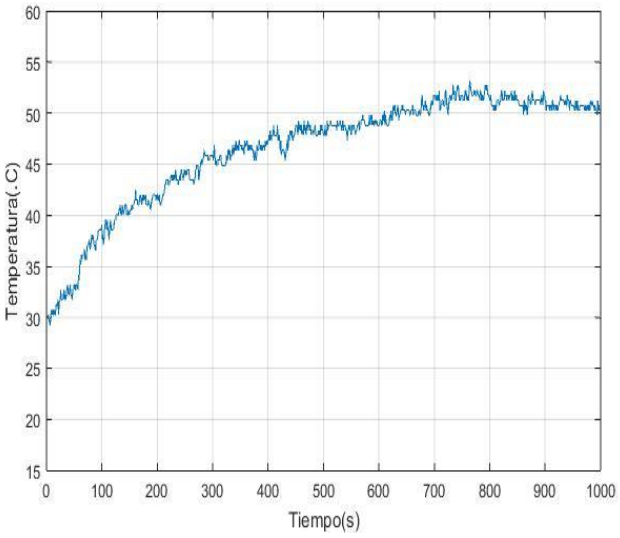


Fig. 8. Comportamiento de la temperatura en el tiempo.

Las variaciones en la gráfica se deben a ruido de medición causado por el sensor utilizado, sin embargo, alcanza el valor de referencia con un error de estado estacionario medio de 1°C. Al comienzo de la reacción, cuando entran en contacto los reaccionantes, el desprendimiento de energía de la reacción, debido a su carácter exotérmico, hace que el sistema alcance hasta 53°C, pero son compensadas por la acción de control.

ISSN en trámite

5. CONCLUSIONES

El Sistema Neurodifuso diseñado cumple con las características deseadas para el proceso de saponificación. Teniendo en cuenta que la materia prima de esta reacción es aceite de desecho de fritura, se hace extremadamente difícil determinar su composición exacta para realizar un control efectivo sobre la temperatura de la reacción. Si embargo la técnica neurodifusa resuelve esta dificultad, entrenando una red de aprendizaje a partir de datos obtenidos. Los procesos químicos son altamente no lineales, y modelar todos los cambios moleculares posible en una reacción es sumamente complicado, por otro lado, adoptar este tipo de modelo brinda una alternativa posible para tener un control más fino sobre los procesos de esta naturaleza.

REFERENCIAS

Sánchez, F. J., Ruiz, R. (2007). Control de temperatura en un reactor batch exotérmico usando un sistema Neurodifuso. Conciencia tecnológica no. 34

Pineda, F. J., (2000). Identificación y control de procesos químicos con múltiples redes neuronales.

Bombón, N., Albuja, M., (2014). Diseño de una planta de saponificación para el aprovechamiento del aceite vegetal de desecho. Revista Politecnica

Deng, Q., Wang, Q. (2009) Study in saponification technology of wasted edible oil.

Alfonso, C. R. (2019) Diseño y automatización de un prototipo para saponificación de aceites usados.

Ahmed, A. M., (2015). Saponification: A comparative kinetic study in a batch reactor.

Proaño, F., Stuart, R. (2015). Evaluacion de tres métodos de saponificacion en dos tipos de grasas como protección ante la degradación ruminal bovina

Guerrero G., C., (2014). Diseño de una planta de fabricacion de jabon a partir de aceites vegetales usados.

Zayas, J. R., A. (2018). Determinacion de indices de acidez, yodo y saponificacion de aceites nuevos y usados.

Vela, M. L. (2018). Alteración de los aceites vegetales durante la fritura.

Modelado y Análisis de un Motor de Inducción Trifásico para Aplicaciones de Almacenamiento de Energía

L. F. Olan Valdivieso* A. Claudio Sánchez* C. Aguilar Castillo* M. C. Toledo Pérez*

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Int. Internado Palmira, Cuernavaca Mor.*
e-mail: leonardo.olan18ea@cenidet.edu.mx, peabraha@cenidet.edu.mx, aguilar@cenidet.edu.mx, carmen.toledo19ea@cenidet.edu.mx.

Resumen: En este trabajo se presenta el análisis de un motor de inducción trifásico acoplado con un volante de inercia (carga inercial), así como la integración del sistema eléctrico y mecánico de la máquina, visto desde el punto de vista energético. El objetivo final es establecer los criterios y rango de operación de los motores de inducción de acuerdo con sus parámetros y proponer casos en donde es conveniente la utilización de sistemas de almacenamiento de energía en base a volantes de inercia (Flywheel Energy Storage System).

Palabras claves: Máquinas eléctricas, motor de inducción, volantes de inercia, almacenamiento de energía, modelado matemático.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de las tecnologías más populares de almacenamiento de energía como lo son las baterías, volantes de inercia, ultracapacitores y sistemas de almacenamiento de superconductores magnéticos, los volantes de inercia se utilizan típicamente para almacenar grandes cantidades de energía durante periodos de tiempo relativamente cortos (Fig 1). Un volante de inercia es una buena elección para todas aquellas aplicaciones donde se requiere la entrega de un flujo energético grande en un breve periodo de tiempo y teniendo un excelente perfil de entrega de energía (Ribeiro et al., 2001, Samineni et al., 2006, Kulkarni and Santoso, 2009).

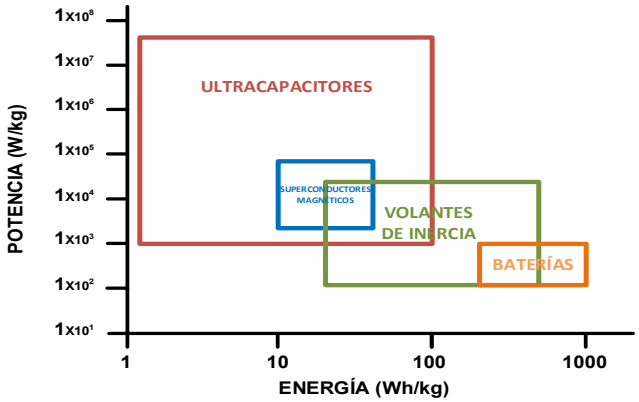


Fig. 1. Especificaciones de energía contra especificaciones energéticas de las tecnologías de almacenamiento de energía.

La energía E almacenada en el volante de inercia está dada por (1).

$$E = \int \tau_m d\theta \tag{1}$$

Donde, τ_m y θ son el torque mecánico y posición angular del volante de inercia respectivamente. Si se considera que el torque mecánico τ_m esta expresada por (2).

$$\tau_m = J\frac{d\omega}{dt} \tag{2}$$

Donde J y ω son el momento de inercia y la velocidad angular. Entonces podemos rescribir la ecuación (1) en términos de velocidad angular ω.

$$E = \int J\frac{d\omega}{dt}d\theta = \int J\frac{d\theta}{dt}d\omega = \int J\omega d\omega = \ldots$$
$$\ldots = \frac{1}{2}J\omega^2 - \frac{1}{2}J\omega_o^{\,2} \tag{3}$$

Y por último ω_1 y ω_2 son las velocidades angulares inicial y final. La cantidad de energía almacenada o liberada por el volante es directamente proporcional al momento de inercia y al cuadrado de la velocidad angular. En donde si $\omega_1 > \omega_2$ corresponde al almacenamiento energético y si $\omega_2 > \omega_1$ corresponde a la liberación energética.

Generalmente, los sistemas de almacenamiento de energía a base de volantes de inercia o (FESS por sus siglas en inglés) son complementados con el uso de motores eléctricos. La selección del motor eléctrico para un FESS es un paso crucial en el diseño de este. Se consideran criterios como la eficiencia, el costo, la

fiabilidad, la densidad de potencia, la tecnología y la capacidad del control (Hashemnia and Asaei, 2008, Maggetto and Van Mierlo, 2000, Gao et al., 2003).

Se han realizado estudios donde se comparan a los motores de CD y CA. El motor de inducción es el mejor candidato para aplicaciones con cargas inerciales debido a la robustez, su tecnología madurez, costos menores y su casi nula necesidad de mantenimiento a pesar de presentar un control más complicado (De Santiago et al., 2011, Akagi and Sato, 2002).

Este documento analiza el impacto de las cargas inerciales sobre un motor eléctrico de tipo jaula de ardilla mediante el desarrollo de un modelo matemático, en el cual sistema eléctrico y mecánico del conjunto motor-carga se encuentran acoplados.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Análisis de sistema eléctrico de motor de inducción

Las consideraciones que se toman en cuenta para desarrollar el modelo matemático del motor de inducción trifásico.

- Entrehierro distribuido uniformemente.
- Construcción tipo jaula de ardilla (rotor cortocircuitado)
- Bobinas del estator y rotor balanceadas
- La saturación magnética y los cambios de parámetros son despreciables.

El motor de inducción tipo jaula de ardilla puede modelarse matemáticamente representándolo como un sistema de ecuaciones diferenciales para los enlaces de flujo λ , velocidad angular ω_r y par electromagnético τ_e (Fitzgerald et al., 2003, Krause et al., 2012). Las ecuaciones de estado pueden expresarse en el sistema cartesiano de coordenadas (a,b,c).

Las ecuaciones de tensión de la maquina se pueden expresar mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_{abcs} = R_s I_{abcs} + \frac{d\lambda_{abcs}}{dt} \tag{4}$$

$$V_{abcr} = R_r I_{abcr} + \frac{d\lambda_{abcr}}{dt} \tag{5}$$

Siendo V_{abcs} y V_{abcr} vectores tridimensionales con los valores de tensión de fase ***a***, ***b*** y ***c*** por ese orden, cada uno de ellos del estator y del rotor respectivamente.
Analógicamente las intensidades I_{abc} y los enlaces de flujos magnéticos λ_{abc} son también vectores con la misma distribución. En la notación el subíndice s indica variables del estator y el subíndice r indica variable del rotor.
También hay que considerar que los voltajes del rotor son nulos, debido a que se encuentran cortocircuitados por la construcción física de la máquina.

Las matrices R_s y R_r son ambas diagonales con los elementos de la diagonal principal iguales (6). Así mismo, si el sistema magnético es considerado lineal los enlaces de fujo magnético pueden expresarse como (7):

$$R_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad R_r = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{L_s} & \mathrm{L_{sr}} \\ (\mathrm{L_{sr}})^T & \mathrm{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abcs} \\ I_{abcr} \end{bmatrix} \tag{7}$$

Donde las inductancias son las siguientes:

$$\mathrm{Ls} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\mathrm{Lr} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\mathrm{Lsr} = Lsr \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \tag{10}$$

En estas ecuaciones L_{ls} es la inductancia de dispersión del estator, L_{ms} la de magnetización también del estator, mientras que L_{lr} y L_{mr} son las inductancias de dispersión y de magnetización del rotor respectivamente. L_{sr} es la amplitud de la inductancia mutua entre el rotor y el estator.
Al expresar las ecuaciones de tensión conviene referir todas las variables del rotor al estator, mediante la relación de vueltas de uno y de otro, de forma que:

$$I'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} I_{abcr} \tag{11}$$

$$V'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} V_{abcr} \tag{12}$$

$$\lambda'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} \lambda_{abcr} \tag{13}$$

Las inductancias mutuas y de magnetización se asocian con el mismo recorrido de flujo, así pues L_{ms}, L_{mr} y L_{sr} están relacionadas. En concreto se tiene que:

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \tag{14}$$

Se puede definir también:

$$L'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} \mathrm{L}_{\mathrm{sr}} =$$

$$L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \tag{15}$$

Se puede demostrar:

$$L_{mr} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_{ms} \tag{16}$$

Entonces, al referir al primario la inductancia del rotor:

$$\mathrm{L}'_{\mathrm{r}} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 \mathrm{L}_{\mathrm{r}} \tag{17}$$

De la ecuación (9):

$$\mathrm{L}'_{\mathrm{r}} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \tag{18}$$

Siendo:

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_{lr} \tag{19}$$

A raíz de lo anterior los flujos magnéticos se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L'_{sr} \\ (L'_{sr})^T & L'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abcs} \\ I'_{abcr} \end{bmatrix} \tag{20}$$

De este modo se puede escribir las ecuaciones de tensión de la maquina en función de las variables referidas a los devanados del estator. Definiendo el operador p como la diferencial respecto al tiempo y R'_r como las resistencias del rotor referidas al estator, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales.

$$\begin{bmatrix} V_{abcs} \\ V'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p\mathrm{L}_{\mathrm{s}} & p\mathrm{L}'_{\mathrm{sr}} \\ p(\mathrm{L}'_{\mathrm{sr}})^T & R'_r + p\mathrm{L}'_{\mathrm{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abcs} \\ I'_{abcr} \end{bmatrix} \tag{21}$$

2.2 Análisis de sistema mecánico de motor de inducción

Cuando el acoplamiento magnético es considerado como lineal, la energía almacenada en dicho acoplamiento E_m viene expresada como:

$$E_m = \frac{1}{2}(I_{abcs})^T (\mathrm{L}_{\mathrm{s}} - L_{ls}\mathrm{I}) I_{abcs} + (I_{abcs})^T (\mathrm{L}'_{\mathrm{sr}}) I'_{abcr} + \ldots + \frac{1}{2}(I'_{abcr})^T (\mathrm{L}'_r - L_{lr}\mathrm{I}) I'_{abcr} \tag{22}$$

Por otro lado, la variación de la energía mecánica experimentada por un sistema rotativo E_m , más concretamente el rotor, viene expresada por:

$$dE_m = -\tau_e d\theta_{rm} \tag{23}$$

Donde τ_e es el par electromagnético y θ_{rm} el Angulo mecánico girando por el rotor. Hay que tener en cuenta que todas las variables eléctricas vienen expresadas en función del ángulo eléctrico θ_r . Estos dos ángulos están relacionados mediante el número de polos de la máquina P de la siguiente manera:

$$\theta_r = \left(\frac{P}{2}\right)\theta_{rm} \tag{24}$$

Así pues, la ecuación (20) queda:

$$dE_m = -\tau_e \left(\frac{2}{P}\right) d\theta_r \tag{25}$$

Por tanto, para una maquina con P polos el par electromagnético se puede evaluar como:

$$\tau_e(i_j, \theta_r) = \left(\frac{P}{2}\right) \frac{\partial W_c(i_j, \theta_r)}{\partial \theta_r} \tag{26}$$

Dado que L_{s} y L'_r no dependen de θ_r y sustituyendo E_m de la ecuación (22) el par electromagnético en $N \cdot m$ queda:

$$\tau_e = \left(\frac{P}{2}\right)(I_{abcs})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r}[\mathrm{L}'_{\mathrm{sr}}] I'_{abcr} \tag{27}$$

Por otro lado, esta ecuación mecánica que relaciona el par con la velocidad angular del rotor.

$$\tau_e = J_r \left(\frac{2}{P}\right)\frac{d\omega_r}{dt} + \beta\omega_r + \tau_L \tag{28}$$

Donde J_r es la inercia del rotor, β el coeficiente de fricción viscosa y τ_L es el par de carga. Para nuestro caso de estudio la carga es tipo inercial representado como:

$$\tau_L = J_L \left(\frac{P}{2}\right)\frac{d\omega_r}{dt} \tag{29}$$

Donde J_L es la inercia de la carga y reescribiendo la ecuación (28) como:

$$\tau_e = (J_r + J_L)\left(\frac{2}{P}\right)\frac{d\omega_r}{dt} + \beta\omega_r \tag{30}$$

3. SIMULACIÓN Y RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO DE MOTOR DE INDUCCIÓN

Se utiliza la herramienta “función S” del software MATLAB-Simulink para simular las ecuaciones que modelan el comportamiento dinámico del motor de inducción tipo jaula de ardilla. Se consideran ocho estados a resolver, las seis corrientes

 ISSN en trámite

determinadas con la ecuación (21), la velocidad angular del rotor determinada a partir de (28) y el desplazamiento angular del rotor determinado con la ecuación (27).

Los parámetros utilizados para la simulación del sistema se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del motor de inducción

Potencia	3 HP
Voltaje de línea	220V
Velocidad nominal	1710 RPM
Par nominal (τ_{nom})	11.9 N*m
Corriente nominal (I_{nom})	5.8A
Número de polos (P)	4
Coeficiente de fricción (β)	0.001
Inercia del rotor (J_r)	0.089 kg*m^2
Resistencia del estator (R_e)	0.435 Ω
Resistencia del rotor (R_r)	0.0816 Ω
Reactancia de magnetización (X_m)	26.13 Ω
Reactancia del estator (X_e)	0.754 Ω
Reactancia del rotor (X_r)	0.754 Ω

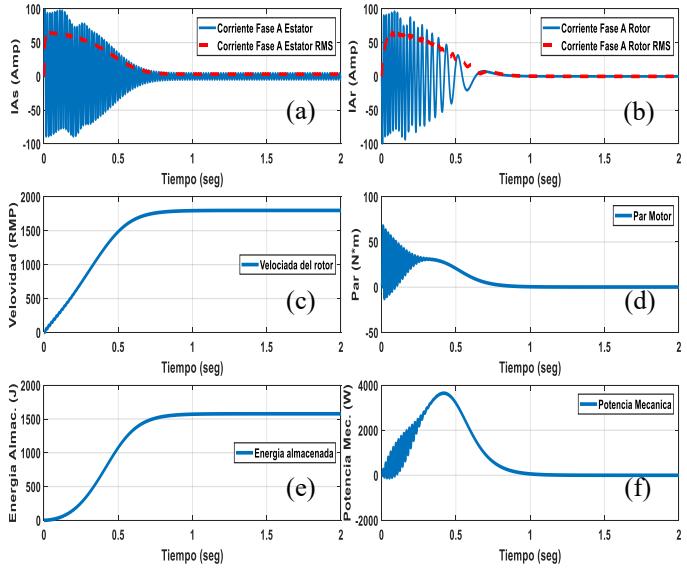


Fig 2. Repuesta dinámica del motor para el caso 1, (a) corrientes del Estator, (b) corriente del Rotor, (c) velocidad, (d) par electromagnético, (e) energía almacenada por el rotor y (f) potencia mecánica.

3.1 Caso de estudio 1

Para el análisis de este caso se presenta una prueba de arranque pleno sin carga acoplada lográndose visualizar (Fig. 2a y Fig. 2b) el tiempo de establecimiento de alrededor de 1s para el estado transitorio de arranque y así como también se puede apreciar la energía almacenada por el rotor del motor se encuentra alrededor a los 1.5k J (Fig. 2d) correspondiendo a la velocidad el alcanzada (Fig. 2c).

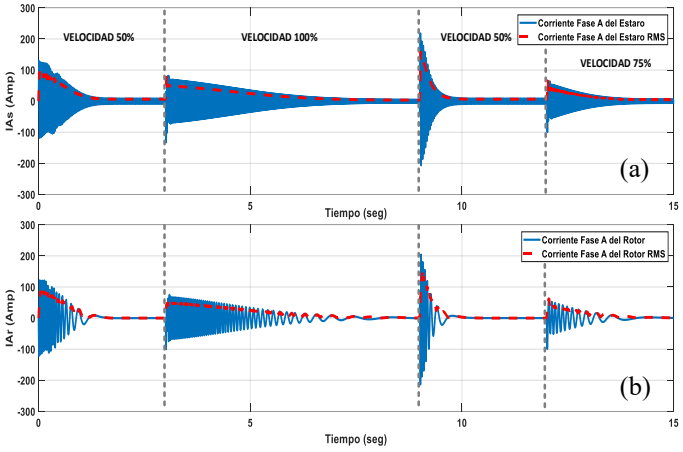


Fig 3. Curvas de Corrientes desarrolladas en el Estator (a), Rotor (b) para el Caso 2.

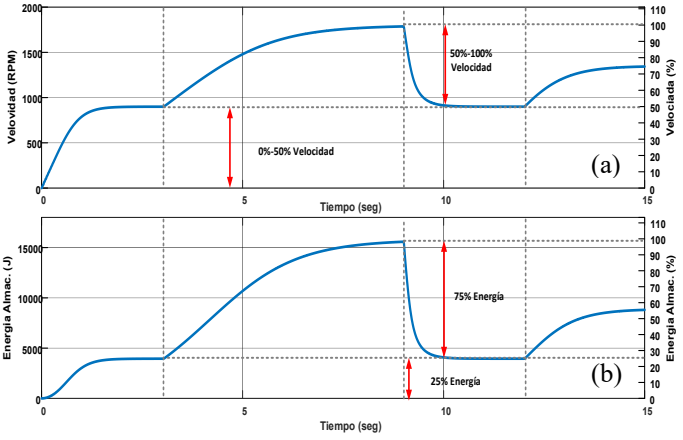


Fig 4. Curva de velocidad (a) y energía almacenada en el volante de inercia (b) para el Caso 2.

3.2 Caso estudio 2

Para este caso de estudio se analiza un sistema de almacenamiento de energía, el cual sea capaz de almacenar y liberar al menos la cantidad de 10kJ por lo cual se proponer trabajar con un momento de inercia $J_L = 10 \cdot J_r$ lo cual ya es considera como una carga inercial relativamente alta para el motor, y se realiza el análisis partiendo de la ecuación (3), para así obtener los rangos de energía total almacenada acordes al caso de estudio, como se aprecia en la ecuación (31) si se considera como velocidad final 1800 RPM.

$$E_{\max} = \frac{1}{2}\left(0.89Kg \cdot m^2\right)\left(\frac{2\pi(1800m^{-1})}{60\,{}^{s}\!/_{m}}\right)^2 = 15.811\text{kJ} \qquad (31)$$

 ISSN en trámite

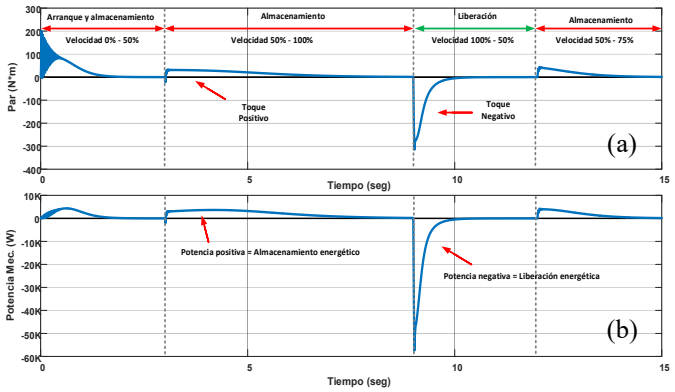


Fig 5. Curva de par (a) y potencia mecánica (b) para el Caso 2.

Si se considera que este tipo de sistemas no deberá quedase sin energía almacenada, debido las condiciones mínimas de operación de la máquina se realizan las siguientes consideraciones en la ecuación (30).

$$E_{\min} = \frac{1}{2}\left(0.89Kg \cdot m^2\right)\left(\frac{2\pi(\frac{1800}{2} m^{-1})}{60\,{}^{s}\!/_{m}}\right)^2 = 3.952\text{kJ} \quad (32)$$

$$E_{\Delta} = E_{\max} - E_{\min} = 11.859\text{kJ} > 10\text{kJ} \quad (33)$$

$$E_{\Delta\%} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}}\% = 75\% \quad (34)$$

Se puede considerar que la variación energética E_{Δ} del 75% de la energía almacenada es un gran margen de energía aprovechable (Fig. 4) teniendo en cuenta que sólo se ha realizado una variación del 50% de la velocidad de la máquina, con lo cual se puede apreciar (Fig. 3) di/dt considerablemente moderados, considerando la relación de energía almacenada.

También se puede ver (Fig. 5b) picos de potencia instantánea extremadamente altas acorde lo visto en la literatura, reforzando que los volantes de inercia son capaces de proporcionar potencias altas en un tiempo relativamente corto, pero a su vez también se puede apreciar (Fig, 5a) que la existencia de variaciones de par muy altas puede repercutir en aumentar el estrés de la máquina.

4. CONCLUSIONES

Cabe destacar que el modelo matemático solo integra el sistema eléctrico y mecánico, de acuerdo con la literatura vista anteriormente para obtener resultados con un grado de realismo alto se debe considerar los cuatro modelos de la máquina eléctrica (Modelo Eléctrico, Modelo Mecánico, Modelo Magnético y Modelo Térmico) como un único sistema. También después de analizar el sistema bajo diferentes condiciones de cargas inerciales se puede establecer que a mayor inercia tiende a comportase como un sistema sobreamortiguado, ya que dicho parámetro es responsable a oponerse a los cambios de movimiento, afectando a las potencias consumidas por la máquina eléctrica, y es por eso que se propone el uso de técnicas de control vectoriales para el manejo de estos sistemas de energía inerciales, como lo son los volantes de inercia o vehículos eléctricos ya que estos son capaces de desacoplar las variables de par y flujo magnético, para poder tratar el motor de inducción como un motor de CD de excitación independiente y así ser capaz de extraer cantidades específicas de energía en tiempos específicos de acuerdo a los requerimiento que la carga demande y establecer las condiciones de trabajo de la máquina, en las cuales se garantiza su operación optima, evitando cambios abruptos en la magnitud de par y corrientes grandes en intervalos cortos se tiempo.

REFERENCIAS

AKAGI, H. & SATO, H. 2002. Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system. *IEEE Transactions on Power Electronics,* 17**,** 109-116.

DE SANTIAGO, J., BERNHOFF, H., EKERGÅRD, B., ERIKSSON, S., FERHATOVIC, S., WATERS, R. & LEIJON, M. 2011. Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review. *IEEE Transactions on vehicular technology,* 61**,** 475-484.

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY, C., UMANS, S. D. & JAMES, B. 2003. *Electric machinery*, McGraw-Hill New York.

GAO, Y., GAY, S. E., EHSANI, M., THELEN, R. F. & HEBNER, R. E. Flywheel electric motor/generator characterization for hybrid vehicles. 2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Fall (IEEE Cat. No. 03CH37484), 2003. IEEE, 3321-3325.

HASHEMNIA, N. & ASAEI, B. Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. 2008 18th International Conference on Electrical Machines, 2008. IEEE, 1-5.

KRAUSE, P., WASYNCZUK, O. & PEKAREK, S. D. 2012. *Electromechanical motion devices*, John Wiley & Sons.

KULKARNI, S. & SANTOSO, S. Impact of pulse loads on electric ship power system: With and without flywheel energy storage systems. 2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2009. IEEE, 568-573.

MAGGETTO, G. & VAN MIERLO, J. 2000. Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey.

RIBEIRO, P. F., JOHNSON, B. K., CROW, M. L., ARSOY, A. & LIU, Y. 2001. Energy storage systems for advanced power applications. *Proceedings of the IEEE,* 89**,** 1744-1756.

SAMINENI, S., JOHNSON, B. K., HESS, H. L. & LAW, J. D. 2006. Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for voltage sag correction. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 42**,** 42-52.

Diseño de un algoritmo basado en el EKF para la estimación de demandas desconocidas en ductos de agua ⋆

Arlette Cano * **Francisco-Ronay López-Estrada** *
Lizeth Torres ** **Ildeberto Santos-Ruiz** *

* *Tecnológico Nacional de México / IT Tuxtla Gutiérrez, TURIX-Dynamics Diagnosis and Control Group, Chiapas, México (e-mail: arlette.cano.acv@gmail.com)*
** *Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 Ciudad de México, Mexico.*

Resumen: En este artículo se propone una metodología basada en modelo para la estimación de múltiples demandas de caudal nodales, usando sólo los datos de presión y flujo de entrada al sistema de tuberías. El algoritmo se basa en múltiples filtros de Kalman extendidos (EKF) los cuales funcionan como observadores de entradas desconocidas. Cada EKF se enfoca en un tramo de la tubería y se relacionan de forma progresiva; el modelo del sistema es una adaptación del ya conocido modelo de columna de agua rígida. Para demostrar la efectividad del método propuesto, se presentan resultados de simulación de una línea de tubería estandarizada.

Keywords: Estimación de demandas, Observador de entradas desconocidas, Filtro de Kalman, Detección de fugas.

1. INTRODUCCIÓN

Una red de distribución de agua (RDA) es un conjunto de tuberías que trabajan a determinadas presiones para abastecer agua potable a los usuarios (Sankar et al., 2015). El conocimiento preciso de las demandas nodales que varían en distintos horarios, es un requisito previo para la predicción de la presión y la calidad del sistema de distribución. En consecuencia, conocer las demandas coadyuva a mejorar la operación del sistema de distribución por parte de los operadores de la RDA(Letting et al., 2017).

Las presiones y los caudales en las redes de distribución varían acorde a las demandas nodales, las cuales por lo general no son medibles, por ello su estimación es un problema de vital importancia en la gestión de la red. La estimación de las demandas se realiza a partir de los estados medidos y se ve como un problema inverso cuya solución depende de cuántas variables de estado son medibles. Ideal y tecnológicamente es posible colocar sensores para disponer de mediciones en toda la red hidráulica, sin embargo, los costos y la complejidad de estos sistemas hacen prohibitivo instrumentar un red hidráulica completa. En la literatura se ha abordado el problema de colocación de sensores al considerar las restricciones presupuestarias y la calidad de los datos medidos (Sarrate et al., 2014) y el tiempo necesario para detectar eventos anormales Antunes and Dolores (2016); Schal et al. (2016). Por otro lado, se ha demostrado que el número de sensores se puede reducir mediante la agrupación de los nodos de demanda (Jung et al., 2016) según características de calidad del agua (Qin and Boccelli, 2017). En Ribeiro et al. (2015), se utiliza una técnica de clasificación para seleccionar nodos con el fin de ubicar sensores de presión. Debido a las dificultades antes mencionadas, con respecto a la colocación de sensores y de la importancia de ello, la estimación simultánea de las demandas nodales junto con las presiones y los caudales no medidos, a partir de datos obtenidos de un número limitado de sensores, es un problema de investigación latente y abierto a la investigación.

Una forma de atacar este problema es mediante observadores de entradas desconocidas (OEDs) que permitan estimar el vector de estados de un sistema lineal o no lineal con base a la medición de algunas entradas y salidas disponibles (Torres et al., 2019b). Por ello, tanto las condiciones y métodos para el diseño de OEDs existentes en la literatura son alternativas eficaces para la solución del problema de estimación de las demandas junto con las presiones y caudales desconocidos (Zhao et al., 2017; Verde et al., 2016). Por ejemplo, en Letting et al. (2017), la demanda de agua en cada nodo se determina utilizando un algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) para identificar el multiplicador de demanda correspondiente. En Wang et al. (2018) desarrollaron tres modelos de estimación en diferentes formas (lineal, exponencial e híbrido) en términos del uso histórico del agua y la estructura económica local. Zhang et al. (2018) propuso el algoritmo Davidon-Fletcher-Powell (DFP) para la estimación de demandas mediante la optimización unidimensional y el cálculo de la matriz de escala, que era más fácil que el cálculo matricial jacobiano. En Pacchin et al. (2019) se presenta una comparación de diferentes

⋆ Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnológia (CONACYT) bajo la Convocatoria Atención a Problemas Nacionales PN2016/3595.

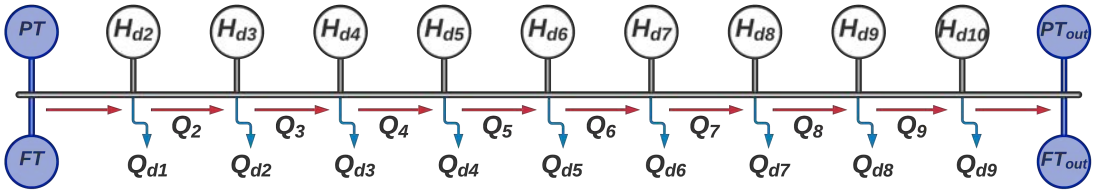


Figura 1. Tubería con nueve demandas de caudal.

modelos de pronóstico de demanda de agua a corto plazo, basados en patrones, probabilidad y técnicas de ventana móvil, resaltando este último por su robustez y facilidad de configuración. Otros autores han propuesto metodologías basados en el filtro de Kalman extendido (EKF). Delgado-Aguiñaga et al. (2016) propone un enfoque para detectar y aislar fugas, basado en un modelo no lineal adaptativo y EKFs relacionados. Majidi Khalilabad et al. (2018) al igual que Santos-Ruiz et al. (2018) utilizan el diseño de EKFs basado en el modelo hidráulico para estimar la cantidad de fugas y su posición.

El EKF se distingue por sobre otros observadores debido a su funcionalidad para predecir el estado próximo de un modelo, aún cuando la naturaleza precisa del sistema modelado es desconocida Torres et al. (2019a). La modelación dinámica de un sistema es una de las características claves que distingue el método de Kalman. El EKF es esencialmente un conjunto de ecuaciones matemáticas que implementan un estimador del tipo predictor-corrector que es óptimo en el sentido de que minimiza la covarianza del error estimado (Santos-Ruiz et al., 2018). La gran ventaja del filtro de Kalman es su relativa sencillez y su robustez, ya que es capaz de trabajar considerablemente bien en multitud de situaciones. Por esta razón se ha definido como técnica de estimación para las demandas de la RDA, ya que el sistema cumple con las condiciones necesarias para aplicar dicho algoritmo, además es ideal para estimar datos que varían a escalas muy pequeñas, sin verse tan afectado por el ruido de proceso y de medición, tal como pasa con otros observadores de menor robustez (Torres et al., 2019a).

El artículo está organizado de la siguiente manera: La sección 2 presenta el caso de estudio y las ecuaciones que describen su dinámica, en 2.1 explica paso a paso la obtención del modelo para el diseño del observador. La Sección 3 expone la metodología propuesta basada en el modelo, para la estimación de múltiples demandas, por medio del algoritmo EKF. Finalmente, en las secciones 4 y 5, respectivamente, se presentan los resultados del rendimiento del algoritmo y las conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN Y MODELADO DE LA TUBERÍA

Una RDA está hecha básicamente de tramos de tuberías, equipada con algunas estaciones de servicio agrupadas que proporcionan las mediciones. Las dinámicas corresponden principalmente a las del flujo de fluido en la tubería y deben ajustarse a la situación del sistema a monitorear.

Suponiendo que los cambios convectivos en la velocidad sean insignificantes y que la densidad del líquido sea constante, las ecuaciones de impulso y continuidad que rigen la dinámica de fluidos en cada sección de tubería se expresan en las siguientes ecuaciones diferenciales ordinarias (Bermúdez et al., 2017):

$$\dot{H}_{i+1} = \frac{b^2}{gA}\frac{Q_i - Q_{i+1}}{\Delta z_i}, \tag{1}$$

$$\dot{Q}_i = gA\frac{H_i - H_{i+1}}{\Delta z_i} - \frac{f(Q_i)}{2dA_r}Q_i|Q_i|, \quad \forall i \in 1,\ldots,n, \tag{2}$$

donde z (m) es la variable de posición dirigida axialmente en toda la tubería, b (m/s) es la velocidad de onda de presión, g (m/s^2) es la aceleración debida a la gravedad, $f(Q)$ es una variable adimensional que representa al factor de fricción como parámetro variable del caudal Q (m^3/s) y H (m.c.a) es la carga de presión.

La mayoría de los modelos matemáticos de una RDA se basan en las ecuaciones 1 y 2, con algunas variantes, dependiendo el enfoque a tomar, ya sea para simular fugas, demandas o bloqueos. Debido a que lo que se propone es un algoritmo para estimar múltiples demandas, se plantea una configuración de una tubería con diez tramos equidistantes, como se muestra en la figura 1, donde los transmisores de presión y flujo (PT y FT), brindan la información necesaria para la estimación de las salidas de caudal (Q_d) ubicadas en cada nodo de la tubería e indirectamente los caudales siguientes y los cabezales de presión ($H_i = H_{di}$, $\forall i = 1,\ldots,n$) . El modelo matemático para dicho sistema es el siguiente:

$$\dot{Q}_1 = gA\frac{H_1 - H_2}{\Delta z_1} - \frac{f(Q_1)}{2dA_r}Q_1|Q_1|, \tag{3}$$

$$\dot{H}_2 = \frac{b^2}{gA}\frac{Q_1 - Q_2 - Q_{d1}}{\Delta z_1}, \tag{4}$$

$$\dot{Q}_2 = gA\frac{H_2 - H_3}{\Delta_z 2} - \frac{f(Q_2)}{2dA_r}Q_2|Q_2|, \tag{5}$$

$$\dot{H}_3 = \frac{b^2}{gA}\frac{Q_2 - Q_3 - Q_{d2}}{\Delta z_2}, \tag{6}$$

$$\dot{Q}_{i=n} = gA\frac{H_n - H_{n+1}}{\Delta_z 3} - \frac{f(Q_3)}{2dA_r}Q_3|Q_3|, \tag{7}$$

donde $Q_d = \lambda\sqrt{|H_{i+1}|}$ que es el caudal de la demanda y $\lambda = 1/(C_d^2 A_d^2 2g)$ es un coeficiente que depende del área transversal del nodo de demanda y del coeficiente de apertura que tenga el material.

Las demandas se consideran como entradas variables al sistema y son de gran importancia para la correcta distribución del agua a lo largo de la red, sin embargo, debido a la problemática citada anteriormente con respecto al

número limitado de sensores, se asumen desconocidas. El reto de este trabajo consiste en estimar dichas demandas únicamente con la información proporcionada por los dos sensores que se tienen en la entrada y salida de la tubería. Para ello se considerará un estimador basado en el EKF.

2.1 Diseño del estimador de demandas basado en EKF

Para el diseño del estimador de demandas se utiliza una ecuación basada en las condiciones del modelo de columna de agua rígida (RWC) que describe la dinámica del flujo en un ducto, ya que se ignora la compresibilidad del fluido y la elasticidad de la tubería, por lo tanto se asume que toda la columna de fluido se mueve como un cuerpo rígido. Para derivar el modelo se toman en cuenta los siguientes supuestos.

- Se supone que el caudal es unidimensional
- El área de la sección transversal es constante a lo largo de la tubería
- Las paredes del ducto son rígidas y el fluido líquido es incompresible, esto significa que el comportamiento del flujo en la tubería está en estado casi estacionario, es decir, el caudal varía lentamente.
- Los cambios convectivos en la velocidad son insignificantes.
- La pérdida de energía para una velocidad de flujo dada casi constante, así que el estado es el mismo que para los flujos constantes a esa velocidad.

Se parte de la ecuación del modelo RWC que describe la dinámica del flujo en un tramo de tubería Δz.

$$\dot{Q} = gA_r \frac{\Delta H}{\Delta z} - \alpha |Q| Q^{\gamma}, \tag{8}$$

donde Q es la tasa de flujo en la sección de tubería (m^3/s), ΔH es es la pérdida de cabezal de presión a lo largo de la sección $(m.c.a)$, Δz, donde $z \in [0, L]$ es la longitud del tramo de tubería de nodo a nodo hasta llegar a L que es la longitud total equivalente (m), g es la aceleración gravitatoria (m/s^2) y A_r es el área de la sección transversal (m^2). α y $\gamma \leq 1$ son parámetros adimensionales relacionados con las pérdidas de fricción asociadas a los parámetros físicos de la tubería y el fluido, estos se pueden obtener de forma matemática mediante la ecuación de Hazen-Willian o de forma experimental.

Al asumir que la tasa de flujo es unidireccional, (8) se convierte en:

$$\dot{Q} = gA_r \frac{\Delta H}{\Delta z} - \alpha Q^{\gamma+1}; \tag{9}$$

dicha ecuación es la base del modelo para el observador que se plantea en este artículo.

Para la estimación de una demanda, se parte del análisis del sistema que se muestra en la Figura 2, con el objetivo de estimar las demandas de caudal $(Q_{di} \ \forall \ i = 1, ..., n)$ que se encuentran en los nodos que unen a los tramos. Se considera que H_{in} y Q_{in} son datos conocidos, además se propone el valor de $\gamma = 1$ por lo que la ecuación que describe la dinámica en la tubería queda como:

$$\dot{Q}_{in} = -\alpha Q_{in}^2 + \frac{gA_r}{\Delta z_1}(H_{in} - H_d), \tag{10}$$

donde H_d es la presión demandada en cualquier nodo, el cual se obtiene a partir de establecer que el comportamiento de una demanda de caudal es similar a la ecuación definida para el cálculo de una fuga (Torres et al., 2019a), de forma que Q_d se define como:

$$Q_d = C_d A_d \sqrt{2gH_d}, \tag{11}$$

por lo tanto:

$$H_d = \left(\frac{Q_d}{C_d A_d}\right)^2 \left(\frac{1}{2g}\right), \tag{12}$$

donde C_d es el coeficiente de descarga y A_d es el área de sección transversal, que son parámetros conocidos.

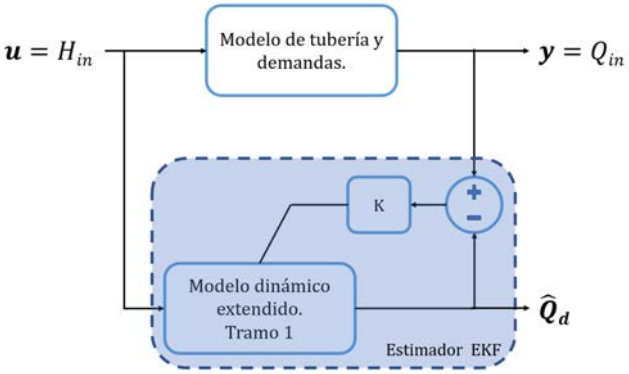


Figura 2. Diagrama EKF para estimación de una demanda.

Para simplificar la ecuación (12) y separar la variable principal de los parámetros conocidos se crea una nueva variable llamada λ, tal que se obtiene:

$$H_d = \lambda Q_d^2. \tag{13}$$

Después se sustituye la ecuación (13) en la ecuación (10), resultado:

$$\dot{Q}_{in} = -\alpha Q_{in}^2 + \frac{gA_r}{\Delta z_1} H_{in} - \frac{gA_r}{\Delta z_1} \lambda Q_d^2, \tag{14}$$

donde la entrada desconocida es la variable de interés Q_d. Para estimar dicha entrada, se le considera como un nuevo estado. Esto da paso a un modelo ideal para aplicar el algoritmo EKF que, mediante la ecuación de $\dot{Q}_{in}$ y el estado aumentado es posible el objetivo principal. Además considerado las variables de estado $[x_1, x_2] = [Q_{in}, Q_d]$, el modelo dinámico extendido queda expresado como:

$$\dot{x_1} = -\alpha x_1^2 + \frac{gA_r}{\Delta z_1} H_{in} - \frac{gA_r}{\Delta z_1} \lambda x_2^2, \tag{15}$$

$$\dot{x_2} = 0. \tag{16}$$

3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE ESTIMACIÓN DE DEMANDAS MÚLTIPLES

Debido a las problemáticas que se mencionan en las secciones 1 y 2, se propuso el diseño de un algoritmo

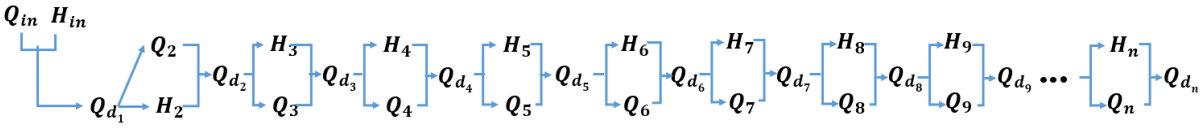


Figura 3. Diagrama de obtención de parámetros.

de estimación basado en EKF para la estimación de las entradas de demanda, además del filtrado del ruido de medición en las señales de presión y flujo. Cada EKF está enfocado a una sección de la tubería, delimitada por los nodos de conexión (Figura 2). Si la tubería se divide en N secciones, tan pequeñas como se desee, se deben diseñar N filtros, considerando una demanda en cada sección, esto es posible mediante las ecuaciones (15) y (16). Para evaluar el desempeño del algoritmo de estimación, se consideraron los siguientes parámetros de simulación en MATLAB (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros de la tubería

Parámetro	Valor
Longitud total, L	163.72 m
Área transversal, A_r	0.0045 m
Aceleración gravitacional, g	9.81 m/s^2
α	19.43
$\Delta z_i \quad \forall i = 1, \ldots, n$	16.372 m

El algoritmo para la estimación de demanda en una sección de la tubería se describe a continuación:

1. Inicialice el EKF con los valores iniciales de estado, $\hat{x}_0^-$ y la covarianza de error de estimación de estados, P_0^-:

$$\hat{x}_0^- = E(x_0), \tag{17}$$
$$P_0^- = E(x_0 - \hat{x}_0^-)(x_0 - \hat{x}_0^-)^T, \tag{18}$$

donde $\hat{x}_k^-$ es el estado estimado antes de incorporar las mediciones en el k-ésimo tiempo de muestreo. Por lo tanto, $\hat{x}_0^-$ es una estimación de estado arbitraria antes de realizar cualquier medición. En la práctica, $\hat{x}_0^-$ se tomó de las condiciones nominales de operación de la tubería:

$$\hat{x}_0^- = [Q_{nom}, Q_d]^T, \tag{19}$$

donde el primer estado comprende de un caudal nominal en la red y el segundo estado es un caudal de demanda propuesto.

2. Para k = 0, 1, 2, ... (todos los pasos de tiempo discreto durante la operación), realice los siguientes cálculos:
   a) Subrutina de Predicción: Calcule la ganancia de Kalman K_k y actualice el estado y la covarianza de error de estimación de estado utilizando los datos medidos, la matriz de observación $\mathbf{C}$ y las estimaciones anteriores $\hat{x}_k^-$ y P_k^-:

$$K_k = P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R)^- 1, \tag{20}$$
$$\hat{x}_k = x_k^- + K_k(y_k - C\hat{x}_k^-), \tag{21}$$
$$P_k = (I - K_k C) P_k^-, \tag{22}$$

   b) Subrutina de corrección: Calcule la matriz jacobiana A_k de la función de transición de estados Φ para actualizar la covarianza de error de estimación de estado y proyecte el estado hacia adelante en el tiempo:

$$A_k = \left[\frac{\partial \Phi}{\partial X}\right]_{x=\hat{x}_k}, \tag{23}$$
$$\hat{x}_{k+1} = \Phi(\hat{x}_k, u_k), \tag{24}$$
$$P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^T + Q, \tag{25}$$

En cada iteración de tiempo discreto, la estimación de la demanda está representada por la siguiente variable:

$$\hat{Q}_d := \hat{x}_k[2]. \tag{26}$$

Para utilizar el algoritmo propuesto es necesario pasar las ecuaciones (15) y (16) a una forma matricial:

$$A = \begin{bmatrix} -\alpha x_1 & -gAr\lambda x_2/z \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$
$$B = \begin{bmatrix} gAr/z \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{27}$$
$$C = [1 \ 0], \tag{28}$$

En (27) se presentan las matrices que describen al sistema en (15) y (16), y (28) representa la salida de medición disponible para el algoritmo.

Para el correcto desarrollo del EKF es fundamental pasar el sistema de (27) a un modelo de tiempo discreto explícito adecuado para aplicar EKF, esto se obtuvo aplicando el método mejorado de Euler (también conocido como método de Heun) al modelo de tiempo continuo que tiene la forma $\dot{x} = \phi(x, u)$:

$$x_{k+1} = x_k + \frac{T_s}{2}(\phi(x_k, u_k) + \phi(x_k + T_s\phi(x_k, u_k), u_k)) \tag{29}$$

Este enfoque permite calcular las presiones, caudales y demandas de forma progresiva como se muestra en la Figura 3. Esto se debe a que al obtener el valor estimado de Q_d es posible calcular la presión en ese nodo mediante la ecuación (13). El caudal siguiente (Q_{i+1}) se obtiene por medio de la ecuación de continuidad, es decir:

$$\sum Q_i = 0 \qquad \forall i \in [1, \ldots, n], \tag{30}$$

entonces

$$Q_d = Q_i - Q_{i+1} \quad \forall i \in [1, \ldots, n], \tag{31}$$

por tanto,

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{di}. \tag{32}$$

Dicho algoritmo es aplicado para cada tramo de la tubería en forma secuencial, así que al obtener la presión del nodo

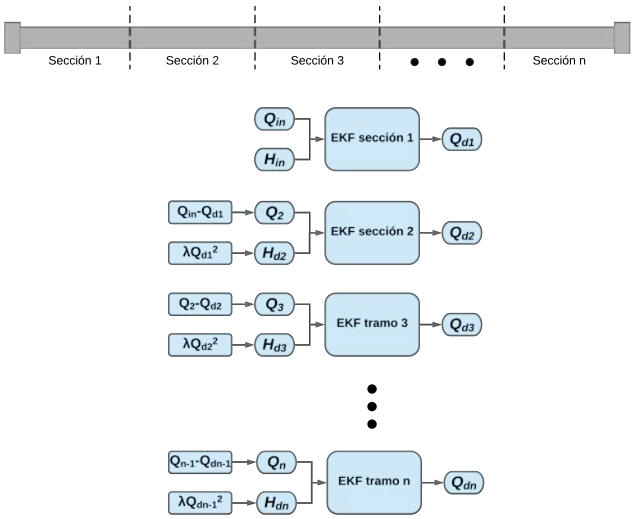


Figura 4. Diagrama EKF para estimación de múltiples demandas.

de demanda (H_d) se utiliza como entrada al sistema y, el caudal siguiente (Q_{i+1}) como salida de medición (y_k). Datos necesarios para calcular la demanda en el tramo siguiente, tal como se muestra en el diagrama de la Figura 4.

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de simulación para evaluar el rendimiento del algoritmo propuesto para la estimación de demandas de forma progresiva. Para las pruebas de simulación, se considera el sistema de la Figura 1, con los parámetros de la Tabla 1, presiones de entrada y salida $H_{in} = 21.1286\,\text{m}$ y $H_{out} = 5.6401\,\text{m}$, además de dos casos con coeficientes de $\lambda = 0.0001$ y $\lambda = 0.0002$.

Se realizó la simulación del algoritmo completo con un tiempo de 2000 s y un periodo de muestreo de $t_s = 0.001\,\text{s}$ en MATLAB, para garantizar la convergencia del sistema y obtener las estimaciones deseadas con el mínimo margen de error. Por medio del algoritmo de EKF aplicado a los observadores, fue posible la estimación de las demandas nodales, con un E.C.M. de $4.2160X10^{-5}$ y tiempo de convergencia con respecto al valor real en un promedio de 700 segundos.

4.1 Caso 1: Resultados obtenidos con un coeficiente de $\lambda = 0.0001$

En el primer caso, consideramos que los parámetros guardados en λ son menores, simulando que se trata de un área transversal y un coeficiente de apertura menor al caso 2, los caudales calculados a lo largo de la tubería y los caudales estimados, se plasman en la Tabla 2.

En las Figuras (5 - 8) se observa la convergencia de los EKFs secuenciales, recalcando que sólo el EKF de la sección de tubería 1, cuenta con las entradas disponibles de medición, en tanto, los siguientes EKFs utilizan las nuevas entradas estimadas mediante las ecuaciones (13) y (32), véase la Figura 4.

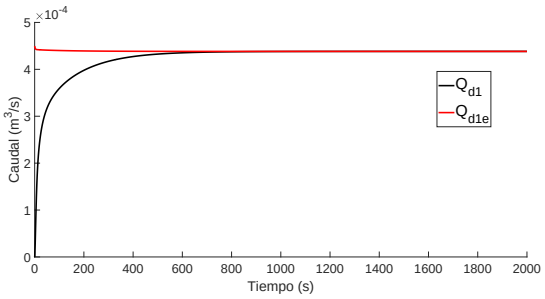


Figura 5. Convergencia del EKF para estimar Q_{d1} con H_{in} como entrada, Q_{in} como salida de medición y $\lambda = 0.0001$.

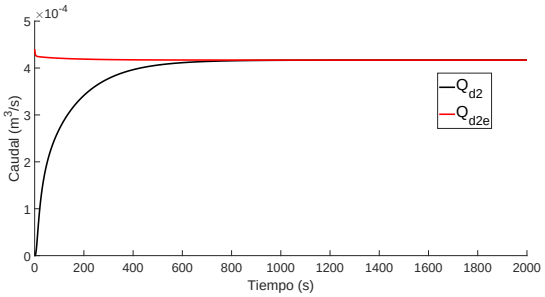


Figura 6. Convergencia del EKF para estimar Q_{d2} con $\hat{H}_2$ como entrada, $\hat{Q}_2$ como salida de medición y $\lambda = 0.0001$.

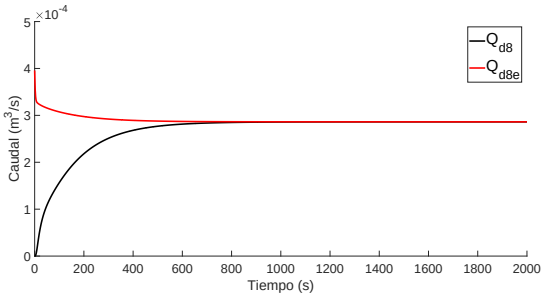


Figura 7. Convergencia del EKF para estimar Q_{d8} con $\hat{H}_8$ como entrada, $\hat{Q}_8$ como salida de medición y $\lambda = 0.0001$.

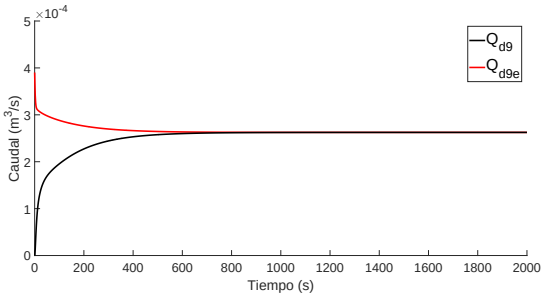


Figura 8. Convergencia del EKF para estimar Q_{d9} con $\hat{H}_9$ como entrada, $\hat{Q}_9$ como salida de medición y $\lambda = 0.0001$.

Tabla 2. Estimación de caudales con $\lambda = 0.0001$

Caudales [m^3/s]		Caudales estimados [m^3/s]	
Q_1	0.0163	$\hat{Q}_1$	0.0163
Q_2	0.0159	$\hat{Q}_2$	0.0159
Q_3	0.0155	$\hat{Q}_3$	0.0155
Q_4	0.0151	$\hat{Q}_4$	0.0151
Q_5	0.0147	$\hat{Q}_5$	0.0147
Q_6	0.0144	$\hat{Q}_6$	0.0143
Q_7	0.0140	$\hat{Q}_7$	0.0140
Q_8	0.0137	$\hat{Q}_8$	0.0137
Q_9	0.0134	$\hat{Q}_9$	0.0134

4.2 Caso 2: Resultados obtenidos con un coeficiente de $\lambda = 0.0002$

Con la finalidad de obtener una plena verificación del algoritmo, se realizaron dos escenarios con coeficientes distintos, los resultados del segundo caso se demuestran en las Figuras 9–12, donde se observa que los caudales de demanda se elevan de forma exponencial, a pesar de ello el esquema de EKFs secuenciales, converge al mismo promedio de tiempo, no pierde la eficacia en las estimaciones, ni en el cálculo indirecto de los demás parámetros.

Los caudales calculados de forma indirecta, mediante la estimación de las demandas nodales y la ecuación de continuidad descrita en (32) se presentan en la Tabla 3

Tabla 3. Estimación de caudales con $\lambda = 0.0002$

Caudales [m^3/s]		Caudales estimados [m^3/s]	
Q_1	0.0179	$\hat{Q}_1$	0.0179
Q_2	0.0170	$\hat{Q}_2$	0.0170
Q_3	0.0162	$\hat{Q}_3$	0.0162
Q_4	0.0154	$\hat{Q}_4$	0.0154
Q_5	0.0147	$\hat{Q}_5$	0.0146
Q_6	0.0140	$\hat{Q}_6$	0.0140
Q_7	0.0134	$\hat{Q}_7$	0.0133
Q_8	0.0128	$\hat{Q}_8$	0.0127
Q_9	0.0122	$\hat{Q}_9$	0.0122

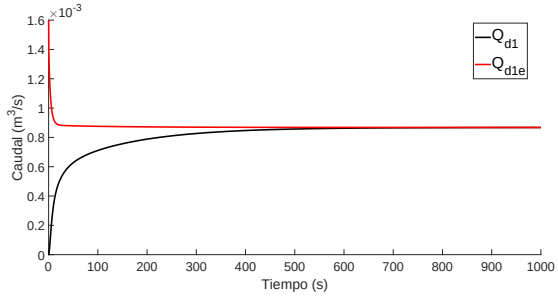


Figura 9. Convergencia del EKF para estimar Q_{d1} con H_{in} como entrada, Q_{in} como salida de medición y $\lambda = 0.0002$.

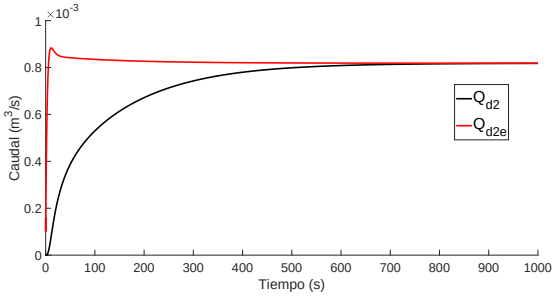


Figura 10. Convergencia del EKF para estimar Q_{d2} con $\hat{H}_2$ como entrada, Q_{2e} como salida de medición y $\lambda = 0.0002$.

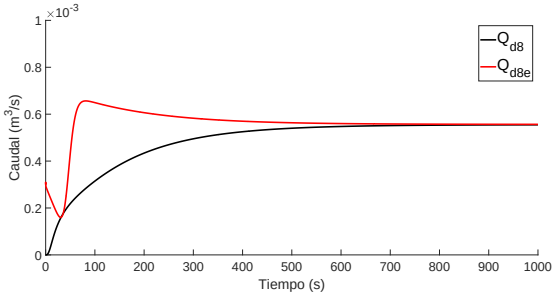


Figura 11. Convergencia del EKF para estimar Q_{d8} con $\hat{H}_8$ como entrada, $\hat{Q}_8$ como salida de medición y $\lambda = 0.0002$.

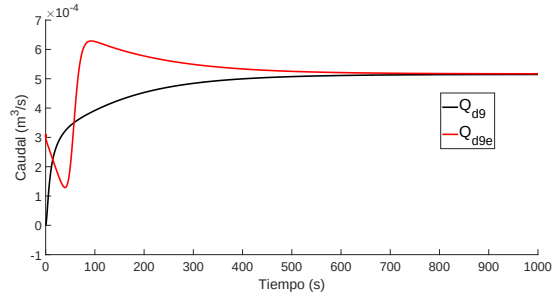


Figura 12. Convergencia del EKF para estimar Q_{d9} con $\hat{H}_9$ como entrada, $\hat{Q}_9$ como salida de medición y $\lambda = 0.0002$.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un enfoque para la estimación de demandas desconocidas en un sistema de distribución de agua. Dicho enfoque resuelve una problemática de vital importancia, pues desde un punto de vista práctico y económico no es posible estimar todas las demandas en un sistema de distribución. El enfoque propuesto a través de múltiples filtros de Kalman en cascada logra satisfactoriamente la estimación de múltiples demandas considerando únicamente sensores de presión y caudal a la entrada y salida de la tubería.

No obstante, como se mencionó en el artículo, la estimación se realiza de forma consecutiva, es decir, para estimar la demanda Qd_n, es necesario estimar la demanda Qd_{n-1}, por tanto si la demanda Q_{n-1} es errónea, las siguientes también lo serán. Esto genera posibles limitantes al llevarlo a la parte experimental debido a que es un algoritmo basado en el modelo, así que la convergencia de los datos

estimados con los datos experimentales, dependerá de las condiciones físicas y de la precisión de dicho modelo.

Para validar el método se propusieron diferentes escenarios simulados en MATLAB, comprobando la efectividad del algoritmo desarrollado y la factibilidad que ofrece para la estimación de n demandas, así como de caudales y presiones desconocidas. Como trabajo futuro, se tiene contemplada la validación experimental con un sistema instrumentado en el laboratorio de Hidroinformática del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, utilizando las mediciones de caudal disponibles a lo largo de la red como valores de referencia, con la finalidad de consolidar la eficacia del algoritmo de estimación propuesto en este artículo.

REFERENCIAS

Antunes, C.H. and Dolores, M. (2016). Sensor location in water distribution networks to detect contamination events—a multiobjective approach based on nsga-ii. In *2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 1093–1099. IEEE.

Bermúdez, J., Santos-Ruiz, I., López-Estrada, F., Torres, L., and Puig, V. (2017). Diseño y modelado dinámico de una planta piloto para detección de fugas hidráulicas. In *Proceedings of the Congreso Nacional de Control Automático CNCA*.

Delgado-Aguiñaga, J., Besancon, G., Begovich, O., and Carvajal, J. (2016). Multi-leak diagnosis in pipelines based on extended kalman filter. *Control Engineering Practice*, 49, 139–148.

Jung, D., Choi, Y., and Kim, J. (2016). Optimal node grouping for water distribution system demand estimation. *Water*, 8(4), 160.

Letting, L., Hamam, Y., and Abu-Mahfouz, A. (2017). Estimation of water demand in water distribution systems using particle swarm optimization. *Water*, 9(8), 593.

Majidi Khalilabad, N., Mollazadeh, M., Akbarpour, A., and Khorashadizadeh, S. (2018). Leak detection in water distribution system using non-linear kalman filter. *Iran University of Science & Technology*, 8(2), 169–180.

Pacchin, E., Gagliardi, F., Alvisi, S., and Franchini, M. (2019). A comparison of short-term water demand forecasting models. *Water resources management*, 33(4), 1481–1497.

Qin, T. and Boccelli, D.L. (2017). Grouping water-demand nodes by similarity among flow paths in water-distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(8), 04017033.

Ribeiro, L., Sousa, J., Marques, A., and Simões, N. (2015). Locating leaks with trustrank algorithm support. *Water*, 7(4), 1378–1401.

Sankar, G.S., Kumar, S.M., Narasimhan, S., Narasimhan, S., and Bhallamudi, S.M. (2015). Optimal control of water distribution networks with storage facilities. *Journal of Process Control*, 32, 127–137.

Santos-Ruiz, I.d.l., Bermúdez, J.R., López-Estrada, F.R., Puig, V., Torres, L., and Delgado-Aguiñaga, J. (2018). Online leak diagnosis in pipelines using an ekf-based and steady-state mixed approach. *Control Engineering Practice*, 81, 55–64.

Sarrate, R., Blesa, J., Nejjari, F., and Quevedo, J. (2014). Sensor placement for leak detection and location in water distribution networks. *Water Science and Technology: Water Supply*, 14(5), 795–803.

Schal, S., Bryson, L.S., Ormsbee, L.E., et al. (2016). A simplified procedure for sensor placement guidance for small utilities. *IJCIS*, 12(3), 195–212.

Torres, L., Jiménez-Cabas, J., González, O., Molina, L., and López-Estrada, F.R. (2019a). Kalman filter for leak diagnosis in pipelines: Brief history and future research.

Torres, L., Verde, C., and Rojas, J. (2019b). Minimal-order observers for locating leaks in a pipeline with a branch. *IFAC-PapersOnLine*, 52(23), 67–72.

Verde, C., Torres, L., and González, O. (2016). Decentralized scheme for leaks' location in a branched pipeline. *Journal of loss prevention in the process industries*, 43, 18–28.

Wang, H., Wang, W., Cui, Z., Zhou, X., Zhao, J., and Li, Y. (2018). A new dynamic firefly algorithm for demand estimation of water resources. *Information Sciences*, 438, 95 – 106.

Zhang, H., Wang, K., Zhou, X., and Wang, W. (2018). Using dfp algorithm for nodal demand estimation of water distribution networks. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(8), 2747–2754.

Zhao, W., Li, H., Zou, L., and Huang, W. (2017). Nonlinear unknown input observer based on singular value decomposition aided reduced dimension cubature kalman filter. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.

Análisis de Ganancia de Voltaje e Impedancia de Entrada de Tanque-Z Modificado

Eduardo S. Estevez Encarnación. Leobardo Hernández González. Juan C. Sánchez García. Jazmín Ramírez Hernández. Luis A. Sotres Jara.

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacan
e-mail: salvador_esee@hotmail.com; Lhernandezg@ipn.mx; jcsanchezgarcia@gmail.com; jazzrh@hotmail.com; lasotres@hotmail.com

Resumen: Los sistemas de transferencia de energía inalámbrica tipo capacitiva se usan como una alternativa a los sistemas de transferencia tipo inductivos. Sin embargo, debido a que son relativamente nuevos, no se ha logrado alcanzar los niveles de potencia y eficiencia con respecto a su contraparte inductiva. En las investigaciones más recientes se busca aumentar la eficiencia a través de lazos de retroalimentación, con la problemática de que la frecuencia de resonancia de estos sistemas cambia con respecto a la distancia de las placas capacitivas, dificultando el diseño del controlador que se podría utilizar. En este trabajo se propone el uso de esquemas multi-resonantes, en particular la topología de tanque -Z modificado para compensar la variación en frecuencia de un esquema de transferencia de energía tipo capacitiva.

Palabras Clave: Multi-Resonante, Tanque-Z, Transmisión inalámbrica capacitiva.

1. INTRODUCCIÓN

La transferencia inalámbrica de energía tipo capacitiva (CPT por las siglas en inglés de *Capacitive Power Transfer*), utiliza el campo eléctrico para realizar la transmisión entre placas, este tipo de transmisión no presenta pérdidas por estar frente a elementos metálicos, a diferencia de lo que ocurre con la transmisión tipo inductiva.

Sin embargo, la mayoría de los sistemas tipo capacitivo se centran en aplicaciones de corta distancia entre el transmisor y el receptor, y dado que están por debajo de las decenas de watts, son de baja potencia. Esto se debe a que la magnitud de la capacitancia de acoplamiento es afectada por la distancia, y su consecuente efecto en la frecuencia de resonancia. Para hacer frente a esta problemática, se deben estudiar nuevas topologías de circuitos, aplicarlas como redes de compensación y aumentar la eficiencia de los circuitos propuestos.

Los sistemas CPT se clasifican según la topología usada como red de compensación. La topología más utilizada es la de inductor resonante en serie, que requiere de una magnitud de capacitor de acoplamiento alta o frecuencia de operación alta para minimizar los componentes reactivos. Es posible utilizar circuitos que puedan trabajar bajo esas características, aunque su eficiencia no sea muy alta. Otra opción son los circuitos no resonantes, pero de igual manera, requieren que la magnitud del capacitor de acoplamiento sea alta. Se han desarrollado otras topologías de compensación que presentan alta eficiencia, distancia de separación grande y una transferencia de potencia del orden de kilowatts, aunque con elementos extras que constituyen a la red de compensación. Para el diseño de estas redes se deben desarrollar las ecuaciones de diseño que garanticen la correcta transferencia de energía a través del campo eléctrico que se forma en el área de las placas capacitivas.

En este artículo se propone un análisis teórico de ganancia de voltaje e impedancia de entrada de una red multi-resonante propuesta por Huang (2013) y que presenta características adecuadas para su integración como red de compensación en la transferencia inalámbrica de energía tipo capacitiva. Se presentan las ecuaciones desarrolladas de ganancia de voltaje e impedancia de entrada, comportamiento de la frecuencia de resonancia a cambios de capacitancia de placas y el efecto de la red de compensación. Los resultados teóricos se validan con simulaciones eléctricas.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Circuitos Multi-Resonantes

Los esquemas multi-resonantes son circuitos que están formados por tres o más elementos almacenadores de energía (capacitores e inductores), lo que les brinda la característica de presentar dos o más frecuencias de resonancia. Un ejemplo de este tipo de circuito se observa en la Figura 1. Las ecuaciones de resonancia están dadas por (1) y (2).

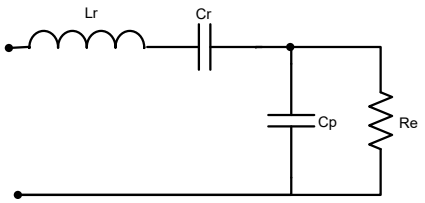


Fig. 1. Circuito Multi-resonante tipo LCC.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (1)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r\left(\frac{C_r C_p}{C_r + C_p}\right)}} \quad (2)$$

2.2. Circuitos Multi-Resonantes de tres elementos

En la tesis desarrollada por Huang (2013), el autor detecta 36 posibles topologías multi-resonantes de tres elementos. Sin embargo, también menciona que para aplicaciones *CPT*, la fuente de entrada debe de ser del tipo voltaje, por lo que se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Si uno o más elementos están conectados a la fuente, el circuito resonante se degradará a un sistema de menor orden.
- Los capacitores no pueden estar conectados en paralelo con la fuente.
- Debe de existir un capacitor en serie conectado a la salida.

Si se aplican las dos primeras condiciones, de las 36 posibles topologías iníciales, solo 14 tienen posibilidad de ser aplicables en CPT. Si se aplica la tercera condición a las 14 topologías posibles de utilizar en CPT, se obtienen solo 2 topologías, que se muestran en la Figura 2.

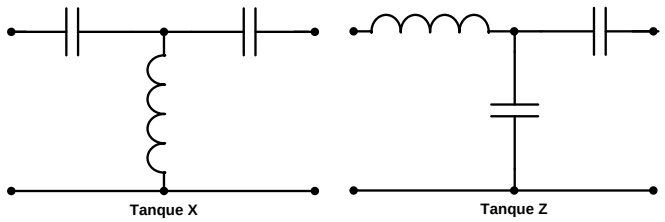


Fig. 2. Circuitos Multi-Resonantes de 3 elementos.

La propuesta en este artículo se centrará en el análisis del Tanque-Z, pero una versión modificada para su aplicación en CPT, como se muestra en la Figura 3.

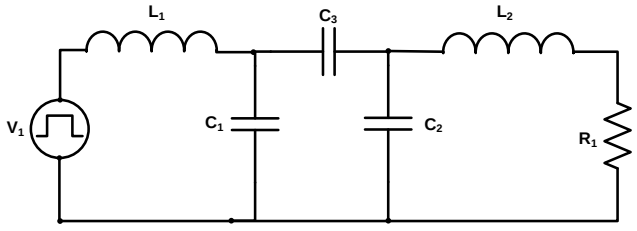


Fig. 3. Tanque-Z modificado.

3. ANÁLISIS TEÓRICO

3.1. Análisis de Frecuencia de Resonancia

Como primer análisis se procedió a analizar el comportamiento de la frecuencia de resonancia del Tanque-Z modificado, para comprobar la afirmación que indica Zhang *et al*, (2016), si los capacitores en paralelo (C_1 y C_2), son mucho mayores que C_3 (la capacitancia entre placas), entonces la frecuencia de resonancia estará dominada por L_1-C_1 y L_2-C_2.

Como primer paso, se puede observar en la Figura 3 que los capacitores forman una conexión tipo Delta. Debido a esto, se procede a realizar una conversión de conexión Delta – Estrella y poder observar el efecto directo de los capacitores e inductores, obteniendo el diagrama equivalente que se muestra en la Figura 4. Las ecuaciones (3) a (5) presentan las relaciones equivalentes para la conversión Delta-Estrella.

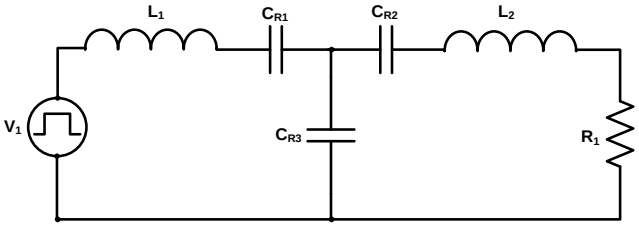


Fig. 4. Tanque z modificado con conversión Delta – Estrella.

Donde:

$$\frac{1}{SC_{R1}} = \frac{\left(\frac{1}{SC_1} * \frac{1}{SC_3}\right)}{\frac{1}{SC_1}+\frac{1}{SC_2}+\frac{1}{SC_3}} = \frac{C_2}{S[C_3(C_1+C_2)+C_1C_2]} \quad (3)$$

$$\frac{1}{SC_{R2}} = \frac{\left(\frac{1}{SC_2} * \frac{1}{SC_3}\right)}{\frac{1}{SC_1}+\frac{1}{SC_2}+\frac{1}{SC_3}} = \frac{C_1}{S[C_3(C_1+C_2)+C_1C_2]} \quad (4)$$

$$\frac{1}{SC_{R3}} = \frac{\left(\frac{1}{SC_1} * \frac{1}{SC_2}\right)}{\frac{1}{SC_1}+\frac{1}{SC_2}+\frac{1}{SC_3}} = \frac{C_3}{S[C_3(C_1+C_2)+C_1C_2]} \quad (5)$$

Como una primera aproximación de (3), (4) y (5), se observa que, si C_3 es menor a C_1 y C_2, se cumple que $C_{R1}\approx C_1$ y $C_{R2}\approx C_2$, lo que indica que las frecuencias de resonancia estarán determinadas por el arreglo L_1-C_1 y L_2-C_2. Tomando la condición $F_{01}=F_{02}$ (donde F_{01} y F_{02} representan las frecuencias de resonancia por los arreglos L_1-C_1 y L_2-C_2 respectivamente), se tiene un comportamiento de resonancia dominado por los capacitores C_1 y C_2 y no por las capacitancias de placas C_3.

Para verificar las expresiones desarrolladas, se procedió a realizar una simulación del esquema propuesto para las siguientes condiciones:

- Frecuencia de resonancia: 1MHz
- Capacitancia de placas, C_3=450pF

Para los capacitores C_1=C_2, se propusieron diferentes relaciones con respecto al valor de C_3, el valor de inductor L1 se calculó a la frecuencia de resonancia de 1MHz. En la Tabla 1, se muestran los valores de simulación obtenidos para diferentes relaciones de capacitancias.

 ISSN en trámite

Tabla 1. Datos obtenidos en simulación

C_1=C_2		L_1=L_2	Frecuencia de resonancia en simulación	Porcentaje de Error
10*C3	4.5nF	5.63µH	955kHz	4.71%
20*C3	9nF	2.81µH	977kHz	2.33%
30*C3	13.5nF	1.88µH	977kHz	2.33%
40*C3	18nF	1.41µH	977kHz	2.33%
50*C3	22.5nF	1.13µH	977kHz	2.33%
60*C3	27nF	938nH	1MHz	0.00%
70*C3	31.5nF	80.4nH	1MHz	0.00%
80*C3	36nF	704nH	1MHz	0.00%
90*C3	40.5nF	625nH	1MHz	0.00%
100*C3	45nF	563nH	1MHz	0.00%

Se puede observar que mientras mayor sea la relación de C_1=C_2 con respecto a C_3, el porcentaje de error va disminuyendo hasta llegar a cero, se obtiene un valor mínimo deseado de 60*C_3.

Tomando en cuenta dichos valores, se procedió a realizar una simulación considerando que el capacitor C3 tenga variaciones en su valor (representando variaciones en las capacitancias de placas). Para ello se propone un barrido desde 150pF hasta 750pF en pasos de 100pF. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5, corroborando que la frecuencia de resonancia está determinada principalmente por el tanque resonante L_1-C_1 o L_2-C_2.

3.2. Análisis de Ganancia de Voltaje

Se inicia con un análisis del Tanque-Z modificado para la condición sin carga. Esto se puede apreciar en la Figura 6.

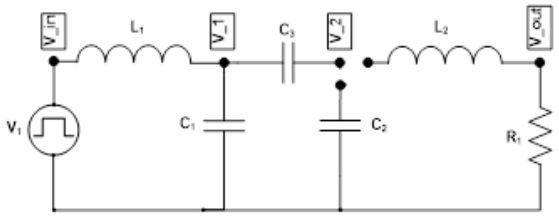


Fig. 6. Primer análisis de ganancia de voltaje sin carga

Al considerarse en circuito abierto, la ganancia de voltaje del puerto de entrada solo depende de los elementos L_1 y C_1 y está determinada por (6).

$$G_{V1} = \frac{V_1}{V_{in}} = \frac{1}{1-\omega^2 * L_1 * C_1} \quad (6)$$

En la Figura 7, se muestra la validación de la expresión (6) con los resultados obtenidos de simulación. Los valores propuestos fueron seleccionados de la Tabla 1, en particular se analizó el caso de estudio C_1=C_2=60*C_3.

La ganancia esperada es de 75.4dB y la ganancia obtenida en simulación es de 72.4 dB, representando un error menor al 4%.

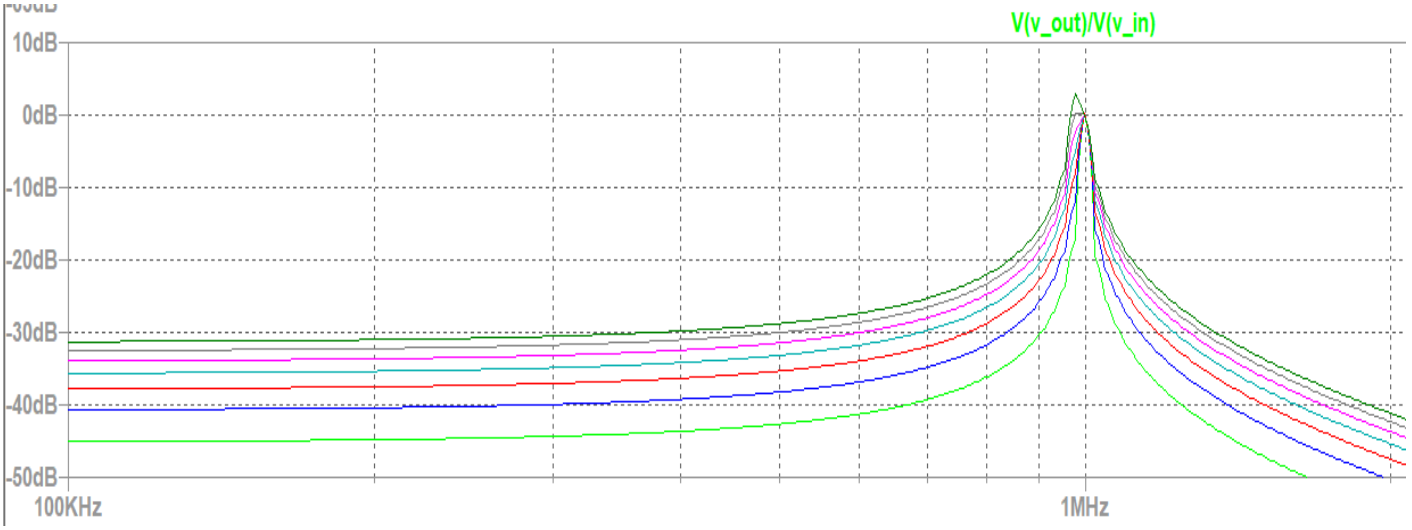


Fig. 5. Frecuencia de resonancia con variaciones en el valor de C_3.

 ISSN en trámite

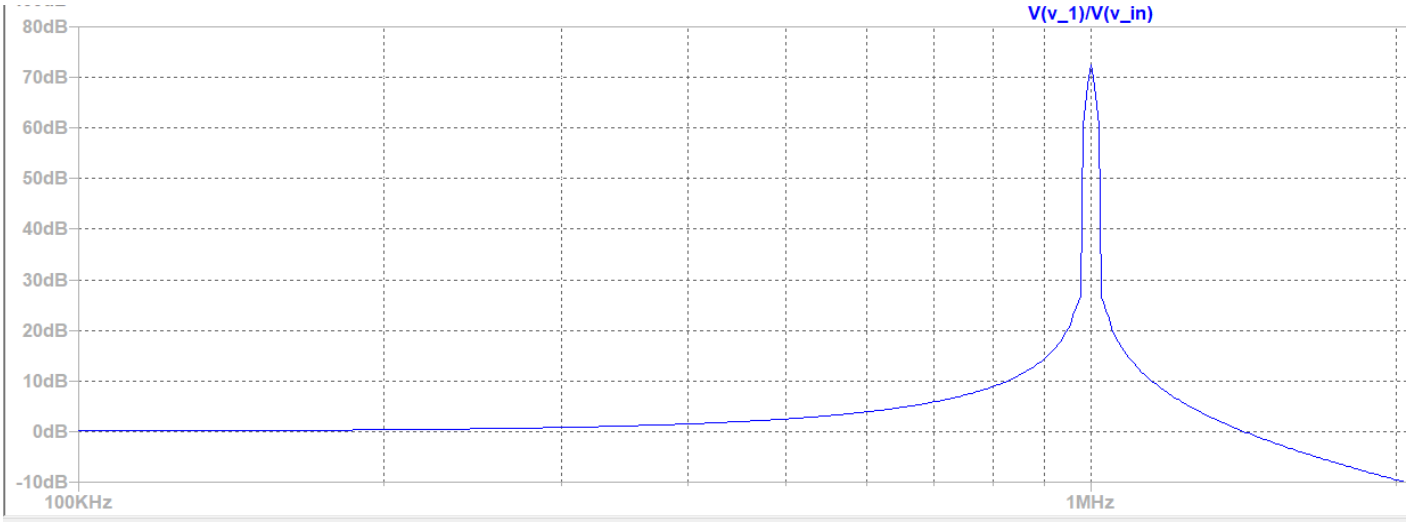


Fig. 7. Resultados de Simulación de G_{V1} con magnitud de 72.4dB en 1MHz.

Una vez que se tiene validado la ganancia de voltaje del puerto de entrada, se procede a determinar la ganancia de voltaje del arreglo capacitivo que se muestra en la Figura 8.

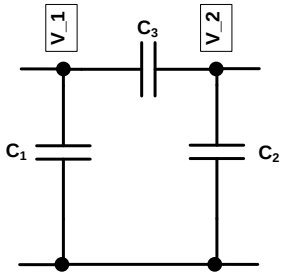


Fig. 8. Arreglo de capacitores para estimación de G_{V2}.

La ganancia de voltaje del arreglo capacitivo está determinada por (7) con la condición C_1=C_2.

$$G_{V2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{C_3}{C_3+C_3} \quad (7)$$

En la Figura 9, se muestra la validación de la expresión (7) con los resultados obtenidos de simulación.

La ganancia estimada es de -35.7dB, y la ganancia obtenida en simulación es de -35.71 dB, por lo que se puede considerar que la expresión (7) presenta un error muy pequeño, como método de aproximación.

4. CONCLUSIONES

El circuito Tanque-Z modificado, presenta características eléctricas deseables para su integración a CPT. Un aumento en la relación C_3/C_1 y C_3/C2, permite establecer la frecuencia de resonancia por los arreglos L_1-C_1 y L_2-C_2.

Sin embargo, analizando con mayor detalle (7), se puede determinar que una relación C_3/C_2 demasiado grande como opción para compensar la frecuencia de resonancia, impactará en una atenuación significativa en la G_{V2} y por lo tanto en una baja transferencia de energía. Debido a esto, se puede determinar que existe un compromiso inverso entre la compensación de la frecuencia de resonancia y la ganancia de voltaje del arreglo capacitivo.

Como trabajo futuro se determinará un análisis más detallado de la ganancia de voltaje total de circuito, así como las ecuaciones que permitan establecer un diseño y operación óptimo del circuito Tanque-Z modificado, para corrientes y voltajes deseados.

 ISSN en trámite

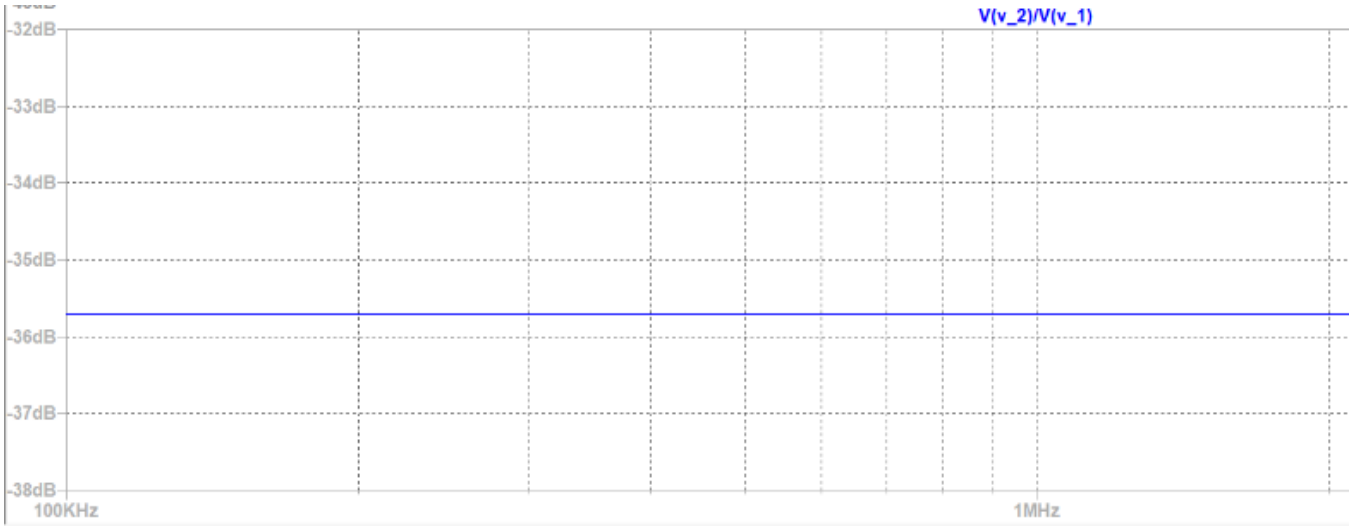


Fig. 9. Resultados de Simulación de G_{V2} con magnitud -35.71dB.

REFERENCIAS

Huang, D., (2013). *Investigation of Topology and Integration for Multi-Element Resonant Converters*. Tesis de Doctorado. Virginia, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.

Islam, N., Mohammad, A., and Nafees, Q., (2019) "A Comprehensive Overview on the Development of Compensation Topologies for Capacitive Power Transfer System", Electrical and Electronic Engineering. Vol. 9 No. 1, 2019, pp. 9-16

Zhang, H., Lu F., Hofmann, H., and Mi C., (2016) "A loosely Coupled Capacitive Power Transfer System with LC Compensation Circuit Topology" conferencia dictada durante *2016 Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Milwaukee, IEEE.

Zhang, H., Lu F., Hofmann, H., and Mi C., (2018) "A Double-Sided LC-Compensation Circuit for Loosely Coupled Capacitive Power Transfer", IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 33 No.2, Febrero 2018, pp. 1633-1643.

Implementación en FPGA de una técnica de modulación LS-PWM modificada para inversor multinivel con reasignación de los pulsos de comando

B. Chavarría*. J. Aguayo**
S. de León***

Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Depto. de Ingeniería Electrónica, C.P. 62490 Cuernavaca, México,
** (Tel: 922-116-7507; e-mail: benjamin.chavarria18ea@cenidet.edu.mx,),*
*** (e-mail: jaguayo@cenidet.edu.mx),*
**** (e-mail: susana.deleon@cenidet.edu.mx),*

Resumen: Los convertidores de potencia actuales emplean dispositivos semiconductores para controlar parámetros como corriente, voltaje y potencia. Estos dispositivos semiconductores requieren de una etapa de pulsos de comando generalmente basada en sistemas digitales. Este trabajo muestra un procedimiento para programar en una FPGA una técnica de modulación capaz de reasignar sus pulsos de comando en los diferentes niveles de un inversor multinivel, permitiendo obtener un procesamiento equilibrado de voltaje en las diferentes celdas de puentes H que conforman al inversor multinivel.

Palabras clave: FPGA, Programación Verilog, Modulaciones SPWM, Inversores, Balance de energía.

1. INTRODUCCIÓN

Los inversores son una topología dentro de la electrónica de potencia capaz de convertir corriente directa (C.D.) en corriente alterna (C.A.) con forma de onda senoidal, sin embargo, ninguna de las formas de onda entregadas por los inversores replica una señal senoidal perfecta, por tal motivo, los inversores deben cubrir un conjunto de criterios para poder entregar señales bajo estándares de menor índice de THD (Total Harmonic Distortion, por sus siglas en ingles), menores perdidas por conmutación, mayor procesamiento de potencia, reducción de la etapa de filtrado y máximo aprovechamiento del bus de C.D.

Una de las topologías más convenientes para la conversión de C.D. a C.A. es la de inversor multinivel en cascada de puentes H (CHB-MLI), emplea un conjunto de buses de C.D. conectados a celdas de puente H (Ver Fig. 1.) basada en cuatro dispositivos semiconductores, comúnmente transistores IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor por sus siglas en inglés) o MOSFET (Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor, por sus siglas en inglés). La conmutación de los puentes H se rigen por un conjunto de pulsos de conmutación desarrolladas por diversas técnicas de modulación (Franquelo et al., 2008, pp. 28-39).

Existen diversas técnicas para generar los pulsos de conmutación, algunas basadas en algoritmos de optimización mediante enjambre de partículas, moduladores vectoriales, basadas en múltiples portadoras, entre otras.

La técnica de modulación SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation, por sus siglas en inglés) basada en la comparación de un grupo de señales triangulares portadoras (comúnmente en el orden de 1kHz a 15 kHz) con una señal senoidal moduladora (comúnmente en frecuencias de 50 Hz o 60 Hz) brinda como resultado los pulsos de conmutación necesarios para las celdas de puentes H. La técnica SPWM se caracteriza por su fácil desarrollo, tener la capacidad de generar pulsos a altas frecuencias y no requerir una gran capacidad de procesamiento como sucede con la mayoría de algoritmos de optimización.

La técnica de modulación SPWM se divide en PS-PWM (Phase Shifted - PWM, por sus siglas en ingles) y LS-PWM (Level Shifted - PWM, por sus siglas en ingles). La técnica PS-PWM posee la ventaja de generar pulsos de conmutación capaces de distribuir equitativamente el procesamiento de energía que realizan las celdas de puentes para convertir la corriente de C.D. a C.A. pero no es la mejor técnica para aprovechar la máxima cantidad de energía del bus de C.D. y genera una gran cantidad de pulsos de conmutación que terminan estresando a los transistores del puente H (Rodriguez et al., 2002, pp 724-738).

Por su parte, la técnica de modulación LS-PWM presenta un mejor aprovechamiento del bus de C.D. y su número de conmutaciones es menor, pero debido a la disposición de las señales portadoras los pulsos generados ocasionan que cada una de las celdas del inversor procese una cantidad diferente de energía trayendo consigo un desgaste prematuro en las celdas que procesan más cantidad de energía. En la técnica LS-PWM

 ISSN en trámite

las señales portadoras solo son comparadas con una fracción de la magnitud total de la señal moduladora. La Fig. 1 muestra la disposición de las señales portadoras y moduladora en una técnica LS-PWM, sus pulsos de conmutación resultantes y su asignación en inversor CHB-MLI de 7 niveles.

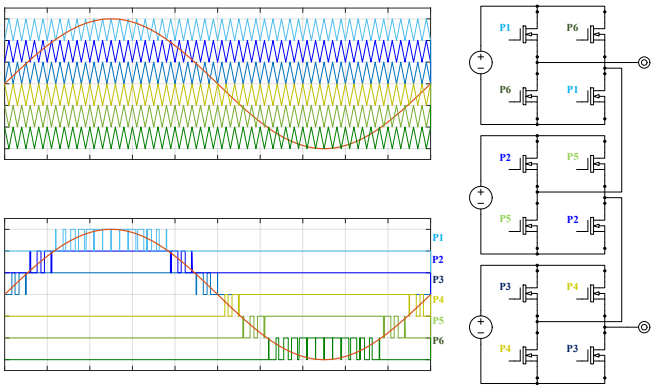


Fig. 1. a) Modulación tipo LS-PWM y pulsos resultantes para un inversor de 7 niveles, b) Inversor CHB-MLI de 7 niveles con asignación de pulsos.

Los CHB-MLI disponen de una etapa de control comúnmente basada en un sistema embebido que genera los pulsos de conmutación. Un sistema embebido encargado de la generación de los pulsos para el CHB-MLI empleando una técnica SPWM debe ser suficientemente rápido para generar los pulsos de conmutación sin presentar desfaces o retardos entre ellos, de presentarse estos problemas las celdas de puentes H pueden entrar en cortocircuito afectando el funcionamiento del inversor, esto podría incrementar la THD, desgastar los transistores del puente H y reducir el aprovechamiento del bus de C.D.

Para cumplir los requerimientos de los pulsos generados por la modulación SPWM y el CHB-MLI es recomendable usar un dispositivo de descripción de hardware como una FPGA (Field-programmable gate array, por sus siglas en inglés), estos dispositivos están basados en arreglos matriciales de compuertas lógicas interconectadas entre ellas, mediante lenguajes como Verilog o VHDL (acrónimo proveniente de VHSIC <<Very High Speed Integrated Circuit>> y HDL <<Hardware Description Language>>) se definen y crean circuitos lógicos que realizan las operaciones deseadas por el programador.

Las FPGA poseen generadores de pulsos (reloj principal) que se encuentran en el orden de los Megahertz y como la construcción de sus funciones se realiza desde cero y de forma física (dentro de los arreglos matriciales de compuertas lógicas) se puede programar secciones que se ejecuten de forma paralela a muy altas frecuencias (según el límite impuesto por el reloj principal de la tarjeta empleada).

Al revisar la literatura se encontraron trabajos enfocados en el balance de la energía procesada por cada celda del CHB-MLI, en los cuales se aborda el análisis de las distintas técnicas SPWM que consiguen un equilibrio en la cantidad de energía procesada por cada celda. En (Sarkar y Fernandes, 2014, pp. 4318-4324.) comparan un grupo de técnicas LS-PWM modificadas con la técnica PS-PWM, mientras que (Rao y Mahesh, 2017, pp. 1578-1583) presenta una variante de técnica LS-PWM implementada en una FPGA, pero no describe a detalle el procedimiento de implementación en su sistema embebido.

Otros trabajos reportan métodos de programación en tarjetas de desarrollo basadas en FPGA, tal es el caso de (Ahmad y Gupta, 2013, pp. 1-5; Hatas et al., 2019, pp. 1-6) que describen sus procedimientos con la herramienta System Generator para desarrollar sus técnicas de modulación y pulsos, traducirlos a lenguaje VHDL e implementarlos en una FPGA, sin embargo, se trata de técnicas de modulación LS-PWM comunes.

Este trabajo toma el concepto de la técnica LS-PWM modificada que distribuye equitativamente el procesamiento de energía llevado a cabo en las celdas de un CHB-MLI de 7 niveles. Se describe con detalle el método de programación basado en la plataforma Icestudio y el lenguaje Verilog para implementar en una FPGA los pulsos de comando resultantes de la modulación.

2. METODOLOGÍA

Esta sección se divide en cuatro partes, en la primera se describe el comportamiento de la técnica de modulación que logra el equilibrio de energía procesada en las celdas del CHB-MLI. La segunda sección señala los parámetros a considerar para un correcto desarrollo de la técnica de modulación. La tercera etapa describe el procedimiento de discretización de señales. Y en la cuarta, el procedimiento para implementar en una FPGA la técnica LS-PWM modificada.

2.1 Descripción de la técnica LS-PWM modificada

La técnica de modulación LS-PWM modificada reasigna el desplazamiento de nivel de las señales portadoras cada vez que comienza un nuevo ciclo de la señal moduladora. La Fig. 2 muestra esta técnica modificada y los pulsos resultantes para el inversor CHB-MLI de 7 niveles.

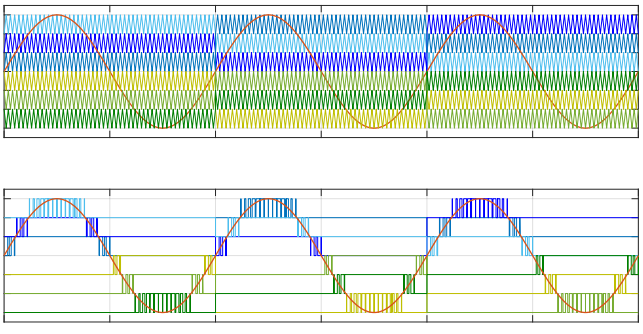


Fig. 2. Modulación LS-PWM modificada para redistribuir los pulsos de conmutación al comenzar un nuevo ciclo de la señal moduladora senoidal.

 ISSN en trámite

Para la redistribución completa de los pulsos de conmutación esta técnica de modulación necesita una determinada cantidad de ciclos de la señal senoidal según el número de celdas que posea el inversor. En el caso abordado se emplea un CHB-MLI de 7 niveles (conformado por 3 celdas conectadas en cascada) por lo que requiere de tres ciclos de la senoidal.

La Fig. 3 se muestra como la variación de la señal portadora triangular se relaciona con el orden de los pulsos de conmutación en las 3 celdas de puentes H durante cada uno de los tres ciclos de la señal senoidal.

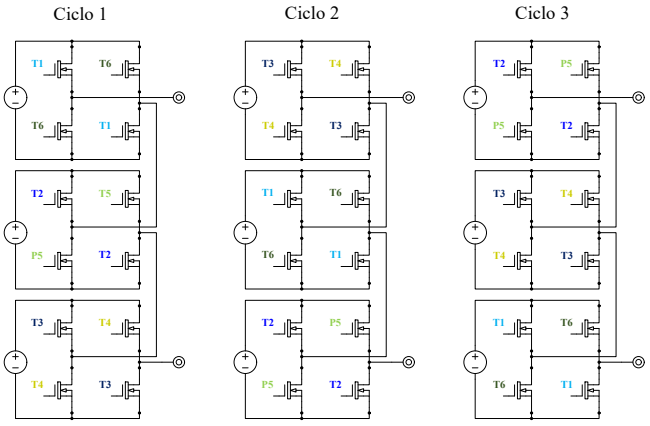


Fig. 3. Variación de las señales portadoras a lo largo de los tres ciclos de la señal moduladora visto desde el inversor CHB-MLI.

2.2 Consideración de parámetros para desarrollar la técnica de modulación LS-PWM modificada

Se definen los parámetros de las señales que integran a la modulación, siendo seis señales triangulares portadoras de 2.5 kHz con un volt de amplitud, comparadas con una señal senoidal moduladoras de 50 Hz de seis volts de amplitud. El índice de modulación en amplitud es 1 y el índice en frecuencia es de 50. En (1) se hace referencia a la fórmula para la definición del índice de modulación en amplitud.

$$m_a = \frac{S_m}{S_p * N_p} = \frac{6\ V}{1\ V * 6} = \frac{6\ V}{6\ V} = 1 \tag{1}$$

Donde "m_a" es el índice de modulación en amplitud, "S_m" corresponde a la amplitud de las señales moduladoras, "S_p" a la amplitud de la señal portadora y "N_p" al número de portadoras.

En (2) se hace referencia a la fórmula para el índice de modulación en frecuencia.

$$f_a = \frac{f_p}{f_m} = \frac{2500\ Hz}{50\ Hz} = 50\ Hz \tag{2}$$

Donde "f_a" es el índice de modulación en frecuencia, "f_p" corresponde a la frecuencia de la señal portadora y "f_m" a la frecuencia de las señales moduladoras.

Para implementar la técnica de modulación dentro del FPGA es necesario discretizar las señales portadoras y moduladoras, el número de muestras que integran los vectores de datos donde se guardan las señales discretizadas debe mantener una relación de submúltiplos enteros con respeto a la frecuencia del reloj principal del FPGA.

Considerando que la tarjeta de desarrollo por emplear es la TinyFPGA BX que integra un reloj principal de 16 MHz, se define un número de cuatrocientas muestras para las señales portadoras y mil muestras para la señal moduladora. En (3) se hace referencia a la relación entre el reloj principal y el número de muestras de la señal discretizada.

$$R_{fn} = \frac{f_{rp}}{N_m} = \frac{16\ MHz}{1000} = 16\ kHz \tag{3}$$

Donde "R_{fn}" es la relación de la frecuencia del reloj principal del FPGA entre el número de muestras de la señal discretizada, "f_{rp}" corresponde a la frecuencia del reloj principal y "N_m" al número de muestras de la señal moduladora.

En (4) se presenta el valor submúltiplo entero resultante de dividir "R_{fn}" entre la frecuencia propuesta para la señal moduladora discretizada, este valor submúltiplo del reloj principal del FPGA corresponde al divisor de frecuencia necesario para que la señal moduladora alcance los 50 Hz.

$$f_{df} = \frac{R_{fn}}{f_m} = \frac{16\ kHz}{50\ Hz} = 320 \tag{4}$$

Donde "f_{df}" es el valor del divisor de frecuencia (valor submúltiplo del reloj principal del FPGA), "R_{fn}" es la relación de la frecuencia del reloj principal del FPGA entre el número de muestras de la señal discretizada y "f_m" corresponde a la frecuencia definida para la señal moduladora.

Mientras que en (5) y (6) se realiza el mismo procedimiento detallado anteriormente, pero con los valores de la señal portadora triangular.

$$R_{fn} = \frac{f_{rp}}{N_p} = \frac{16\ MHz}{400} = 40\ kHz \tag{5}$$

Donde "R_{fn}" es la relación de la frecuencia del reloj principal del FPGA entre el número de muestras de la señal discretizada, "f_{rp}" corresponde a la frecuencia del reloj principal y "N_p" al número de muestras de las señales portadoras.

$$f_{df} = \frac{R_{fn}}{f_p} = \frac{40\ kHz}{2.5\ kHz} = 16 \tag{6}$$

Donde "f_{df}" es el valor del divisor de frecuencia, "R_{fn}" es la relación de la frecuencia del reloj principal del FPGA entre el número de muestras de la señal discretizada y "f_p" corresponde a la frecuencia definida para las señales portadoras.

 ISSN en trámite

2.3 Discretización de la técnica LS-PWM modificada

Dentro del programa Simulink se genera una simulación de 1000 segundos correspondiente a las mil muestras que cubren un ciclo de la señal senoidal moduladora y las cuatrocientas muestras para un ciclo de las señales triangulares portadoras. La Figura 4 muestra la disposición de los bloques empleados para la generación y adquisición de las señales discretizadas.

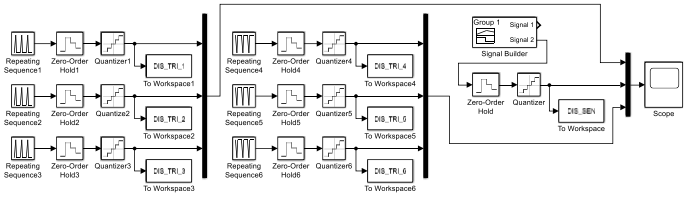


Fig. 4. Bloques de Simulink que generan la modulación LS-PWM modificada.

La Figura 5 muestra las señales discretizadas generadas en la simulación y almacenadas por los bloques “To Workspace”.

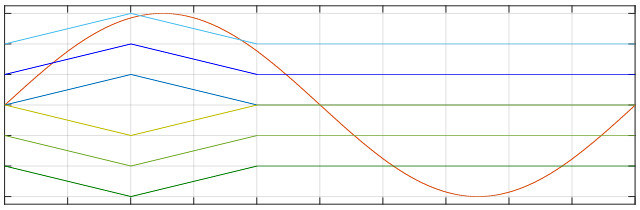


Fig. 5. Señales discretizadas de la modulación LS-PWM modificada.

Los vectores almacenados por los bloques “To Workspace” son abiertos con la ventana de comandos de Matlab y transferidos al programa Excel para completar unas listas instrucciones con la nomenclatura: “10'd0: S <= (vector);” del lenguaje Verilog.

2.4 Programación de los pulsos de comando en Icestudio

La Figura 6 presenta el esquema de programación desarrollado en Icestudio para la implementación de los pulsos de comando en la FPGA de la tarjeta de desarrollo TinyFPGA BX.

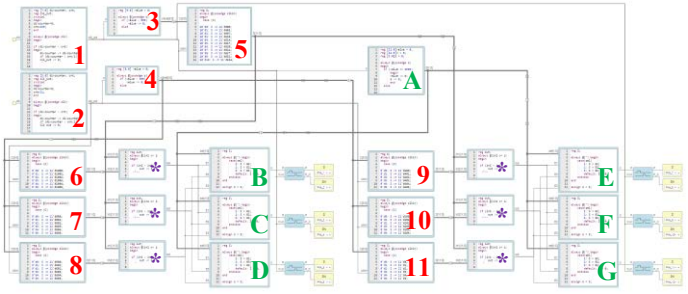


Fig. 6. Esquema de programación de los pulsos de conmutación.

El bloque “1” corresponden al divisor de frecuencia de 50 Hz determinado por la Ecuación 4 para la señal moduladora, En el bloque “2” se encuentra el divisor de frecuencia de 2.5 KHz calculado en la ecuación 6 para las señales portadoras.

Los bloques “3” y “4” desarrollan contadores de 10 bits y 9 bits que asigna un espacio de memoria a cada instrucción de las listas desarrolladas en Excel, las instrucciones correspondientes al mismo número de muestra son ejecutadas de forma paralela.

Los bloques del “5” al “11” son denominados “Memorias” y contienen las listas de instrucciones desarrolladas en el punto anterior, cada instrucción da información de una muestra.

Los bloques de asterisco morado son llamados “Comparadores” y generan los pulsos de conmutación al comparar las señales previamente almacenadas en los bloques de “memoria”.

Los bloques azules generan un pulso complementario al pulso entregado por los “Comparadores”, también crean el tiempo muerto entre el pulso del comparador y su complementario, evitando estados de corto circuito en el puente H.

Los bloques amarillos definen los pines de la tarjeta de desarrollo por donde se emiten los pulsos de conmutación entregados previamente por los por los bloques azules.

El bloque “A” es un contador de 12 bits corriendo de “0” a “2999”, este indica ordenes de reasignación de posición cada 1000 muestras a los bloques “B” a “G”, los cuales multiplexan la información entregada por los bloques de “Comparadores”.

3. RESULTADOS

La Fig. 7 corresponde a la lectura tomada con el osciloscopio de los pines del FPGA por donde se emiten los pulsos de conmutación de la técnica LS-PWM modificada.

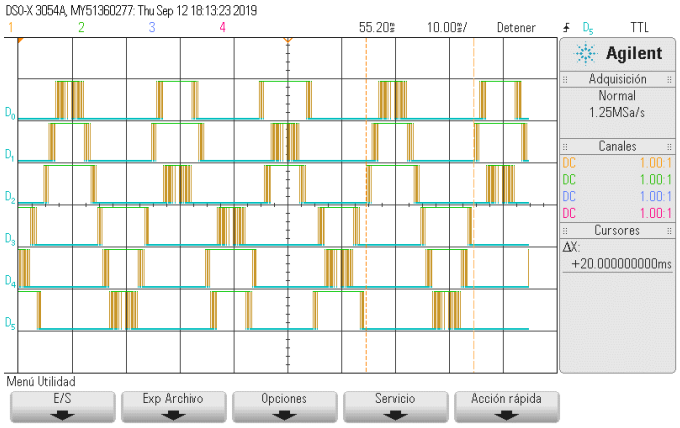


Fig. 7. Pulsos de computación de la técnica LS-PWM modificada en la FPGA.

Se aprecia la reasignación de los pulsos de conmutación durante tres ciclos, inmediatamente se repite el proceso. Con los cursores se midió la duración de un ciclo, en la parte izquierda de la pantalla se indica que el tiempo obtenido de dicho ciclo es de 20 milisegundos que corresponde con 50 Hz, con lo cual, se cumple correctamente la implementación de la técnica según los parámetros previamente definidos.

 ISSN en trámite

La Figura 8 presenta la lectura del voltaje diferencial en cada una de las tres celdas de un CHB-MLI de 7 niveles con la técnica de modulación LS-PWM modificada. Se corrobora que las celdas van cambiando la cantidad de voltaje procesado ciclo con ciclo.

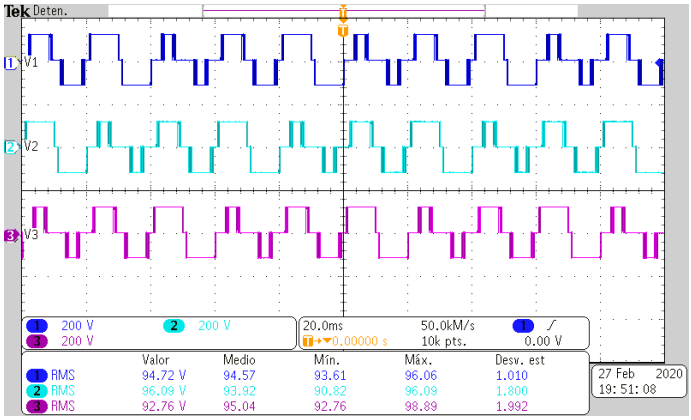


Fig. 8. Voltaje procesado por cada celda con la técnica LS-PWM modificada.

La Figura 9 presenta la lectura del voltaje diferencial en cada una de las tres celdas de un CHB-MLI de 7 niveles donde se probó la técnica de modulación LS-PWM común.

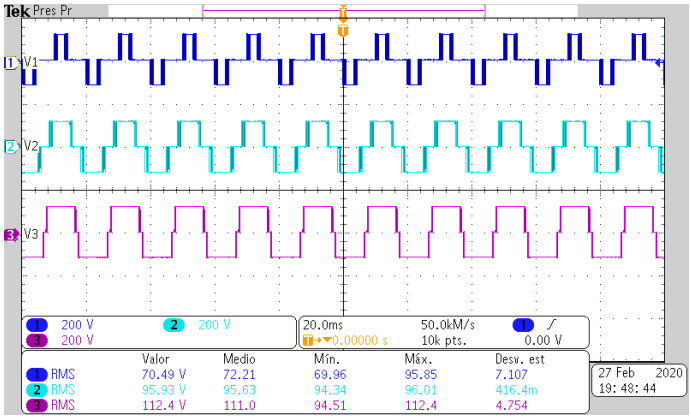


Fig. 9. Voltaje procesado por cada celda con la técnica LS-PWM común.

Con los valores de voltaje RMS (presentados en la parte inferior de las figuras 8 y 9) para cada celda según la técnica de modulación se desarrolló la Tabla 1.

Tabla. 1. Comparativa del voltaje procesado por celda en ambas técnicas.

	Voltaje RMS Celda 1	Voltaje RMS Celda 2	Voltaje RMS Celda 3
LS-PWM modificada	94.72 V	96.09 V	92.76 V
LS-PWM común	70.49 V	95.93 V	112.4 V

La menor discrepancia entre los valores de voltaje RMS en cada celda vistos con la técnica de modulación LS-PWM modificada confirman su efectividad para generar el balance de energía.

4. CONCLUSIONES

La discretización de señales debe ser lo más cercano posible a las formas de onda originales para evitar las distorsiones, es necesario seleccionar adecuadamente el número de muestras que conformaran a cada señal discretizada, estas deben ser múltiplos entre sí, también se debe cuidar el redondeo de valores decimales al discretizar. Al momento de definir las frecuencias de las señales discretizadas dentro del FPGA se tiene que prever que los valores de división del reloj principal para los subrelojes de las señales discretizadas (divisores de frecuencia) sean submúltiplos exactos del valor del reloj fundamental.

La técnica de modulación LS-PWM modificada, consiguió su objetivo al balancear la cantidad de energía que procesa cada celda del CHB-MLI después de un periodo de tiempo (3 ciclos de la señal moduladora), aunque los pulsos son redistribuidos ciclo con ciclo en los diferentes niveles, estos siguen conservando su contenido y simetría, por lo cual, la forma de onda resultante a la salida del CHB-MLI no difiere del resultado que se obtendría con la técnica LS-PWM común.

REFERENCIAS

Ahmad, A. and Gupta, R. (2013). Digital PWM of cascaded multilevel voltage source inverter using FPGA. *2013 Students Conference on Engineering and Systems (SCES)*, pp. 1-5, Allahabad.

Franquelo, L. G., Rodriguez, J., Leon, J. I., Kouro, S., Portillo, R. and Prats, M. A. M. (2008). The age of multilevel converters arrives. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 28-39.

Hatas, H., Genc, N. and Mamizadeh, A. (2019). FPGA Implementation of SPWM for Cascaded Multilevel Inverter by Using XSG. *2019 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA)*, pp. 1-6, Elazig, Turkey.

Rao, J. V. and Mahesh, A. (2017). Hardware implementation of carrier rotation strategy for Cascaded H-bridge multilevel inverters. *2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, pp. 1578-1583, Greater Noida.

Rodriguez, J., Lai, J.-S. and Peng, F. Z. (2002). Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724-738.

Sarkar, I. and Fernandes, B. G. (2014). Modified hybrid multi-carrier PWM technique for cascaded H-Bridge multilevel inverter. *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 4318-4324, Dallas, TX.

Análisis de Factores de Diseño para Escalamiento Seguro en Potencia de Transmisor Inalámbrico Inductivo.

Luis A. Sotres; Leobardo Hernández;
Jazmín Ramírez; Eduardo Salvador Estévez; Ahmed Miguel Román

Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME Culhuacán, CDMX, México

lasotres@hotmail.com, lhernandezg@ipn.mx, jazzrh@hotmail.com, salvador_esee@hotmail.com, ahmed.roman@hotmail.com.

Resumen: La transmisión inalámbrica de energía no es un tema nuevo, su investigación comenzó en el siglo XIX, casi a la par de grandes descubrimientos sobre la electricidad. Hoy día ya existen diversas propuestas y prototipos para transmisores de energía inalámbrica que utilizan los mismos principios que propuso Nikola Tesla. En este artículo se muestra algunos de los retos del transmisor inalámbrico tipo inductivo mediante una topología denominada buck simétrico, se presentan las propuestas de solución, implementación y resultados de las mismas para lograr un escalamiento de potencia eficiente y seguro. Se realizaron e implementaron dos propuestas que funcionan eficazmente en el transmisor y están listas para ser utilizadas en escalamientos futuros.

Palabras clave: **Transferencia Inalámbrica de Energía, Circuito resonante, Convertidores de Potencia, Sistema de detección de fallos.**

1. INTRODUCCIÓN

La transmisión inalámbrica de energía no es un tema nuevo, su investigación comenzó en el siglo XIX, casi a la par de grandes descubrimientos sobre la electricidad.

El físico André-Marie Ampère, mejor conocido como Ampère, descubrió que las corrientes eléctricas producían un campo magnético, lo que propició que se siguiera investigando el tema y durante las décadas siguientes se descubrió el electromagnetismo.

A finales del siglo XIX se comenzaron los primeros intentos de transmisión inalámbrica de energía, algunos físicos de la época creyeron que en la atmósfera existía una región que podía utilizarse como medio de transmisión, pero finalmente fue falso.

Actualmente la transferencia inalámbrica de energía está 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*).

La diferencia entre estas 3 categorías es que el CPT realiza la transmisión por medio del campo eléctrico, el IPT por medio del campo magnético y el HPT ocupa ambos campos.

El IPT ofrece algunas ventajas, como son: capacidad de transmitir mayor potencia con eficiencia 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, lográndose valores mayores a 10mm.

En este artículo se muestran algunos de los retos del transmisor inalámbrico tipo inductivo mediante topología buck simétrico, se presentan las propuestas de solución, implementación y resultados de las mismas para lograr un escalamiento de potencia eficiente y seguro.

La estructura de este artículo es la siguiente. En la sección 2, se presentan los antecedentes de la transferencia de tipo inductivo, así como detalles del circuito para el cual se realiza este análisis. En la sección 3, se presentan algunos de los retos para realizar el escalamiento de manera segura.

En la sección 4, se muestran algunas de las propuestas posibles para dar solución a los retos anteriormente planteados. En la sección 5, se presenta la implementación de las propuestas mencionadas en la sección 4. En la sección 6, se muestran los resultados obtenidos con las implementaciones realizadas.

En la sección 7, se presenta el trabajo a futuro, y finalmente en la sección 8 se presenta un análisis de los principales resultados obtenidos, así como un análisis de viabilidad de los mismos.

2. ANTECEDENTES

2.1. Transmisores inalámbricos

Nikola Tesla fue el físico que más se dedicó a la investigación de la transmisión inalámbrica de energía, él aseguraba que podía

ISSN en trámite

lograr un sistema global de transmisión y almacenamiento de energía eléctrica sin ocupar cables. Gracias a su trabajo se logró transmitir exitosamente energía eléctrica sin cables utilizando la técnica de acoplamiento inductivo resonante, hoy en día conocida como WPT o transferencia inalámbrica de energía.

El proyecto más grande de Tesla fue un sistema para transmisión de energía utilizando las ondas terrestres, esto mediante una torre transmisora que construyó en Colorado Springs, lamentablemente sus ideas no tuvieron éxito; sin embargo, han influenciado a la comunidad científica para continuar con la investigación hasta la fecha.

Hoy día ya existen muchas propuestas y prototipos para transmisores de energía inalámbrica que utilizan los mismos principios.

El transmisor propuesto del que se habla en este artículo es una topología de nominada buck-simétrico con carga resonante, como se muestra en la Fig. 1., el cual ha sido validado mediante ecuaciones de diseño, simulaciones y resultados obtenidos para potencias menores a 30W reportados en (Cabrera, *et al,* 2018).

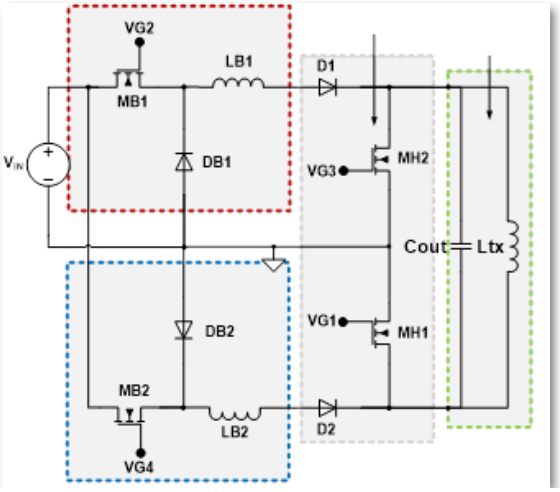


Fig. 1. Transmisor inalámbrico tipo inductivo.

3. RETOS DEL TRANSMISOR BUCK SIMETRICO CON CARGA RESONANTE

3.1. Primer reto de escalamiento en potencia

Uno de los principales retos para realizar el escalamiento en potencia es integrar un adecuado lazo de control que sea capaz de aumentar el ciclo de trabajo, si la carga lo demanda o disminuir el ciclo de trabajo, cuando ya no se presenta una carga acoplada. Esto último es importante ya que, si la retroalimentación no presenta una rápida dinámica de respuesta, los dispositivos semiconductores corren el riesgo de sufrir daños.

3.2. Segundo reto de escalamiento en potencia

Para escalar en potencia hay dos posibles alternativas, aumentar el voltaje de alimentación o aumentar la corriente que fluye por los dispositivos. Esto provoca 2 consecuencias:

1. El estrés por corriente o por voltaje aumenta en los dispositivos, lo cual hace que la vida útil de estos se vea reducida.
2. La temperatura aumenta y causa pérdidas mayores, esto impacta directamente en la eficiencia del transmisor.

En la Fig. 2., se encuentra representado el estrés por corriente que se genera debido a las conmutaciones del convertidor buck y del medio puente en un escalamiento propuesto a 500W con voltaje de alimentación de 300V.

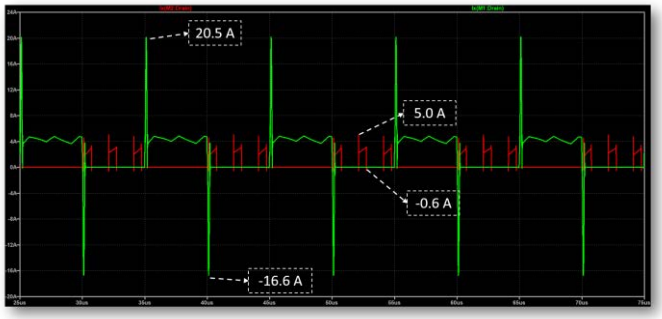


Fig. 2. Esfuerzo en corriente en dispositivos semiconductores, verde (medio puente), rojo (Buck).

En la Fig. 3., se muestra el estrés por voltaje debido a las conmutaciones del convertidor buck en la misma propuesta de escalamiento a 500W con voltaje de alimentación de 300V.

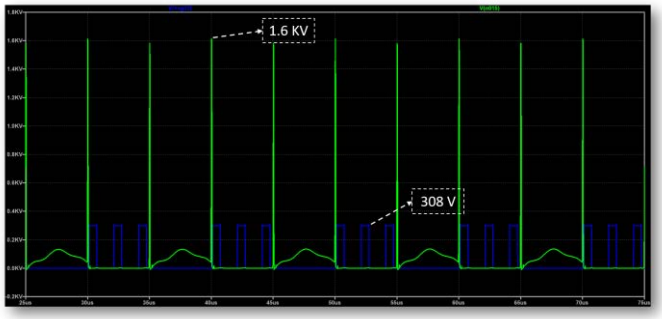
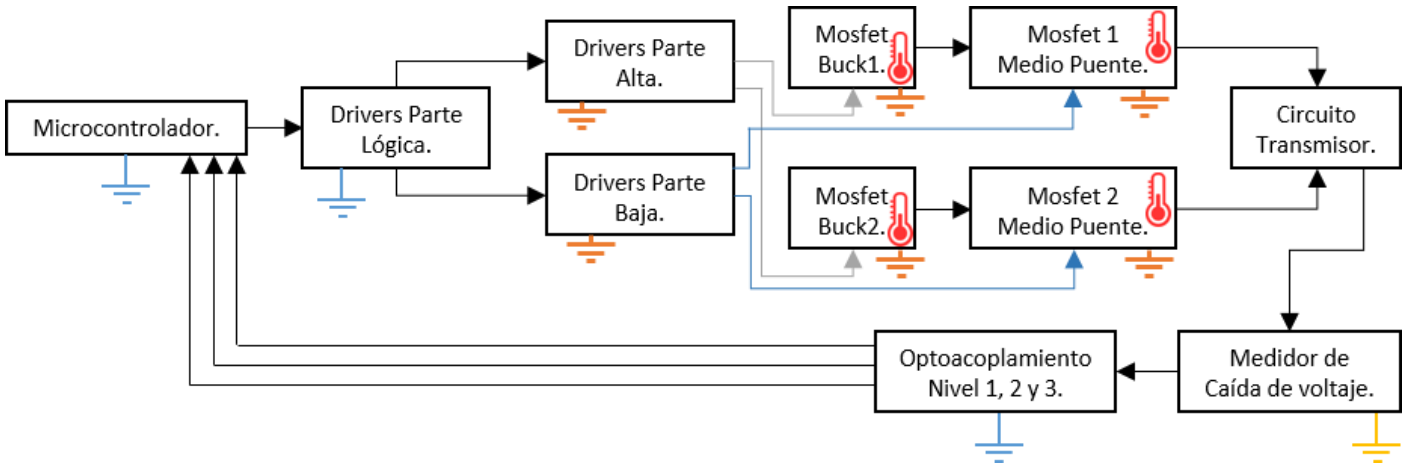


Fig. 3. Esfuerzo en voltaje en dispositivos semiconductores, verde (medio puente), azul (Buck).

 ISSN en trámite

Fig. 4. Diagrama a bloques de transmisor.



3.3. Reto de aislamiento eléctrico

Para evitar interferencias y proporcionar seguridad a todos los bloques por los que está conformado el transmisor se deben de utilizar tres referencias a tierras distintas en el transmisor:

La primera parte aislada es la denominada parte lógica, representada en la Fig. 4., con las tierras color azul; esta comprende el microcontrolador, dispositivos que procesan y generan señales de control, la parte lógica de los drivers para los MOSFETs.

La segunda parte aislada es la denominada parte de potencia, representadas en la Fig. 4., con las tierras color naranja; esta comprende todo el circuito inversor buck-simétrico con carga resonante.

Dado que no se puede tomar una muestra directa de la sinusoide obtenida en el circuito resonante para realizar el lazo de retroalimentación, se presenta un reto de cómo medir indirectamente el sensado de la caída de voltaje en el circuito transmisor.

4. PROPUESTAS PARA POSIBLES SOLUCIONES A LOS RETOS PLANTEADOS.

4.1. Propuesta: Monitor de variables

Para tener un mayor control de la potencia transmitida, se propone el diseño de un monitor de variables. La propuesta consiste en una interface gráfica, donde el usuario puede consultar variables como son: la temperatura, voltajes o corrientes a la que se encuentran operando ciertos dispositivos, pero más importante aún es un método de detección temprana para aumentos repentinos de corrientes, voltajes y/o temperatura, lo cual permitiría bloquear ciertos componentes o el transmisor de forma instantánea.

4.2. Propuesta: Método de control basado en modos de operación, utilizando retroalimentación

Ya que no es posible realizar la lectura directa de la sinusoide debido al aislamiento eléctrico entre bloques, se propone realizar un método indirecto de sensado del voltaje RMS que permitirá realizar un acoplamiento óptico.

5. IMPLEMENTACIÓN DE PROPUESTAS DE SOLUCIÓN.

5.1. Implementación Monitor de variables

Utilizando el puerto serie del microcontrolador, es posible realizar la comunicación entre transmisor y computadora a través de una interface gráfica que sea capaz de interpretar los valores transmitidos, en la Fig. 5., se muestran datos obtenidos en el monitor de variables.

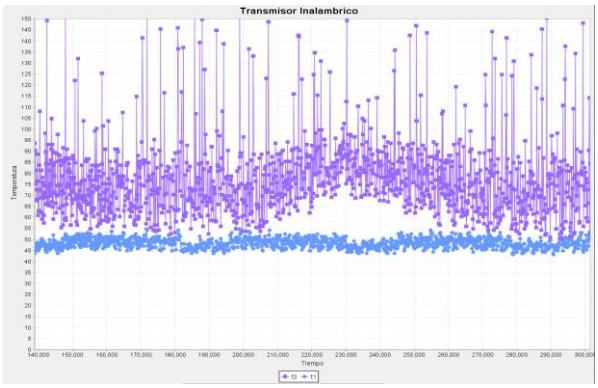


Fig. 5. Monitor de variables, lectura en línea de valores.

Para poder interpretar la lectura de los sensores y que esta sea información de utilidad, es necesario realizar un promedio de los valores obtenidos, para este caso se utilizan los 20 valores últimos para realizar el promedio como se muestra en la Fig. 6.

 ISSN en trámite

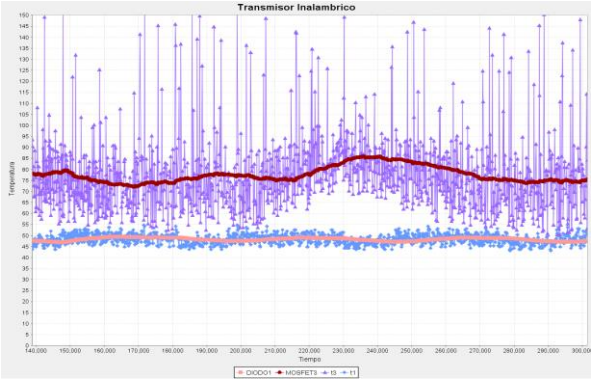


Fig. 6. Monitor de variables, valores promediados.

5.2. Implementación de método de control basado en modos de operación, utilizando retroalimentación

Para realizar la medición indirecta de voltaje RMS, se realiza un tratamiento a la señal sinusoide mediante el circuito representado en la Fig. 7:

1. Mediante diodos Schottky se realiza la rectificación de la señal.
2. Se utiliza un capacitor de filtrado para obtener un voltaje de corriente directa con mínimo ruido, lo que evita falsas lecturas.
3. Un amplificador operacional configurado en modo comparador es utilizado para verificar que el voltaje RMS de la sinusoide este en el valor deseado.
4. Para enviar la información al microcontrolador de forma segura, se utiliza un dispositivo optoacoplador.

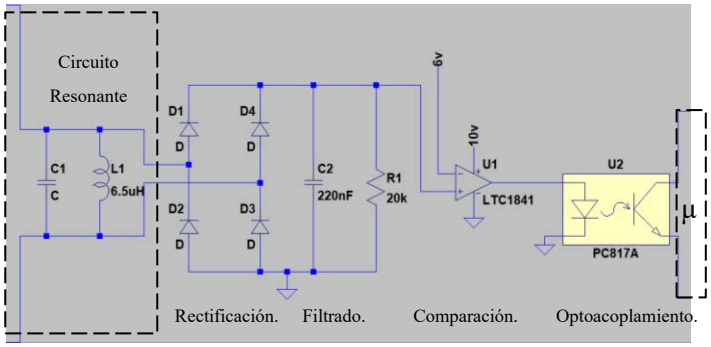


Fig. 7. Circuito propuesto para medición indirecta de voltaje RMS.

Para realizar la implementación anterior, es necesario tener en consideración que la impedancia de entrada de este circuito debe ser alta para evitar causar distorsión en la sinusoide del circuito resonante, sin embargo, es importante agregar R1 para controlar el voltaje de rizo a la salida del esquema rectificador.

6. RESULTADOS.

En la Fig. 8., se encuentra representada la temperatura de uno de los MOSFETs del inversor del transmisor y de uno de los diodos del convertidor buck.

Para realizar la lectura representada en la Fig. 8., fue utilizado un circuito receptor que presentaba como carga un moto-reductor, el cual se le puso a girar libremente sin peso durante un tiempo y posteriormente se le aplicó peso, la prueba anterior hizo que el motor demandara más potencia, después de un tiempo se liberó nuevamente.

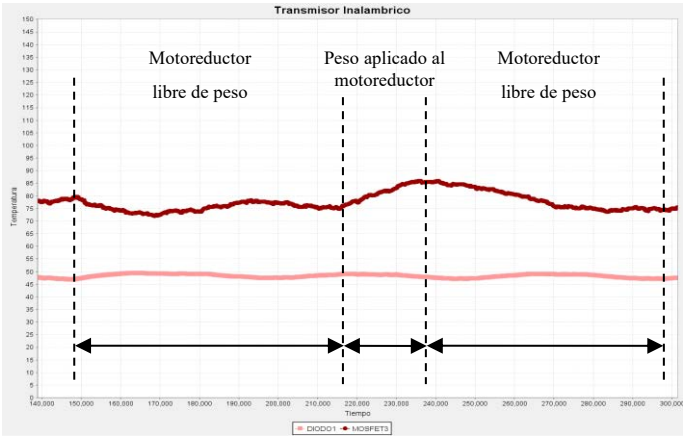


Fig. 8. Monitor de variables, análisis de comportamiento.

Utilizando las gráficas obtenidas es posible interpretar en que parte se le aplicó peso al moto-reductor, esto debido a que, al aplicarle peso, este requiere más potencia para mantener las revoluciones y esto a su vez causó que el transmisor enviara más potencia lo cual se vio reflejado en un aumento de temperatura en el medio puente.

Se comprobó el funcionamiento de la lectura indirecta de voltaje RMS experimentalmente, en la Fig. 9., se aprecia la señal obtenida a la entrada no inversora del amplificador operacional y en la Fig. 10., se aprecia la señal obtenida en el optoacoplador a lo largo de 6 segundos.

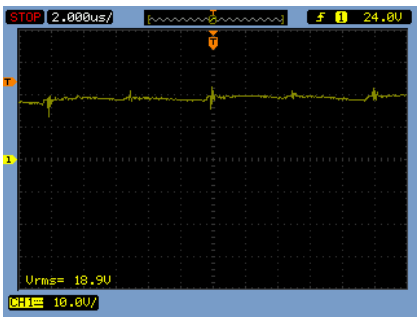


Fig. 9. Voltaje rectificado y filtrado.

 ISSN en trámite

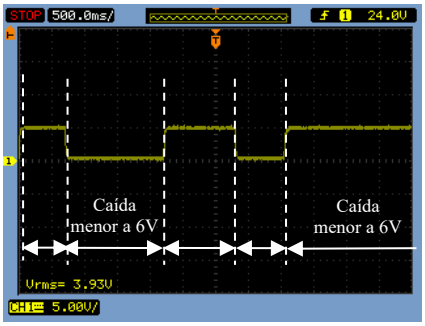


Fig. 10. Señal en el optoacoplador.

7. TRABAJO FUTURO

El monitor de variables puede incrementar su funcionalidad con infinidad de aplicaciones, como lo pueden ser la implementación en sistemas de tiempo real, interconexión con sistemas de enfriamiento, internet de las cosas, entre otras.

Para mejorar la resolución de control de potencia, se propone el circuito de la Fig. 11.

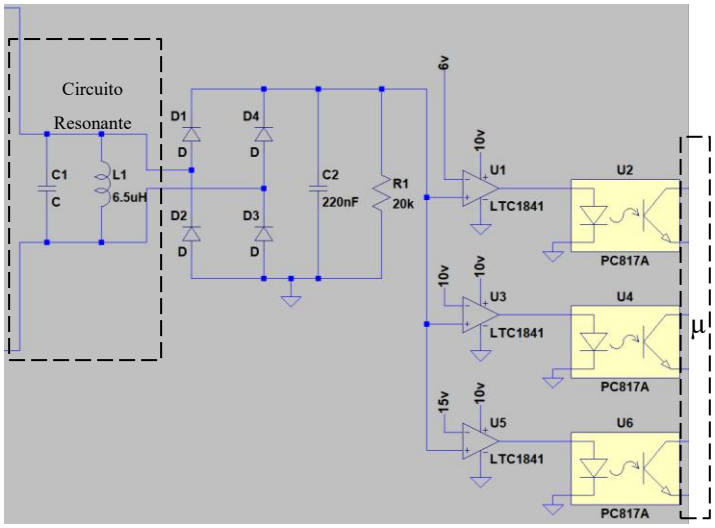


Fig. 11. Propuesta de mejora de circuito para medición indirecta de voltaje RMS.

Con esta mejora se puede realizar un perfeccionamiento en el controlador, aumentando el número de modos de operación de acuerdo a las ramas.

8. CONCLUSIONES

Se plantearon de 3 factores a tomar en cuenta para poder realizar el escalamiento en potencia seguro para el transmisor inalámbrico buck simétrico. Se plantearon 2 propuestas de solución, las cuales se implementaron. La primera propuesta consistió en hacer un monitor de variables para la continua observación de valores críticos de temperatura, de este modo cuando uno de estos valores salga del valor máximo nominal asignado al dispositivo, este puede entrar en una etapa de bloqueo para evitar su destrucción. La segunda, propuesta que se implementó es la medición indirecta de voltaje RMS en la sinusoide obtenida en el circuito resonante, esto para poder llevar a cabo un lazo de control más robusto a cambios rápidos de acoplamiento.

Finalmente, las dos propuestas funcionan eficazmente en el transmisor y están listas para ser utilizadas en escalamientos de potencia como trabajo a futuro.

REFERENCIAS

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.

Lu Fei, 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.

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.

 ISSN en trámite

Convertidor de baja potencia para cosecha de energía

Jorge A. Rendón Silva *. Víctor H. Olivares Peregrino*. Carlos Aguilar Castillo* Miguel Ángel Basurto Pensado**

**Tecnológico Nacional de México-CENIDET, Internado Palmira S/N, Col. Palmira, CP 62490 Cuernavaca, Morelos, México.*
***Universidad Autónoma del Estado de Morelos-CIICAp, Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa CP 62209 Cuernavaca, Morelos, México*
e-mail: jorge.rendon18ee@cenidet.edu.mx
e-mail: victor.op@cenidet.tecnm.mx
e-mail: carlos.ac@cenidet.tecnm.mx
e-mail: mbasurto@uaem.mx

Resumen: Este trabajo presenta una descripción de un convertidor de baja potencia. Se discute una breve descripción de sus principios de operación, la aplicación típica y las perspectivas futuras para la cosecha de energía y el impulso de la baja potencia para el desarrollo tecnológico. En un futuro se espera que se centre la integración de técnicas de recolección de energía, como respaldo a la producción de energía convencional, integrando fuentes de energía alternativas.
La topología propuesta está basada en un convertido *Boost*, para una potencia de 1W, con un voltaje de entrada en un rango de 4V a 8V se tiene una salida constante de 12V, operando en lazo cerrado, así como una alta eficiencia y estructura simplificada que la hace muy competitiva para este tipo de aplicaciones.

Palabras clave: Convertidor *Boost*, Convertidor baja potencia, Cosecha de energía, Cámara térmica

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se investiga el aprovechamiento de los recursos energéticos (Perez & M., 2011), la tarea de la electrónica de potencia es procesar y controlar el flujo de energía eléctrica mediante el abastecimiento de voltajes y corrientes en una forma óptima para las cargas del usuario ver Fig. 1.

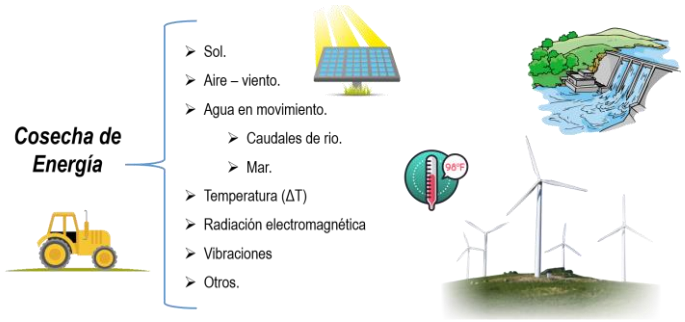


Fig. 1 Cosecha de energía (Bhattacharyya, 2012).

Los recolectores de energía proporcionan una muy pequeña cantidad de energía para la electrónica de bajo consumo, la fuente de energía está presente como fondo ambiental y es gratis. Por ejemplo, en las zonas urbanas, hay una gran cantidad de energía cinética en el medio ambiente debido al movimiento de los transeúntes (Bhattacharyya, 2012).

El concepto de cosecha de energía, surge como una alternativa innovadora e ingeniosa para el desarrollo de convertidores CD/CD, en algunos procesos de baja potencia, donde surgen diferentes métodos de recolección para la implementación de nuevas fuentes de energía sustentables; el principal problema; es en la generación, debido a su total dependencia a las condiciones ambientales.

1.1 Convertidores CD/CD

En muchos sistemas en necesario la conversión de una fuente de CD a otro valor de CD de pendiendo de las características que se requieren durante el proceso, ejemplos en la Fig. 2.

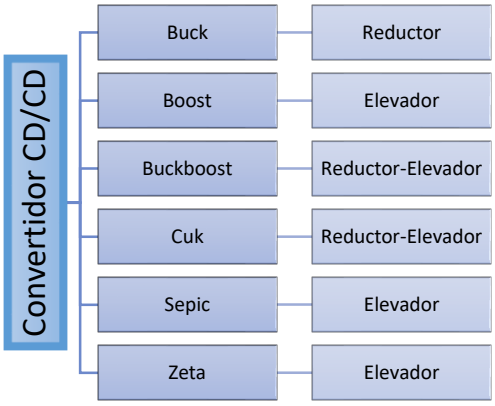


Fig. 2 Convertidores CD/CD.

En el siguiente documento se plantea lo necesario para diseñar e implementar un convertidor elevador tipo *Boost* con el CI LMR62014, considerando un V_{in}=8V, V_o=12V, P=1W, como sistema compacto de gestión de energía para transformar la tensión cosechada en salida una tensión continua.

 ISSN en trámite

2. CONVERTIDOR BOOST

Es un convertidor de CD/CD tipo elevador, que obtiene una tensión mayor a la de entrada, requiere de al menos dos interruptores de estado sólido y un diodo, y por lo menos un elemento de almacenamiento de energía.

Para la aplicación se opta por el CI LMR62014 (ver Fig. 3), es un switch regulador modo corriente que opera a una frecuencia fija de 1.6MHz, para transitorios rápidos (Instruments, 2013).

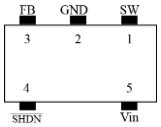


Fig. 3 LMR62014 EMPAQUETADO SOT 23 (Instruments, 2013).

Un método para controlar el voltaje de salida emplea la conmutación con una frecuencia constante, y el ajuste de la duración de encendido del interruptor para controlar el voltaje medio de salida. En este método, llamado conmutación por modulación de anchura de pulsos *(Pulse-Width Modulation, PWM)*, la relación de trabajo del interruptor D, que se define como la proporción de la duración de encendido con el periodo de conmutación.

El control de modo actual, se utiliza una resistencia de detección de 33 mΩ en serie con el interruptor *FET* para proporcionar un voltaje la entrada del comparador del *PWM* como muestra el diagrama de la Fig. 4.

La entrada del comparador de *PWM*, El amplificador de límite de corriente. Al comienzo de cada ciclo, se enciende el *FET*. A medida que aumenta la corriente a través del *FET*, un el voltaje se suma con la rampa que viene del generador de rampa y luego se alimenta a la entrada del comparador *PWM*. Cuando este voltaje excede el voltaje en la otra entrada del amplificador, se reinicia y apaga el *FET*. Dado que la señal proveniente del amplificador *Gm* se deriva a partir de la retroalimentación, la acción del comparador *PWM* establece constantemente la corriente pico correcta a través del *FET* para mantener la tensión de salida en regulación.

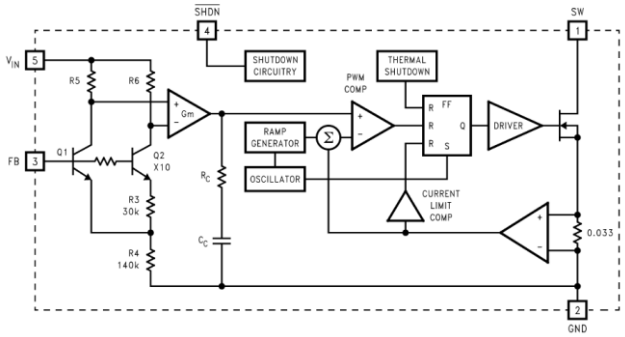


Fig. 4 Diagrama a bloques LMR62014 (Instruments, 2013).

Para la implementación se consideraron las recomendaciones del fabricante, utilizando componentes SMD (Surface Mounting Device) con el diagrama de la Fig. 5.

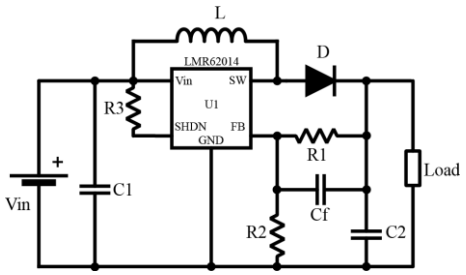


Fig. 5 LMR62014 (Instruments, 2013).

Capacitores de cerámica multicapa, debido a la ESR (Equivalent Series Resistance) baja y a la frecuencia de operación da valores de orden de micros.

Para el capacitor de salida de valor 4.7µF a 10µF.
Para el capacitor de entrada sirve para asegurar el voltaje de entrada, se requiere un ESR bajo cerámico es la mejor opción, se recomienda un valor nominal 2.2µF.

Para el lazo de control se requiere de una retroalimentación con R_1 y R_2, para tener una tensión de salida constante. Al comienzo de cada ciclo se realiza la comparación con *FB* (Feedback) para regular la salida de *SW* (switch *FET*) modifique el *PWM*.

Para el cálculo de R_1:
Se requiere de una salida de 12V, se calcula a partir del valor de R_2, y se aproxima al valor comercial más cercano.

$$R_1 = \mathrm{R}_2\left(\frac{V_o}{1.23}-1\right). \qquad (1)$$

$$\mathrm{R}_1 = 13.3k\Omega\left(\frac{12V}{1.23}-1\right) = 116.46k\Omega \approx 117k\Omega$$

Aunque está compensado internamente, el capacitor Cf es necesario para la estabilidad Agregar este capacitor pone un cero en la respuesta de transitoria del convertidor. La frecuencia recomendada para el cero fz debería ser de aproximadamente 6kHz. Cf se puede calcular usando la fórmula:

$$\mathrm{Cf} = \frac{1}{2\pi R_1 \mathrm{fz}} \qquad (2)$$

$$\mathrm{Cf} = \frac{1}{2\pi\left(117k\Omega\right)\left(6kHz\right)} = 226.71pF \approx 220pF$$

EL valor de Cf se aproxima a un valor comercial.

Al seleccionar un inductor, se asegura de que la corriente continua sea lo suficientemente alta como para evitar la saturación en las corrientes máximas. Se debe usar un tipo de núcleo adecuado para minimizar las pérdidas del núcleo, y las pérdidas de potencia del cable deben tenerse en cuenta al seleccionarlo.

ISSN en trámite

El diodo externo utilizado en la aplicación típica debe ser un diodo Schottky. El diodo debe estar clasificado para manejar el voltaje de salida máximo y la corriente de carga, se recomienda un diodo de 20V como el MBR0520.

Tabla 1 Componentes Duplicador de onda completa.

Componente	Descripción	Valor/Modelo
L	Inductor	10µH
Cf	Capacitor de compensación	220pF
D	Diodo	MBR05220
R_1	Resistencia	117kΩ
R_2		13.3kΩ
R_3		47kΩ
C_1	Capacitor	2.2µF
C_2		4.7µF

3. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.

Se realiza el diseño del PCB en Altium se muestra en la Fig. 6

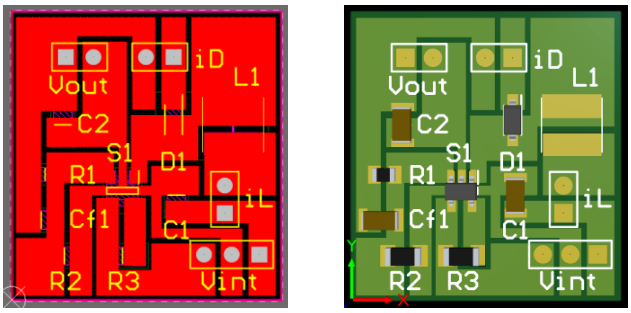


Fig. 6 PCB convertidor Boost

Debido al rango de frecuencia de operación se toman en cuenta las siguientes consideraciones: L1, D1 y C2 lo más pegado posible entre sí, además R1, R2 y Cf quedan cercano a *FB* para evitar ruidos por conmutación.

4. PRUEBAS DEL PROTOTIPO

Las pruebas de laboratorio son realizadas con una fuente de voltaje a V_{in}=8, como carga de 144Ω.

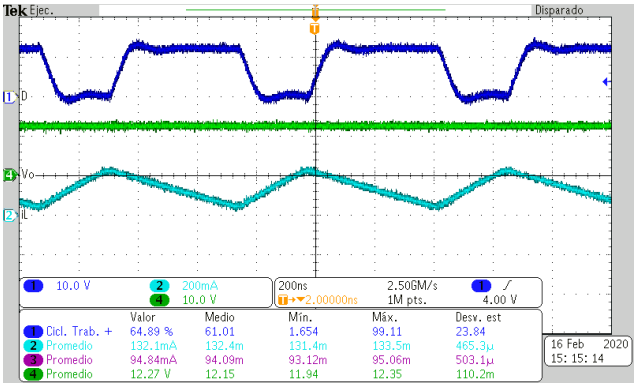


Fig. 7 Ciclo de trabajo (azul), Voltaje de salida (verde), Corriente del inductor (azul cielo).

El ciclo de trabajo 64% a una frecuencia de 1.6MHz, el voltaje de salida de 12.27V, corriente del inductor de 132.1mA.

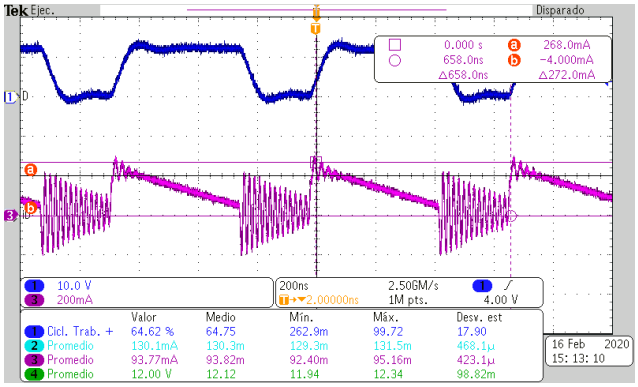


Fig. 8 Ciclo de trabajo (azul), Corriente del diodo (morada), la corriente del diodo es de 93.77mA, con un rizo de 272mA.

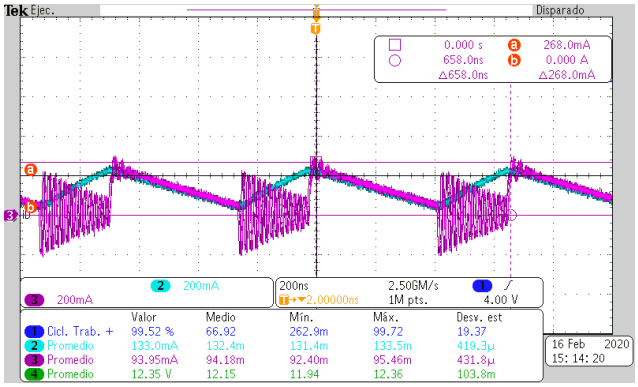


Fig. 9 Corriente del inductor (azul cielo), Corriente del diodo (morado).

Al empalmar la corriente del diodo e inductor se pueden apreciar los dos estados de operación a partir de la conmutación interna del circuito.

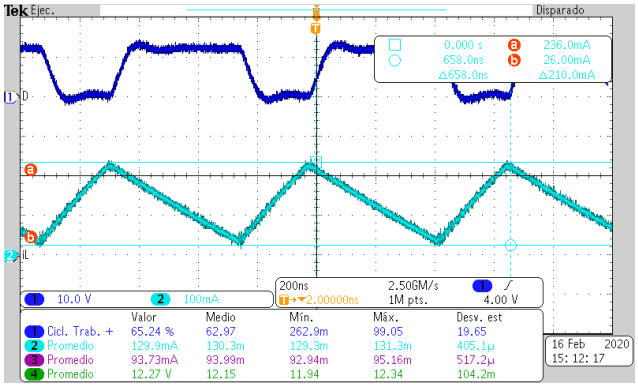


Fig. 10 Ciclo de trabajo (azul), Corriente del inductor (azul cielo), con una corriente de rizo en el inductor de 210mA.

 ISSN en trámite

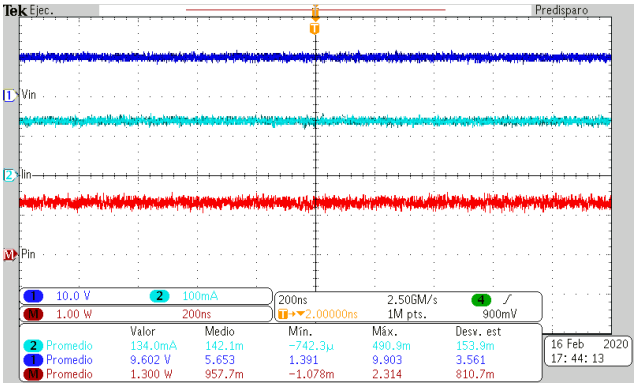


Fig. 11 Voltaje de entrada (azul), Corriente de entrada (azul cielo), Potencia de entrada (roja).

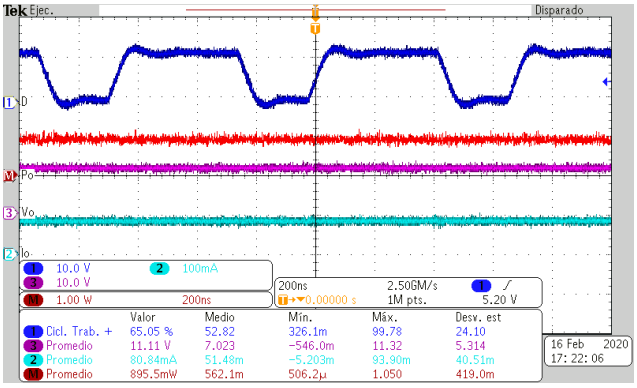


Fig. 12 Voltaje de salida (morado), Corriente de salida (azul cielo), Potencia de salida (roja), Ciclo de trabajo (azul).

Para obtener la eficiencia del convertidor con la ecuación 3.

$$Eficiencia = \frac{Po}{Pin}(100\%)$$
$$Eficiencia = \frac{V_o I_o}{V_{in} I_{in}}(100\%) \quad (3)$$
$$Eficiencia = \frac{(12V)(0.08A)}{(8V)(0.137A)}(100\%) = 87.59\%$$

El convertidor obtiene una eficiencia del 87.59%

Tabla 2 Eficiencia convertidor Boost a un 1W.

V_{in}	I_{in}	V_o	I_o	D	Eficiencia
8V	0.137A	12V	0.08A	65%	87.59%
7V	0.156A	12V	0.08A	57%	87.91%
6V	0.182	12V	0.08A	49%	87.91%
5V	0.222A	12V	0.079A	40%	85.91%
4V	0.297	12V	0.079A	31%	79.81%

En el rango de entrada de 4V a 8V, sigue manteniendo una salida de 12V, el ciclo de trabajo se va modificando debido a lazo de control, la eficiencia ve en decremento debido a los cambios de corriente que se van presentando.
Para poner a prueba el convertidor con el lazo de control se realiza un cambio de carga para 2W, 1.5W, 1W, y 0.5W.

Se modifica la carga para cada uno de los caso y se varia el voltaje de entrada para observar su comportamiento.

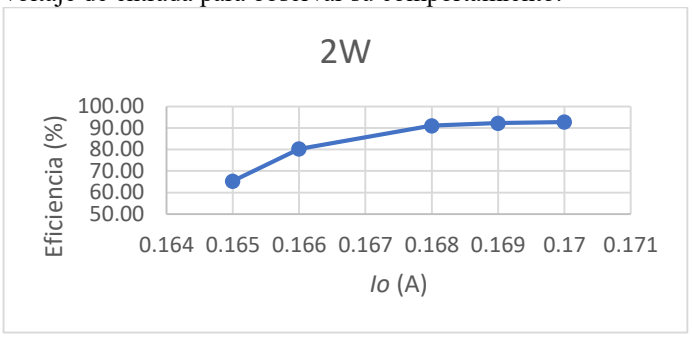


Fig. 13 Eficiencia contra corriente de salida a 2W variando voltaje de 8V a 4V.

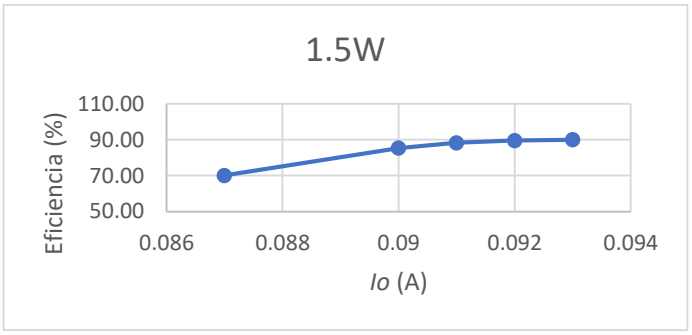


Fig. 14 Eficiencia contra corriente de salida a 1.5W variando voltaje de 8V a 4V.

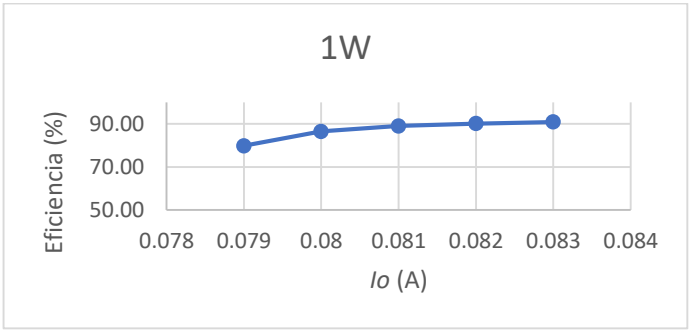


Fig. 15 Eficiencia contra corriente de salida a 1W variando voltaje de 8V a 4V.

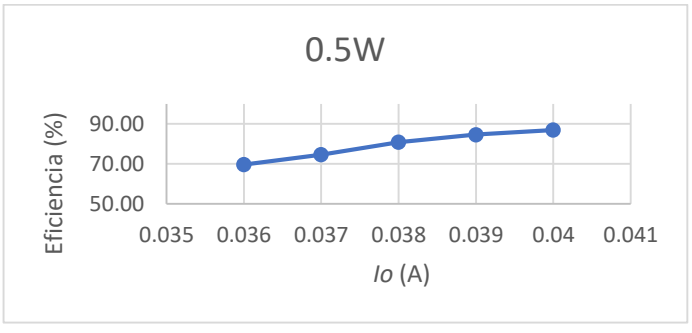


Fig. 16 Eficiencia contra corriente de salida a 0.5W variando voltaje de 8V a 4V.

 ISSN en trámite

En un rango de operación de 4V a 8V como entrada se mantiene con 12V a la salida.

5. PRUEBAS TÉRMICAS

Uno de los problemas que se presentan en convertidores, es la disipación de potencia por temperatura. Con ayuda de una cámara térmica FLIR E40, se realiza la medición de temperatura de placa en funcionamiento a las diferentes potencias sometidas. Las temperaturas más altas del circuito se presentan en el inductor, diodo y conmutador ver Fig. 17.

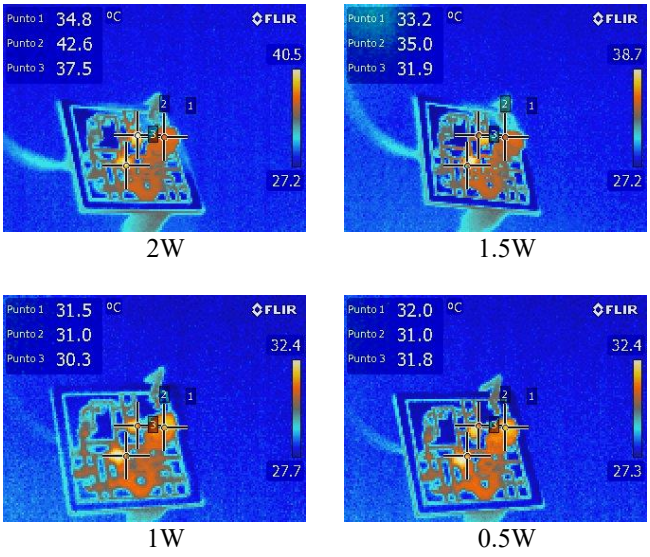


Fig. 17 Medición de temperatura Punto 1 Inductor, Punto 2 MBR0520, Punto 3 LMR62014.

Tabla 3 Temperaturas del PCB.

Potencia	Punto 1 Inductor	Punto 2 Diodo	Punto 3 LMR62014
2W	34.8°	42.6°	37.5°
1.5W	33.2°	35°	31.9°
1W	31.5°	31°	30.3°
0.5W	32.°	31°	31.8°

En la tabla 3, podemos observar los cambios de temperatura en el inductor, diodo y conmutador en cada cambio de potencia. El de menor temperatura es a la potencia de 1W, esto se debe a que a esas condiciones fue diseñado el convertidor, a las diferentes potencias el circuito es capaz de operar y obtener a la salida lo 12V que se requieren, pero se nota el mayor esfuerzo de los componentes al presentar este cambio de temperatura.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este artículo se presenta la validación de un convertidor *Boost* en lazo cerrado con el CI LMR62014, mediante diferentes niveles de carga a baja potencia, este sistema es capaz de ser implementado para cosecha de energía a bajos niveles de tensión.

La topología se basa en un circuito simplificado que incluye un lazo de control, el cuál es capaz de responder a los cabios de carga y los cambios de voltaje de entrada, obteniendo eficiencias ente el 79% y 92%, con estas características el circuito se puede someter a diferentes condiciones Se muestra también que el uso de interruptores regulados para la reconfiguración del circuito de potencia, es una opción para lograr una mayor flexibilidad en el funcionamiento y capacidades del circuito.

De igual forma se presenta un análisis de la respuesta térmica con el incremento de la carga esto para los principales elementos del sistema como son: el inductor, el diodo y el interruptor, para este análisis ante las bajas dimensiones del circuito se utilizó una cámara térmica fue una buena opción para observar dicho comportamiento.

Por otra parte, sería interesante la implementación para una potencia más cercana a la requerida en esquemas de generación de cosecha de energía a pequeña escala como complemento a las fuentes de energía convencionales, además de la implementación con torniquetes en puntos de acceso con gran flujo de personas, esto con la finalidad de validar las condiciones de trabajo reales que se pueden presentar y que no se pueden considerar cuando se hacen extrapolaciones.

Adicionalmente la implementación y análisis del impacto en la eficiencia del sistema con la incorporación de una batería como elemento de almacenamiento de energía, resulta digno de realizarse en el futuro.

REFERENCIAS

Pérez R. and M. Pérez (2011). *Revista Energías Renovables, Reportaje: una mirada fundamental a las reservas de energía del planeta.*

S. C. Bhattacharyya (2012) Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 1. pp. 677–694.

G. S. Alemán-Nava, V. H. Casiano-Flores, D. L. Cárdenas-Chávez, R. Díaz-Chavez, N. Scarlat, and J. Mahlknecht,(2014) "*Renewable energy research progress in Mexico: A review,*" vol. 32, pp. 140–153.

J.L. Wardlaw, (2013) *"Self- Powered Rectifier for Energy Harvesting Applications"* IEEE journal on emerging and selected topics in circuits and systems, vol. 1, no. 3.

Taichi Ogawa, Takeshi Ueno, Takayuki Miyazaki, Testsuro Itakura, (2016) 20mV Input, 4.2V Ouput Boost Converter with Methology of Maximunm Output Power for Thermoelectric Energy Haversting IEEE journal pp 1907-1910.

Instruments, T, 2013. *LMR62014 SIMPLE SWITCHER® 20Vout, 1.4A Step-Up Voltage Regulator in SOT-23,* Dallas: Texas Instruments.

Análisis numérico de un sistema de seguridad con el uso de elastómeros

Ulises Jaen*. Dariusz Szwedowicz*. Miguel Domínguez*. Eladio Martínez*. Julio C. Vergara*. Angelo Garibaldi**

*Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Int. Palmira S/N, C.P. 62490 Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos.
** CETYS Universidad Campus Tijuana, Calz Cetys 813, C.P. 22210, Lago Sur, Tijuana, Baja California
e-mail. ulises.jaen19me@cenidet.edu.mx, d.sz@cenidet.edu.mx, migueldominguez16m@cenidet.edu.mx, mare@cenidet.edu.mx, julio.vergara17ma@cenidet.edu.mx, Angelo.garibaldi@cetys.mx

Resumen: En el siguiente trabajo se presenta el análisis de un dispositivo de disipación de energía de forma pasiva, empleando elementos elastoméricos bajo cargas de compresión, para evitar lesiones por caídas. Se desarrolló el modelo discreto utilizando el software de elemento finito Abaqus/Explicit. Se presenta el análisis de diferentes longitudes del elemento cilíndrico, siendo la longitud de 35 mm la que presenta una mejor disipación de energía, con 0.64 J. Con ello se propone un arreglo, con el cual se aumenta la disipación de energía para trabajos en alturas no mayores a 1.8 metros.

Keywords: Trabajo en alturas, Elemento Finito, Elastómeros.

1.- INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción, requiere realizar trabajos en alturas; la norma NOM-009-STPS-2011 establece que: cualquier actividad realizada a una altura mayor de 1.8 metros del nivel de referencia, es considerada trabajo en altura. En estos trabajos se realizan una gran variedad de operaciones distintas, cada una de estas operaciones está expuesta a ciertos riesgos concretos, sin embargo, el riesgo principal en este tipo de trabajos son las caídas.

Para la prevención de accidentes relacionados con la caída de los trabajadores existe un conjunto de elementos de seguridad llamado la *línea de la vida,* como se muestra en la figura 1, el cual consiste en un sistema anti caídas temporal o fijo; de forma fija se encuentra siempre en la estructura del edificio o lugar a trabajar mientras que de manera temporal solo se monta a la estructura donde se realiza la actividad cuando es requerido, donde el trabajador es sujetado mediante arneses y líneas de anclajes para evitar su caída.

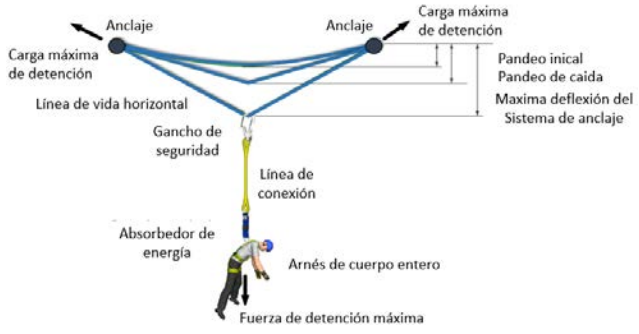


Figura 1.- Sistema de seguridad anti-caídas (Miang, 2015)

Los disipadores de energía son diseñados de manera que absorban la energía cinética generada por una caída accidental. Existen disipadores de cuerdas elásticas cubiertos de plásticos resistentes, también mediante deformación plástica de tubos de acero (Bedolla, et al 2017), sin embargo, los estudios se limitan a la disipación en la línea de conexión.

Debido a que la NOM-009-STPS-2011 solo contempla la protección de los trabajadores en alturas superiores a los 1.8 metros, es necesario la implementación de un sistema que actúe como protección en caso de accidentes en alturas menores a lo que designa la norma. Sin embargo, las locaciones de trabajo no siempre facilitan la instalación de *líneas de vida*, por lo que es necesario implementar un sistema de seguridad alterno que se pueda utilizar sin requerimientos especiales.

Existen diferentes tipos de colchonetas de seguridad, por ejemplo, para gimnasia las cuales son diseñados para proteger a los atletas en caso de caídas, estas colchonetas están fabricadas bajo normativas como la norma europea UNE-EN 12503-1:2013, donde se detalla a profundidad las características físicas y mecánicas a las que debe responder la colchoneta (B2Sport, 2020). Otro tipo de colchonetas son usadas para proteger a las personas enfermas de la caída contra el suelo mientras éstas duermen si bien no evitan las heridas provocadas por la caída si las reducen en medida de lo posible(ARABA, 2020). Otra medida de seguridad usada por los elementos de recate son los colchones inflables, los cuales son diseñados para la caída de una persona a alturas mayores a 4 pisos, estos están compuestos por un compartimiento superior con un colchón de aire y ventiladores especiales, el tamaño que presentan estos colchones depende de la altura de la caída con rangos de 4 a 20 pisos de altura según el fabricante.(IMPROFOR, 2019).

Lo anterior permite emplear un sistema de protección con la finalidad de disminuir las lesiones por caída a personas en condiciones donde las líneas de vida no puedan ser instaladas, éstas caídas pueden causar heridas, fracturas (extremidades, columna, pelvis: caída sobre extremidades inferiores), graves

lesiones de la cabeza y en órganos internos por consecuencia de un frenado brusco, y en consecuencia insuficiencia respiratoria, pérdida de sangre y shock.

En este artículo se presenta la aplicación de un disipador de energía utilizando un cilindro fabricado de elastómero, como tapete de seguridad. La disipación de energía ocurre cuando se impacta en el eje provocando desplazamiento, lo que genera fricción entre las paredes del cilindro y la carcasa, tal como se muestra en la Figura 2. Empleando la fricción seca como mecanismo de disipación de energía, el disipador se aplicará para reducir las lesiones generadas por caídas de alturas menores a 1.8 metros.

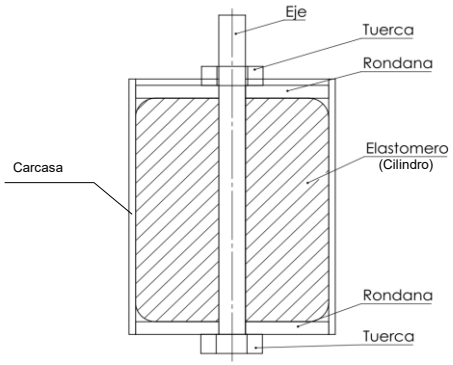


Figura 2.- Disipador de energía con cilindro elastomerico.

2.- CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.

El cilindro está constituido por un elemento elastomérico de Silicón, el cual es utilizado como elemento friccionante, las propiedades del material se obtuvieron a partir del trabajo desarrollado por Mesa (2012), donde obtuvo los coeficientes del Silicón mediante pruebas cuasiestáticas a compresión, en las cuales utilizó una probeta cilíndrica de 80mm de diámetro y 70 mm de longitud como se muestra en la figura 3. La prueba experimental se realizó a una velocidad de 0.248 mm/s y a un desplazamiento máximo de 10 mm, los coeficientes de material se obtuvieron de manera analítica donde los resultados se muestran en la Tabla 1, los cuales fueron corroborados por los resultados cuasiestáticos.

Tabla 1.- Coeficientes de modelo constitutivo (Mesa, 2012)

Modelo constitutivo	*C10 (Pa)*	*C20 (Pa)*
Polinomial de 2do orden	*1420.662*	*598.436*

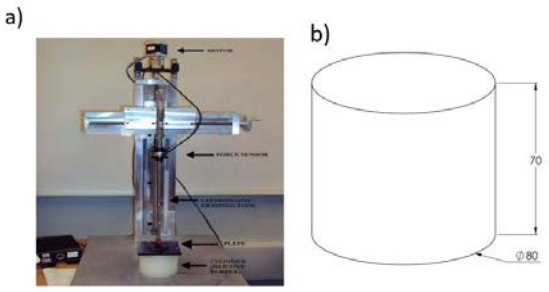


Figura 3.- Pruebas experimental de compresión donde: a) Máquina universal, b) Dimensiones de la probeta.(Mesa, 2012)

En la figura 4 se muestra el comportamiento del silicón mediante modelo numérico, realizado a partir de los coeficientes de la tabla 1.

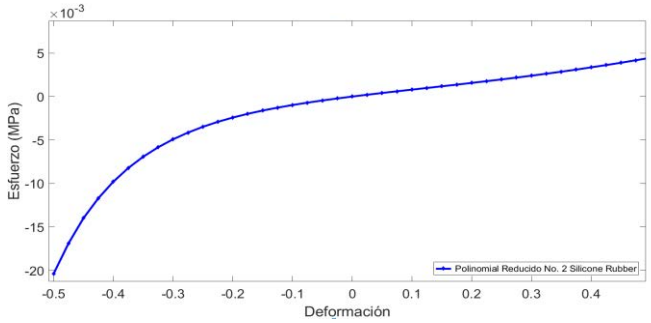


Figura 4 Comportamiento del Silicón

3.- VALIDACIÓN DE MODELO DISCRETO.

Se realizó un modelo discreto utilizando el software Abaqus/Explicit el cual se validó con los resultados obtenidos por Mesa (2012). Lo anterior permitirá una certeza en los valores obtenidos de manera numérica, la descripción del modelo se presenta a continuación.

El modelo discreto se muestra en la figura 5, el cual se realizó de forma axisimétrica, considerando el elemento elastomérico como material deformable utilizando elementos CAX4R, mientras que los platos de precarga se consideraron como componentes discretamente rígidos, utilizando elementos RAX2. Se utilizó un coeficiente de fricción de $\mu = 0.7$, además de un tamaño de malla de 2mm. (Mesa, 2012)

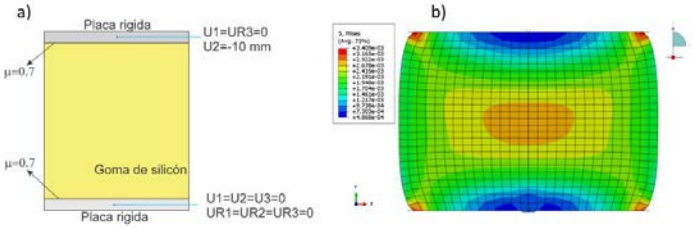


Figura 5.- Modelo discreto, donde: a) Condiciones de frontera, b) Resultados obtenidos

En la figura 5 b) se observa la distribución de esfuerzos en el cilindro elastomérico obtenidos de forma numérica a causa de la compresión aplicada, donde se presenta una mayor concentración de esfuerzos en las esquinas del elemento.

En la figura 6 se presenta la comparación entre los resultados obtenidos de manera numérica y experimental reportados por Meza (2012), así como los resultados obtenidos tras replicar los modelos con el uso de los coeficientes reportados.

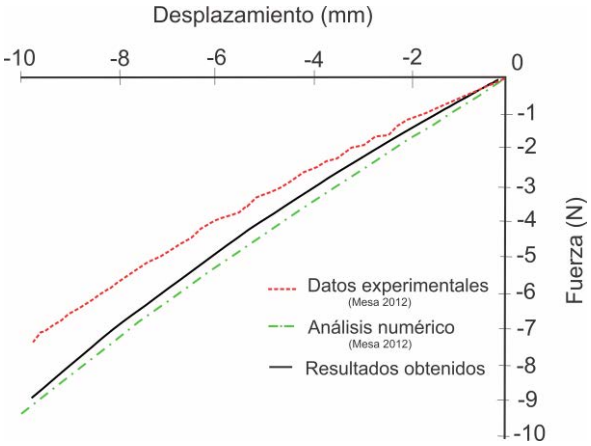


Figura 6.- Gráfica comparativa entre los modelos discretos

La comparación de los resultados obtenidos de manera numérica por Mesa (2012) y los obtenidos del modelo replicado presentan un 5% de diferencia considerando la fuerza de compresión, lo cual corrobora la validación del modelo discreto, lo anterior permite continuar con el análisis paramétrico.

4.- ANÁLISIS PARAMÉTRICO

El análisis paramétrico considera el comportamiento dinámico del elemento para la disipación de energía. El cual consiste en la variación de la longitud del elemento cilíndrico. En la Tabla 2 se muestra la variación de la longitud del cilindro. Además, se considera una precarga, la cual es expresada como un desplazamiento constante en todas las probetas.

Tabla 2.- Variación paramétrica

	Probeta 1	**Probeta 2**	**Probeta 3**	**Probeta 4**	**Probeta 5**
Longitud de cilindro (mm)	30	35	40	45	50
Precarga (mm)	8	8	8	8	8

Para la realización del análisis paramétrico se desarrolló un modelo discreto el cual consta de 4 elementos, 3 de ellos se consideraron como discretamente rígidos (carcasa y elementos de precarga), mientras que el cilindro se considera como elemento deformable con las propiedades mecánicas mostradas en la Tabla 1 y una densidad de 2300 kg/m^3 (Wang, 2013). El modelado se realizó de forma axisimétrica. Se considera un claro de 2.5 mm entre el cilindro y carcasa, con la finalidad de permitir la deformación en el elastómero.

En la figura 7 a) se muestra el estado inicial de la probeta donde (L) es la variación de la longitud, en la figura 7 b) se muestra el estado de deformación provocada por la precarga.

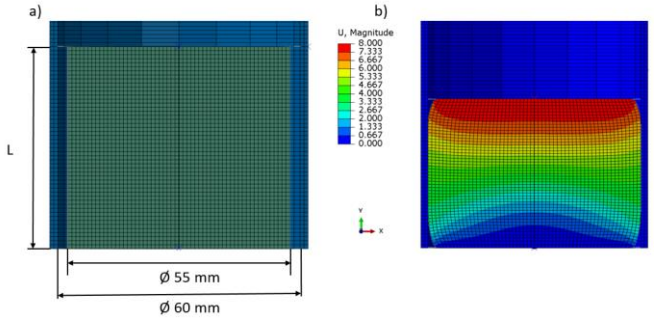


Figura 7.- Estado inicial y final de precarga donde: a) Estado inicial, b) Estado de deformación provocado por la precarga.

Los resultados de la variación de la longitud del elemento cilíndrico se presentan en la curva fuerza normal – desplazamiento, (ver figura 8). Se observa el comportamiento de cada una de las probetas, las cuales presentan un comportamiento similar ascendente de la fuerza normal con respecto a la fuerza de compresión debido a la precarga.

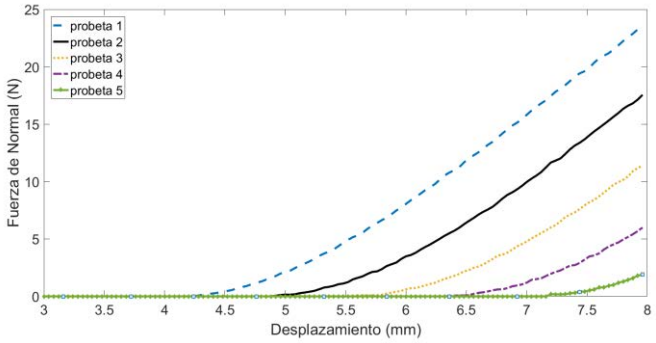


Figura 8.- Gráfica comparativa de fuerza normal en las probetas

Partiendo del modelo anterior se realizó un modelo dinámico, el cual consiste en impactar una masa (plato rígido) con la carcasa, con el fin de obtener la fuerza de fricción del contacto entre el cilindro y la carcasa. Esto representa el impacto de la caída de una persona. La fuerza de fricción que se obtiene en la carrera recorrida por la carcasa da como resultado la energía disipada.

 ISSN en trámite

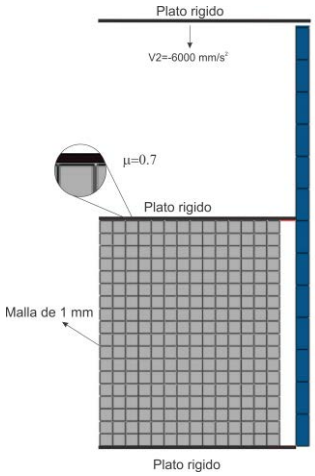


Figura 9.- Modelo discreto para simulaciones dinámicas

El modelo discreto mostrado en la figura 9, consta de 5 elementos de los cuales 4 de ellos se consideraron como discretamente rígidos, siendo el cilindro el único elemento deformable, realizado de forma axisimétrica. El modelo está constituido por los siguientes pasos:

1. Se aplica la precarga al cilindro, de esta manera se garantiza el contacto entre el cilindro y la carcasa.
2. La masa impacta la carcasa provocando el deslizamiento de esta, lo cual genera fricción entre los elementos en contacto.

En la figura 10 se presenta el estado inicial y final de la carrera del disipador al someterse a una fuerza de impacto, se observa el comportamiento del elemento elastomérico ante la precarga inicial, así como la concentración de esfuerzos.

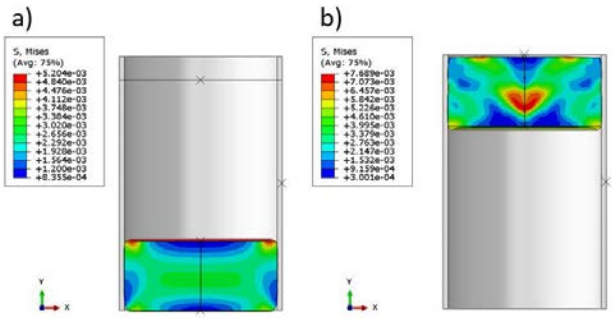


Figura 10.- Modelo dinámico de impacto, donde: a) Estado inicial antes del impacto, b) Estado final posterior al impacto.

Los resultados se presentan en la figura 11 donde se aprecia el comportamiento de la fuerza de fricción a lo largo de la carrera de la carcasa.

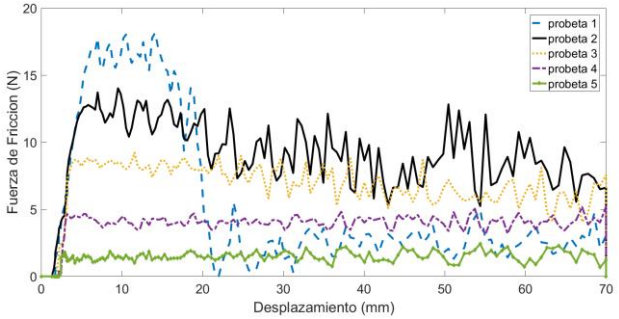


Figura 11.- Fuerza de fricción – desplazamiento.

Para obtener la energía disipada por el dispositivo en cada una de las probetas, se determinó mediante el cálculo del área bajo la curva "fuerza de fricción – desplazamiento", el cual se realizó mediante el software Matlab. Los resultados de energía de disipación se presentan en la figura 12.

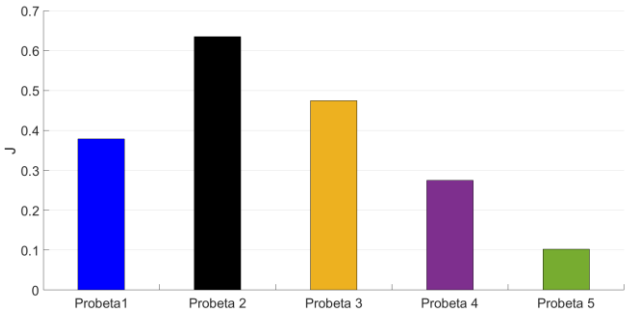


Figura 12.- Energía disipada

Se observa que utilizando la probeta 2 se tiene una mayor energía de disipación, con un valor de 639.26 $[N * mm]$, lo cual representa un incremento del 84% con respecto a la probeta 5. Por lo que la probeta 2 se puede seleccionar como la mejor configuración bajo los parámetros analizados.

Una variación de los parámetros de la probeta 2, es el incremento de todas las medidas al doble y cuádruple de su tamaño, esto la finalidad de ver la relación de esto con la disipación de energía según la proporción del tamaño. Al doble tamaño la disipación de energía incrementa a 2.819 J y al cuádruple a 7.18 J.

5.- APLICACIÓN

El uso del dispositivo presentado anteriormente se utilizará en un arreglo que servirá como tapete amortiguador de impacto para disipar la energía generada por la caída de un trabajador, en la figura 13 se muestra la configuración de los disipadores de energía, la cual consta de 4 componentes:

- La base y el soporte los cuales se encargan de mantener unidos los disipadores de energía con un arreglo en paralelo.
- El disipador de energía que se encarga de amortiguar y disipar la energía del usuario en caso de una caída.
- Una esponja que interactúa directamente con el usuario.

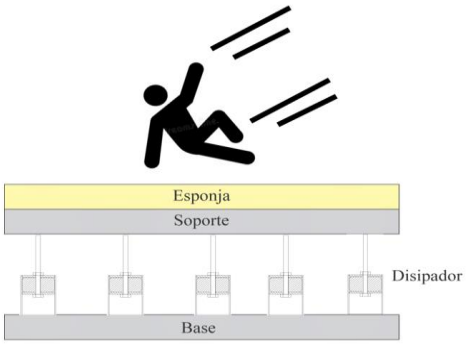


Figura 13.- Tapete amortiguador de impacto

La norma UNE EN 361:2002 considera que los arneses anti caídas deben de considerar un peso promedio de 100 kg, lo anterior establece una referencia como parámetro, no obstante, el cálculo de la energía se consideró utilizando de manera arbitraria un peso de 140 kg, como factor de seguridad. El cálculo de la energía generada por la caída de dicha masa se determina mediante la ecuación 1 (Ruslan,2007):

$$\mathrm{EC} = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (1)$$

Donde:

Ec=Energía cinética; m=masa; v=velocidad

De acuerdo con la ecuación 1, la velocidad para un objeto que se encuentra a 1.8 m es de 6 m/s. Con esto se concluye que, para estos parámetros, la caída de una persona desde 1.8 m con un peso de 140 kg. genera 2600 J siendo esta energía la que se requiere disipar con el tapete amortiguador.

Las colchonetas de seguridad para gimnasia tienen medidas aproximadas de 3000x4000x300 mm (B2Sport, 2020), las colchonetas anticaidas de la cama cuentan con medidas de 1750x700x30 mm (ARABA, 2020), los colchones inflables para rescate para una caída de 4 pisos tienen mediadas de 3000x4600x2100 mm (IMPROFOR, 2019).

6.- CONCLUSIONES

- Se realizó la validación del modelo discreto considerando los elementos elastoméricos obteniendo resultados en alrededor del 5% con respecto a los resultados presentados en la literatura.
- Se propuso un sistema disipador de energía con el uso de elastómeros con la capacidad de reducir cargas de impacto generadas tras la caída de una persona para alturas de hasta 1.8 m.
- El dispositivo disipador de energía con las dimensiones de la propuesta 2 y las condiciones dadas en esta investigación tiene la capacidad de disipar 0.64 J. de energía.
- Mediante un arreglo en paralelo de dispositivos disipadores se puede cubrir la cantidad de energía requerida para un trabajo en altura máxima de 1.8 metros.
- Dado que el diámetro externo de la carcasa es de 64 mm, el dispositivo ocupa un área de 3,217 mm^2, siendo una referencia un metro cuadrado, se necesitan 256 disipadores conectados de forma paralela para cubrir la cantidad de energía requerida.
- De igual manera, existe la posibilidad de redimensionar el dispositivo para que individualmente disipe mayor cantidad de energía considerando como parámetros de rediseño el material elastomérico, la geometría del cilindro y la precarga en el sistema.

7.- REFERENCIAS

1. NOM-009-STPS-2011, “Condiciones de seguridad para realizar trabajos en altura”, Norma Oficial Mexicana
2. Bedolla-Hernández Jorge, Flores-Lara Vicente, Bedolla-Hernández Marcos, Szwedowicz Dariusz, Análisis de disipación de energía cinética por elementos tubulares deformables. Revista de Ingeniería Mecánica. 2017. 1-3: 41-51
3. Miang Goh Yang, Wang Qiao, 2015, “Investigating the Adequacy of Horizontal Lifeline System Design through Case Studies from Singapore”, Journal of Construction Engineering and Management.
4. UNE-EN 361:2002, “Equipos de protección individual contra caídas de altura. Arneses anticaídas”, Normalización Española.
5. UNE-EN 12503-1:2013, “Colchonetas deportivas: parte 1 colchonetas de gimnasia, requisitos de seguridad", Normalización Española.
6. Mesa M. Elizabeth, Ramirez S. Juan, Boulanger Pirre, Branch John, 2012, “Inverse-fem characterization of a brain tissue phantom to simulate compression and indentation, ing. cienc., vol 8, no16, pp. 11–36.
7. Ruslan P. Ozerov, A. A. (2007). Physics for Chemists. Elsevier.
8. ARABA, A. T. (2020). Colchoneta anticaídas. http://www.ayudastecnicasaraba.com/colchoneta-anticaidas-alzheimer-atv-7505/
9. B2Sport, G. (2020). Colchoneta seguridad. https://www.b2sport.es/material-deportivo/colchoneta-seguridad-4000-x-3000-x-300-mm-d-25-n294/
10. IMPROFOR. (2019). Colchones para rescate. https://www.improfor.cl/producto/colchones-para-rescate/

Estrategia para utilizar y comercializar los excedentes de producción agrícola

Mónica Leticia Acosta Miranda*. Leonor Ángeles Hernández. **
Juan Mendoza Hernández* Brandon Ariel Jiménez Ramírez *****

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cuautla, Morelos, CP62826 México (Tel: 735-122-2242; (e-mail: monica.acosta@cuautla.tecnm.mx)*
*** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cuautla, Morelos, CP62826 México; (e-mail: Leonor.angeles@cuautla.tecnm.mx)*
**** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cuautla, Morelos, CP62826 México, (e-mail: juan.mendoza@cuautla.tecnm.mx)*
***** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cuautla, Morelos, CP62826 México, (e-mail: 14680405@cuautla.tecnm-mx)*

Resumen: *Aprovechar los excedentes de la producción agrícola mediante un deshidratador solar automatizado que desplaza su cama térmica deduciendo la posición del sol gracias a sensores, logrando que el producto pierda su humedad, aprovechando al máximo la cosecha, diversificando los productos que se ofertan al mercado y proporcionando a los productores hortofrutícolas del Estado de Morelos un nuevo mecanismo de desarrollo económico. Resultados: se logró deshidratar 7 kilos de jitomate en 30 horas a una temperatura promedio de 28 grados centígrados. Este tipo de deshidratador es fácilmente escalable de acuerdo con las necesidades y espacios disponibles de los productores y puede utilizarse en diversos tipos de productos agrícolas.*

Palabras clave: Uso agrícola de energía solar, sensores, mermas, deshidratador solar, producción de jitomate.

1. INTRODUCCION

El Estado de Morelos se caracteriza por su clima cálido y días soleados durante la mayor parte del año y, pese a no contar con una amplia superficie, en varios de sus municipios la actividad agrícola es sumamente importante. En los últimos años se ha incrementado el cultivo de jitomate a través de invernaderos, principalmente en la zona oriente del estado, cuyos productores se enfrentan a la problemática de que no todos los jitomates que producen cuentan con las características requeridas para la venta, situación que hace incosteable su cosecha y lo convierte en desecho orgánico que se suma a las grandes cantidades de desperdicio generadas por otras actividades de la población.

El problema de la pérdida y desperdicio de alimentos (PDA) a lo largo de la cadena de producción y comercialización no es exclusivo de México, es un problema que se presenta a nivel mundial contemplado, dada su problemática, dentro de las metas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (FAO, 2017) propone *reducir a la mitad el desperdicio per cápita a nivel global en los niveles de venta y consumo, y reducir la pérdida de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluyendo las pérdidas poscosecha.*

De acuerdo a información proporcionada de manera personal por productores de la Asociación de Productores de Hortalizas Santa Bárbara S. P. R. de R. L., ubicados en los municipios de Jantetelco, Temoac, Jonacatepec y Tepalcingo, los invernaderos de esta zona cuentan con un excedente de jitomate del 10% de su producción, el cual es apto para el consumo alimenticio pero no cuenta con las características establecidas para su venta principalmente en cuanto a tamaño, color y apariencia; por lo que son descartados automáticamente. A esto se suma que durante el transporte, manipulación y lugar de almacenamiento se genera otro tipo de problemas como la maduración incorrecta o el maltrato que lesiona el producto por lo cual debe separarse y no llega a venderse. Considerando este excedente de jitomate, se ha buscado la forma de aprovecharlo, encontrando que el jitomate deshidratado puede tener diversos usos convirtiéndose en una alternativa para utilizar aquella parte de la producción cuyo destino actual es la basura.

Mediante el proceso de deshidratación el jitomate logra perder cerca del 90% de su contenido de agua. Con este tipo de proceso el sabor se concentra de manera muy importante en el jitomate sin perder sus propiedades nutritivas lo que permite su conservación por mucho más tiempo, incrementando su vida de anaquel (Medina C. , 2015). Esto ofrece a los productores una diversificación en su oferta comercial generando una nueva fuente de ingresos, dando fin al excedente de producción y reduciendo los desechos que posteriormente se convierten en contaminantes.

2. MARCO TEÓRICO

La deshidratación, es de los métodos más utilizados desde la antigüedad para la conservación de los alimentos. El proceso involucra remover la mayor parte del agua del alimento para evitar la actividad enzimática y el desarrollo de microorganismos. Dentro de sus múltiples ventajas podemos mencionar: a) Genera gran estabilidad microbiológica y química, b) disminuye el peso y volumen, c) reduce el empaquetado del producto, d) reduce los costos para su transporte y almacenamiento y e) permite el almacenamiento del

producto a temperatura ambiente por largos periodos de tiempo (Adjuntament de Barcelona, S/f).

Los deshidratadores solares son dispositivos que utilizan la radiación solar para calentar el aire dentro de un compartimento que se mueve a través de ductos que dirigen el aire caliente a compartimentos donde se encuentran los productos con lo cual se logra retirar el agua de los tejidos de los productos, verduras, semillas, carne y hiervas. Después de que han sido deshidratados, los alimentos pueden conservarse secos hasta por un año sin perder sus propiedades nutritivas (Unidad de Ecotecnologías, s/f).

2.1 Energía Solar

La energía solar es la energía obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el Sol. La mayoría de las fuentes de energía usadas por nosotros proceden directa o indirectamente del Sol, por lo cual podemos afirmar que el Sol es imprescindible para que haya vida y progreso en la Tierra.

La energía solar es cada vez más utilizada debido a que es una energía renovable e inagotable que ayuda a disminuir la huella negativa en el ambiente. La energía solar es la energía contenida en la radiación solar, la cual se transforma mediante dispositivos en forma térmica o eléctrica para poder consumirla. Es la energía renovable más utilizada en todo el mundo y varios países se han aprovechado de los beneficios que trae al ocuparla.

El uso de la energía solar no es nuevo. Los antiguos egipcios desde el siglo VI A.C, encontraron una forma de aprovechar la energía del sol durante el día. Para ello, usaron los dos tipos de energía solar que existen: la luminosa y la térmica. La primera la aprovechaban reflejando con espejos la luz del sol, con el fin de iluminar entradas y pasillos de edificios. La segunda, por medio de tubos instalados en las tejas, mismos que almacenaban agua que se calentaba durante el día, y que prevenía la pérdida de calor de la construcción durante la noche. De esta manera, los egipcios fueron, posiblemente, la primera cultura con indicios de aprovechamientos de energías renovables (Limón Portillo, 2017).

En México la utilización de energía solar ha incrementado en un 13%, y, de acuerdo con Israel Hurtado (Del Real, 2018), Secretario General de la Asociación Mexicana de Energía Solar (Asolmex), esto se debe a que México forma parte del cinturón solar, una zona que considera a los países con mayor radiación solar en el mundo. El 85% del territorio mexicano tiene buena propagación de la energía proveniente del sol. Eso permite que desde cualquier parte del país puedas instalar paneles solares. Se espera que, en los siguientes años, México se ubique en el séptimo lugar a nivel mundial en términos de generación de energía solar.

La manera de medir el potencial de energía solar que un territorio tiene es a través de la radiación solar. Según la International Renewable Energy Agency (IRENA), México se encuentra entre 15° y 35° de latitud, región considerada la más favorecida en recursos solares, donde se recibe diariamente, en promedio, 5.5 Kwh/m2 (la unidad de medición de radiación solar). Esto lo hace el tercer país más atractivo para invertir en proyectos de energía solar detrás de China y Singapur.

De acuerdo con el documento Energías Renovables de ProMéxico (2016) estas son aquellas que se renuevan de forma continua como el sol, el viento, la biomasa y el calor y se clasifican en: Eólica, Solar y Geotérmica. En el caso de la energía solar, esta se divide de acuerdo con la tecnología utilizada en:

- Fotovoltaica que es la transformación de la radiación solar en electricidad a través de paneles, celdas, conductores o módulos fotovoltaicos, elaborados principalmente de silicio y formados por dispositivos semiconductores.
- Solar de alta concentración, paneles parabólicos que concentran la radiación solar para transformarla en energía eléctrica.
- Térmica, que consiste en el aprovechamiento de la radiación solar para la captación y almacenamiento de calor a través de colectores termo solares.

Algunas de las cualidades que caracterizan a la energía solar como una fuente rentable energética:

- El sol proporciona energía constantemente, sin límite próximo alguno.
- La energía solar cubre toda la superficie terrestre. Dependiendo su ubicación con respecto a la latitud, la intensidad solar varía en algunos lugares más que en otros.
- Es cuantiosa y libre de algún costo.
- No es contaminante, como la mayoría de las fuentes energéticas.
- Ninguna entidad puede acrecentar su precio.
- No necesita ser transportado.
- No puede ser acaparada.

2.2 La deshidratación

La deshidratación (CEUPE , 2017), es uno de los métodos más antiguos de conservación de alimentos conocido por el hombre que, al eliminar la totalidad del agua libre de este, impide la actividad microbiana y reduce la actividad enzimática. La deshidratación extiende la vida útil de los alimentos obteniendo productos con mayor valor agregado. Esto permite disponer de frutas y hortalizas durante todo el año y evita la pérdida de los excedentes de producción y consumo. Asimismo, favorece los microemprendimientos familiares y las economías regionales.

Durante el proceso de deshidratado debe protegerse el valor nutricional del alimento y sus características organolépticas (sabor, color, olor y textura). Las condiciones del deshidratado deben ser tales que, cuando se restituya el contenido acuoso, se obtenga un producto lo más similar posible al que le dio origen.

Se puede deshidratar cualquier fruta u hortaliza. Generalmente se deshidratan aquellas que tienen una corta vida útil o los excedentes de producción primaria.

2.3 Deshidratador solar

El secado de alimentos se puede considerar como una de las maneras más antiguas de utilizar entre el 94% y 99% de la energía solar. A lo largo de la historia de la humanidad, se ha utilizado la radiación solar como fuente calorífica para secar productos de naturaleza perecedera, este proceso natural sobresale entre otros métodos (congelación o esterilización), ya que, en el secado, el producto mejora su sabor y sus propiedades nutricionales, lo cual ha popularizado este método de conservación (Medina C. , 2015).

La deshidratación solar se realiza a través de un aparato que permite aprovechar la energía solar para secar alimentos, con resultados de similar o superior calidad a los obtenidos mediante el secado natural, pero en menor tiempo y en óptimas condiciones de higiene.

En un deshidratador solar la energía del sol se transforma en calor útil mediante un efecto invernadero, este calor eleva la temperatura del aire contenido en una cámara donde se encuentran los alimentos convenientemente dispuestos sobre rejillas. El proceso de secado se realizar por la acción de aire caliente que circula y pasa entre los alimentos, lo cual causa la evaporación del agua del producto y lleva esa humedad hacia el exterior del deshidratador.

Los dos elementos básicos de un deshidratador solar son: 1) El colector, donde la radiación solar calienta el aire mediante efecto invernadero, 2) La cámara de secado, que es la zona donde se colocan los alimentos para ser deshidratados por el aire caliente que produce el colector.

Existen tres tipos de deshidratadores solares (Ochoa Reyes, 2013):

1. Secaderos solares directos. En este tipo de secador, el colector y la cámara de secado están juntos, por lo que el espacio que contiene los productos funciona como colector recibiendo la radiación solar. Consta de una superficie de secado cubierta por un material transparente, que protege al producto de la lluvia y de la contaminación. La radiación solar es absorbida también por el propio producto, con lo cual la energía se aprovecha mejor para producir la eliminación de la humedad acelerándose de esta forma el proceso de secado

2. Secaderos solares indirectos. En este tipo de secaderos, el colector y la cámara de secado están separados. la radiación solar no incide directamente sobre el producto a secar.

3. Secaderos solares asistidos. Se trata de secaderos convencionales que se han modificado para poder utilizar energía térmica en sustitución de la energía solar.

3. RESULTADOS

La construcción del deshidratador solar se basa en la aplicación de una tecnología sencilla y apropiada para pequeños productores aprovechando las características climáticas y de radiación de la región Oriente del Estado de Morelos. Su aplicación permitirá la conservación del jitomate, y al mismo tiempo se busca mantener una gran proporción de su valor nutritivo original.

Se optó por construir un deshidratador solar de tipo colector y armario, que consta de un colector solar donde el aire se calienta y asciende hasta el armario donde se sitúan los productos a deshidratar. Cuenta con un sistema para el control del motor y el control automático se lleva a cabo mediante tarjeta de adquisición de datos Arduino que controla dos motorreductores con una capacidad de 21 kilogramos de fuerza. Este deshidratador girará en torno al posicionamiento del sol a lo largo del día, lo que ayudará a que el proceso de deshidratación sea más rápido evitando la pérdida de producto. En cuanto al diseño cuenta con tres partes: 1) Caja para la zona de secado, 2) Rampa o cama térmica y 3) Soporte inferior. El diseño preliminar se realizó en el programa SolidWorks para modelado mecánico en 2D y 3D.

La caja de secado cuenta con un espacio lo suficientemente amplio para la colocación de 4 charolas de rejilla en su interior, cada una con su propia puerta. En la parte frontal de la caja de secado se encuentra una abertura para ensamblar la cama térmica con un soporte acoplable para asegurar el ensamble y facilitar su movilidad. En la parte frontal izquierda se encuentra el escape que permite la circulación del aire a la vez que retira la humedad de los jitomates. La parte inferior presenta una perforación que permite acoplar la caja con el soporte de la mesa. En este espacio se colocó un compartimiento para el mecanismo que genera el movimiento rotatorio al deshidratador y el sistema electrónico.

La base de soporte inferior para la caja cuenta con una pieza circular que permite ensamblar con la caja de alimentos. Esta pieza se mantendrá estática y es la encargada de soportar las otras 2 piezas. La cama térmica presenta un ángulo de inclinación de 35° de acuerdo a lo recomendado en la página del Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica de la Comisión Europea (2019), con la finalidad de captar la mayor cantidad de energía solar en el deshidratador, debido a que los paneles solares, al estar posicionado en un ángulo perpendicular a los rayos del sol, se vuelven más eficientes a la hora de generar energía eléctrica proporcionando hasta un 15 o un 20 por ciento más de energía a la comparación de otros paneles solares con diferentes ángulos de inclinación. En la parte superior presenta una abertura de 5 x 90 cm que funciona para permitir el flujo de aire a la cama de productos.

 ISSN en trámite



Fig. 1. Prototipo de deshidratador solar. Elaboración propia.

Se decidió emplear motorreductores de tipo cónico-espiral o de velocidad de engranaje cuya función es generar la fuerza necesaria para el giro del mecanismo. Los criterios de selección fueron: Tiene mayor torque, menor velocidad, tensión eléctrica y peso acordes a los requerimientos del proyecto. En el caso de las tarjetas de adquisición de datos se seleccionó la tarjeta Arduino por ser fácil de adquirir, económica y fácil de programar sin limitar sus funciones. Su función es controlar el funcionamiento del controlador puente H, tomar datos de los sensores y mandar las señales correspondientes.

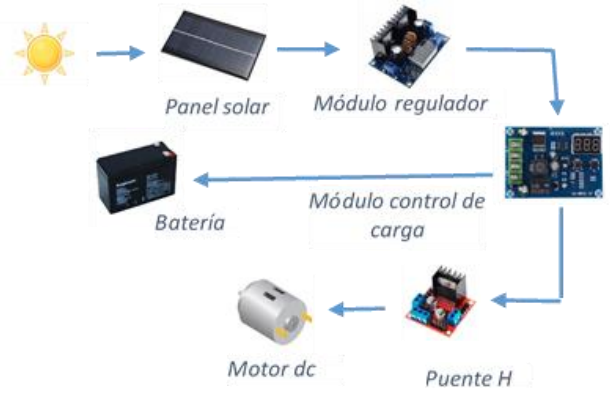


Fig. 2. Sistema Fotovoltaico. Elaboración propia.

Una vez armadas y pintadas cada una de las estructuras se procedió a la realización de pruebas de seguimiento de la tensión eléctrica para determinar la capacidad de alimentación que ofrece al momento de cargar las baterías. De igual forma se realizaron mediciones de la intensidad de la radiación y la temperatura ambiente.



Fig. 3. Proceso de deshidratado. Elaboración propia.

Las pruebas se realizaron en el mes de diciembre de 2019 en las instalaciones del plantel con una temperatura ambiente de entre 21 y 29 grados centígrados, en un horario de 10 de la mañana a 5 de la tarde. En este periodo de tiempo los paneles solares arrojaron un voltaje pico de 23.8 volts 1pm. El voltaje general fue de 21 volts, lo que ofrece una buena alimentación para mantener con carga las baterías. A partir de las 5 pm el voltaje de los paneles solares disminuye hasta 8.8 volts. Por otra parte, la cama térmica alcanzó, entre 1 y 3 de la tarde una temperatura de 67 grados adecuada para el proceso de deshidratación.

4. CONCLUSIONES

La merma en la producción agrícola debe reducirse no solo para abatir los costos de producción y los costos mismos que genera la pérdida o desperdicio del producto además del compromiso de reducir el problema de contaminación tan grave que los desechos agrícolas están causando.

La deshidratación es un mecanismo para el aprovechamiento de los productos, genera estabilidad microbiológica y química, disminuye el peso y volumen, reduce el empaque, costos de almacenamiento y transporte, además permite el almacenamiento del producto a temperatura ambiente por largos períodos de tiempo.

El desarrollo del diseño del prototipo del deshidratador solar mostró los resultados que se esperaban al empezar con este proyecto. La temperatura se mantuvo adecuada durante la mayor parte del día, se logró una pérdida considerable de humedad en el jitomate logrando que algunas rodajas de las más pequeñas se deshidrataran en 7 horas (de 10 am a 5 pm). Con una temperatura promedio de 28 grados se concluyó que el deshidratador podrá deshidratar 7.2 kilogramos de jitomate en un promedio de un día y medio. Se demostró la eficiencia de los paneles solares que ofrecieron en promedio 21volts que el regulador se encargó de convertirlos a 12volts. El funcionamiento automatizado funcionó correctamente, activando el giro cada hora, para mantener los rayos solares hacia la cama térmica, Arduino demostró tener un funcionamiento constante durante todo el día.

Si bien por cuestiones de tiempo únicamente se realizaron 3 pruebas en condiciones y con resultados muy similares se considera que los mejores resultados del prototipo se obtendrán en los meses de mayor temperatura en la zona que son de abril a junio, lo que disminuirá los tiempos del proceso, ya que diciembre es de los meses más fríos en la región. El diseño funcionó perfectamente en todos sus componentes y se logró el resultado esperado.

Con la intención de aprovechar al máximo los resultados del proyecto es necesario diseñar los mecanismos para la conservación de los productos deshidratados. En el caso de las pruebas realizadas se conservaron en refrigeración en herméticos con muy buenos resultados y en envase de cristal al aire libre notando que después de 5 días el producto recuperó humedad del ambiente para posteriormente entrar en estado de descomposición. Por esta razón resulta importante dar continuidad al proyecto con este tema y el de su comercialización.

Con las actuales dimensiones del prototipo, este resulta funcional, pero su gran ventaja es que puede escalarse al tamaño más adecuado de acuerdo con el uso que se le pretenda dar, desde más pequeño para uso doméstico o más grande con la finalidad de deshidratar más producto en el mismo tiempo mediante la adaptación de motorreductores con más fuerza para poder mover fácilmente la caja de secado. Con la finalidad de evitar la fricción en la cama térmica y para utilizar el aparato en diferentes tipos de suelo como terracería, podría ser necesario utilizar otro tipo de ruedas, ya que las pruebas se realizaron en superficies lisas.

Las tres piezas del prototipo son armables y fáciles de ensamblar, dando la posibilidad de cambiar la cama térmica y la caja de secado en un tamaño más grande o pequeña dependiendo el área que se necesite y dando la oportunidad de una deshidratación más rápida incluso con espacio para más o menos charolas.

Como trabajo a futuro es determinar el mecanismo más adecuado para el registro del prototipo y de esa forma estar en condiciones de poder comercializarlo o buscar a algún interesado en su producción. De igual forma es importante analizar los esquemas más adecuados de empaque y comercialización del producto deshidratado para poder llevar el proyecto de una manera integral a la práctica.

Este proyecto aportó en el proceso educativo, mediante la vinculación productores-estudiantes y docentes del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cuautla al adquirir otro tipo de competencias por medio del trabajo cercano con los productores y el involucramiento en problemáticas reales, identificando áreas de oportunidad laboral que pueden impactar en el desarrollo económico de la región en un proceso de ganar-ganar.

REFERENCIAS

Adjuntament de Barcelona. (S/f). *Tecnologías apropiadas para la transformación agropecuaria.* Obtenido de Ingeniería sin fronteras: https://esf-cat.org/wp-content/uploads/2017/06/Manual-Tecnologia-para-la-Transformacion-Agropecuaria-Deshidratador-Solar-ESF-1.pdf

CEUPE . (2017). *La deshidratación de los alimentos. .* Obtenido de Centro Europeo de Posgrado: https://www.ceupe.com/blog/la-deshidratacion-de-los-alimentos.html

Comisión Europea. (15 de octubre de 2019). *Sistema de Información Fotovoltaica*. Obtenido de Comisión Europea: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

Del Real, J. (23 de marzo de 2018). *El uso de la energía solar en México cada vez es mayor.* Obtenido de Expok: https://www.expoknews.com/el-uso-de-la-energia-solar-en-mexico-cada-vez-es-mayor/

FAO. (2017). *Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe.* París, Francia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Limón Portillo, A. (2 de junio de 2017). *Energía solar en México: su potencial y aprovechamiento.* Obtenido de CIEP: https://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/

Medina, C. (2015). Estudio del proceso de deshidratación de alimentos Frutihortículas: Empleo de microondas y energia solar.

Ochoa Reyes, E. (2013). Tecnologías de deshidratación para la preservación del tomate. (U. d. Sonora, Ed.) *Biotecnia, XV*(2), 39-46.

PROMEXICO. (7 de octubre de 2016). *Grandes oportunidades en las energías renovables.* Obtenido de PROMEXICO: https://www.gob.mx/promexico/articulos/grandes-oportunidades-en-las-energias-renovables

Unidad de Ecotecnologías. (s/f). *Deshidratadores solares.* Obtenido de Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y sustentabilidad: http://ecotec.unam.mx/Ecotec/ecoteca/deshidratadores-solares-2

Gráficas de optimización termo-económica de un sistema de calentamiento solar

Ayala-Zambrano Sandra * **Flores-Prieto J. Jassón** *

* *Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, CP. 62490, México. (e-mail:im.sandra.ayala.z@gmail.com, jasson@cenidet.edu.mx).*

Resumen En este trabajo se presenta las gráficas del comportamiento de la razón de uso, la razón volumétrica, los ahorros solares y el tiempo de retorno óptimos, de un sistema de calentamiento solar con almacenamiento térmico para procesos industriales en Monterrey, Nuevo León. Los diferentes casos estudiados se obtuvieron al variar la temperatura del proceso y la demanda de agua requerida y cada caso se optimizó térmica y económicamente. Las optimizaciones se realizaron mediante análisis variacionales, lo cual implicó el uso de una plataforma de simulación térmica en estado transitorio y una plataforma económica. Una vez realizadas las optimizaciones, los resultados fueron utilizados para generar cuatro gráficas de las variables en función de la temperatura del proceso y la demanda requerida. La razón de uso mostró un comportamiento sigmoidal con respecto a la demanda y logarítmico en función a la temperatura. La razón volumétrica presentó un comportamiento escalonado al variar la demanda y prácticamente ninguna variación debido a la temperatura. Los ahorros solares exhibieron un comportamiento logarítmico en función a la temperatura y la demanda. Y el tiempo de retorno, el tiempo necesario para recuperar la inversión, mostró un comportamiento logarítmico respecto a la demanda y cuasi lineal en relación a la temperatura. Es de resaltar que la demanda influye de mayor manera sobre la razón de uso, los ahorros solares y el tiempo de retorno que la temperatura, mientras que la razón de uso varía más en función a la temperatura.

Keywords: Sistema de calentamiento solar, optimización, razón de uso, razón volumétrica, ahorros solares, tiempo de retorno.

1. INTRODUCCIÓN

El sector industrial es el responsable del 31 % del consumo total de energía del país. De este 31 %, el 67 % es debido a la generación de energía térmica [Payback (2018)]. La demanda de calor se cubre principalmente con combustibles tales como el gas, en un 58 %, petrolífero, en un 27 % y carbón, en un 11 %, entre otros. La sustentabilidad de estos combustibles es limitada ya que genera emisiones de gases de efecto invernadero, y su producción tiende a la baja [Ortega (2018)]. Una alternativa para la producción de calor es el uso de sistemas de calentamiento solar para procesos industriales, SHIP por sus siglas en ingls, [Duffie et al. (2013)]. Sin embargo, sus altos costos e incertidumbres han limitado el desarrollo de los SHIPs en la industria.

El dimensionamiento optimizando de manera termo-económica es clave en la reducción de costos e incertidumbres de los SHIPs, [Arcos-Adame (2018); Silva et al. (2014); Hazami et al. (2013); Lugo et al. (2019); Pérez-Grajales (2015)]. La optimización termo-económica ya se ha venido realizando con modelado térmico principalmente [Abdunnabi et al. (2014); Barrera-Ayar (2017); Bouhal et al. (2017); Quijera et al. (2014); Allouhi et al. (2017); Frasquet (2016)], y en menor medida con análisis termo-económico, siendo los ahorros solares y el tiempo de retorno los parámetros de optimización más destacados [Gao et al. (2013); Jannesari and Babaei (2018); Silva et al. (2014)]. Sin embargo, estas optimizaciones implican un costo significativo en tiempo, lo cual limita el crecimiento de la implementación de estos métodos [Kalogirou (2005); Yaïci and Entchev (2016)].

Con el fin de reducir tiempos en la optimización, este trabajo estudia el patrón de las dimensiones óptimas de un sistema de calentamiento solar al variar la temperatura del proceso y la demanda requerida. Los parámetros de optimización utilizados son los ahorros solares y el tiempo de retorno. El lugar de estudio es Monterrey, México, ya que el recurso solar en México se puede considerar basto [Ortega (2018)] y , por otra parte, Monterrey es una de las ciudades con mayor crecimiento industrial en México [INEGI (2018b)].

 ISSN en trámite

2. SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR

2.1 Recurso solar

El lugar de estudio en este trabajo es Monterrey, Nuevo León. Los datos meteorológicos se consideraron de un año típico, de acuerdo a METEONORM. La evaluación del recurso solar se realizó con el software TRNSYS. La irradiación promedio diaria directa, difusa y global fue de 3.11, 2.03 y 5.14 $\frac{kWh}{m^2}$, respectivamente. La irradiación horizontal global promedio diaria en Monterrey se encuentra ligeramente por debajo de la media nacional [INEGI (2018a)]. La irradiación difusa representa alrededor del 40 % de la irradiación global, por lo que los captadores de placa plana son una buena opción para el mayor aprovechamiento del recurso.

2.2 Demanda del sistema

En la Figura 1 se muestra el perfil de carga diario utilizado para todos los casos en este estudio, también cabe mencionar que se considero una demanda diaria los 365 días del año. La demanda de agua se varió de 1571-15714 $\frac{L}{día}$, con un incremento de 1571 $\frac{L}{día}$, y 25,000 $\frac{L}{día}$. El intervalo de las temperaturas utilizadas para este estudio fue de 60-90°C con un intervalo de 1°C.

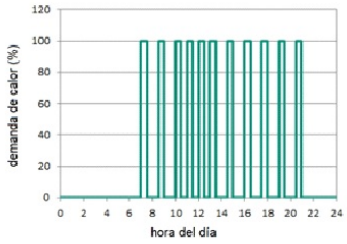


Figura 1. *Perfil de carga [Helmke et al. (2015)].*

2.3 Configuración del sistema

El sistema se conforma de un área de colección, dos intercambiadores de calor, un tanque de almacenamiento térmico, cuatro bombas, un calentador auxiliar y dos controles de temperatura análogos, como se muestra en la Figura 2. El sistema capta la radiación solar mediante los captadores solares, los cuales transfieren la energía al fluido agua-glicol. El agua-glicol es bombeada a un intercambiador de calor donde transfiere la energía captada a agua simple, ya que esta es más económica. El agua es bombeada al tanque donde se almacena y cuando es requerido pasa al segundo intercambiador donde transfiere la energía al agua tratada que antes de entrar al proceso pasa por un calentador auxiliar, el cual se activa en caso de que el agua tratada no alcance la temperatura requerida. Cabe resaltar que las bombas se activan y desactivan mediante controladores de temperatura. En las tablas 1-4 se presentan las características de los diferentes elementos de la configuraciń del sistema de calentamiento solar.

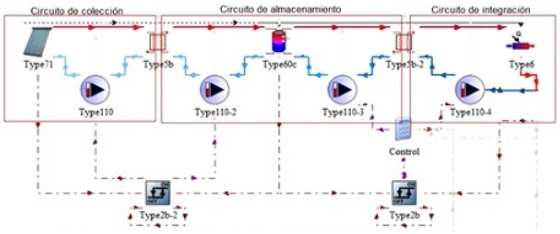


Figura 2. *Configuración del sistema de calentamiento solar.*

Tabla 1. *Carastersticas del colector de tubo evacuado [Helmke et al. (2015)].*

Colector Solar		
Tipo	Tubo evacuado	
Fluido de trabajo	Agua/Glicol	
	Densidad (ρ)	$1035\ \frac{kg}{m^3}$
	Calor especifico (C_p)	$3.7\ \frac{kj}{kg\ K}$
Parámetros de eficiencia	a_0	0.811
	a_1	2.71
	a_2	0.01
Ubicación	Graz, Austria	
Ángulo Azimutal	Frente al Ecuador	
Ángulo de incinación	40°	

Tabla 2. *Carastersticas del tanque de almacenamiento [Helmke et al. (2015)].*

Termotanque		
Tipo	Estratificado	
Volumen	$12\ m^3$	
Altura	$3\ m$	
Fluido de trabajo	Agua	
	Calor especifico (C_p)	$4.19\ \frac{kj}{kg\ K}$
UL	$0.83\ \frac{kj}{h\ m^2 °C}$	
Secciones de estratificación	5	

Tabla 3. *Carastersticas de las bombas hidrulicas [Helmke et al. (2015)].*

No. De bomba	Fluido de trabajo	Capacidad $\left(\frac{kg}{h}\right)$	Potencia nominal (kW)	Eficiencia total de la bomba	Eficiencia del motor
1	Agua/Glicol	6000	6	0.6	0.9
2	Agua	6000	6	0.6	0.9
3	Agua	5000	5	0.6	0.9
4	Agua tratada	5000	5	0.6	0.9

Tabla 4. *Carastersticas de los intercambiadores de calor [Helmke et al. (2015)].*

Intercambiador de calor 1		
Tipo	Contra-flujo	
Fluidos de trabajo	*Lado caliente*	
	Fluido	Agua/Glicol
	Calor especifico (C_p)	$3.7\ \frac{kj}{kg\ K}$
	Lado frio	
	Fluido	Agua
	Calor especifico (C_p)	$4.19\ \frac{kj}{kg\ K}$
Coeficiente de transferencia de calor	24000 W/K	
Intercambiador de calor 2		
Tipo	Contra-flujo	
Fluidos de trabajo	*Lado caliente*	
	Fluido	Agua
	Calor especifico (C_p)	$4.19\ \frac{kj}{kg\ K}$
	Lado frio	
	Fluido	Agua tratada
	Calor especifico (C_p)	$4.19\ \frac{kj}{kg\ K}$
Coeficiente de transferencia de calor	12000 W/K	

3. OPTIMIZACIÓN TERMO-ECONÓMICA

En la Figura 3 se exhibe el diagrama de flujo de la metodología utilizada para la optimización del sistema de calentamiento solar. La metodología implica la construcción de los simuladores, la simulación y la optimización.

ISSN en trámite

La plataforma térmica se construyó en TRNSYS mientras que la económica se construyó utilizando el programa Octave. Las entradas de la plataforma térmica fueron los datos meteorológicos, obtenidos de METEONORM, la razón de uso, R_u, la razón volumétrica, R_v, la temperatura, T, y la demanda requerida. Las salidas de la plataforma térmica son la fracción solar, FS, y la energía útil, Q_u. Las entradas en la plataforma económica son los parámetros económicos los cuales se sacaron de Arcos-Adame (2018) y la fracción solar. Las salidas de la plataforma económica son los ahorros solares, LCS y el tiempo de retorno, PB.

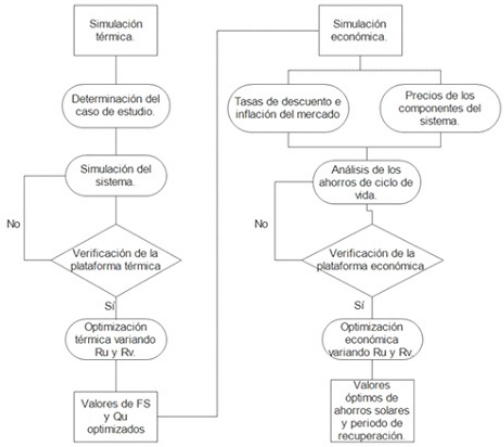


Figura 3. *Metodología de la optimización.*

Antes de empezar con las simulaciones para la optimización de los diferentes casos, las dos plataformas fueron verificadas. Las verificaciones de las plataformas de simulación térmica y económica se realizaron comparando los resultados reportados por Helmke et al. (2015) y Duffie et al. (2013) en términos del coeficiente de correlación R^2, y un análisis de varianza ANOVA. El R^2 fue de 0.0997, 0.999, 1 y 1 para la FS, Q_u, LCS y PB, respectivamente. El p-valor fue de 0.965, para la FS, 0.951 para la Q_u, 0.999 para el LCS, y 1 para el PB, con una significancia de 0.05. Los valores de R^2 y los p-valores determinados indican que no existe una diferencia significativa entre los resultados reportados y los obtenidos [Anderson et al. (2016)].

Una vez verificada la plataforma de simulación, los valores de la R_u y la R_v se variaron para obtener diferentes valores de la FS y la Q_u. Los valores obtenidos de la simulación térmica se introdujeron a la plataforma económica con lo que se obtuvieron los ahorros solares y el tiempo de retorno. Para la optimización de cada caso se realizó un estudio paramétrico variando el área de colección y volumen de almacenamiento en función de la R_u y la R_v, respectivamente. A partir de los resultados obtenidos se realizaron dos nomogramas, uno térmico y uno económico, los cuales fueron usados para la optimización. La razón volumétrica se determina óptima cuando la diferencia porcentual de la FS y Q_u es menor a 1 % al incrementar la razón volumétrica. La razón de uso óptima se determina en el punto de flexión de la curva de los ahorros solares. A partir de la R_u y la R_v óptimos se obtienen los valores del PB y LCS.

4. RESULTADOS

Las gráficas de la R_u, R_v, LCS y PB en función de la temperatura y la demanda se generaron a partir de la base de datos. La base de datos consiste en los valores de la R_u y R_v óptimos con sus respectivos valores de LCS y PB para las diferentes temperaturas y demandas. El número de total de casos optimizados es de 341 y cada caso necesitó 56 corridas para su optimización.

En la Figuras 4 y 5 se muestra la gráfica en "3D" y el contorno de la R_u con respecto a la demanda y la temperatura. Como se puede observar, la R_u tiene un comportamiento sigmoidal con respecto a la demanda y un comportamiento logarítmico en función a la temperatura. También es de resaltar que a mayor temperatura los valores de la R_u van disminuyendo.

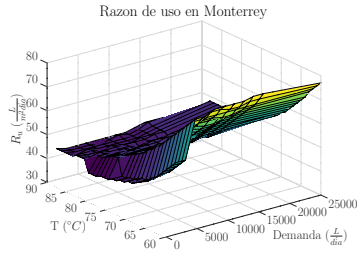


Figura 4. *Gráficas en "3D" de la R_u óptima para diferentes temperaturas y demandas.*

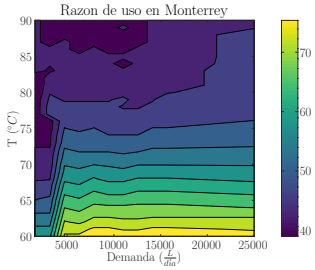


Figura 5. *Contorno de la R_u óptima para diferentes temperaturas y demandas.*

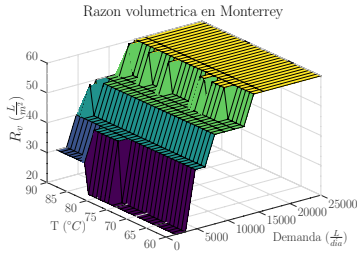


Figura 6. *Gráficas en "3D" de la R_v óptima para diferentes temperaturas y demandas.*

 ISSN en trámite

La R_v exhibe un comportamiento escalonado respecto a la demanda (Figura 6), mientras que con relación a la temperatura se encuentra un comportamiento cuasi lineal (Figura 7). Además se aprecia que a mayor demanda mayor R_v, sin embargo, a partir de cierto valor la R_v no aumenta de 60 $\frac{L}{m^2}$.

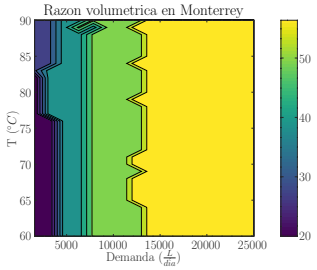


Figura 7. *Contorno de la R_v óptima para diferentes temperaturas y demandas.*

Por su parte en las Figuras 8 y 9, los LCS exponen un comportamiento logarítmico en función de la temperatura y demanda requerida. Al igual que la R_v, el valor de los LCS aumenta conforme la demanda va aumentando. También, los ahorros solares incrementan conforme la temperatura requerida va en aumento.

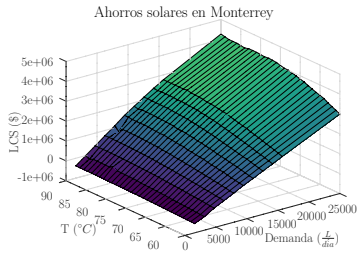


Figura 8. *Gráficas en "3D" de los LCS óptimos para diferentes temperaturas y demandas.*

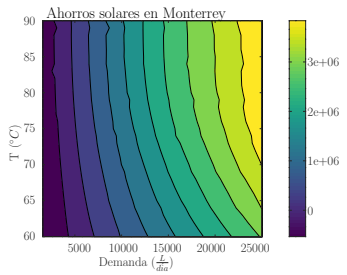


Figura 9. *Contorno de los LCS óptimos para diferentes temperaturas y demandas.*

En las Figuras 10 y 11 se muestran los tiempos de retorno de los sistemas en función de la temperatura y la demanda. El PB presenta un comportamiento logarítmico en la forma $y = a+b/x^2$ con respecto a la temperatura. Asimismo se puede apreciar que la variación del PB en función de la demanda es prácticamente lineal. Adicionalmente es de resaltar que en su mayoría el PB se encuentra al rededor de los 8 *años*.

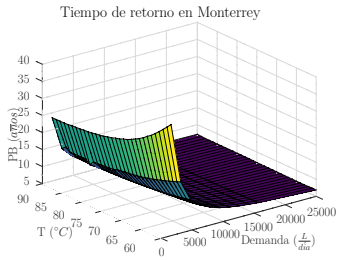
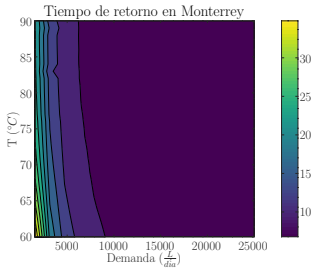


Figura 10. *Gráficas en "3D" del PB óptimo para diferentes temperaturas y demandas.*



5cm

Figura 11. *Contorno del LCS óptimo para diferentes temperaturas y demandas.*

5. CONCLUSION

A lo largo de este trabajo se pudo apreciar que la razón de uso, la razón volumétrica, los ahorros solares y tiempo de retorno presentan tendencias al variar la temperatura del proceso y la demanda requerida. Por lo tanto se puede hacer uso de estas gráficas para la optimización de un sistema de calentamiento solar para procesos industriales y obtener los ahorros y tiempo de retorno para este caso. La razón de uso tiene un conducta sigmoidal con respecto a la demanda y un comportamiento logarítmico con respecto a la temperatura. La razón volumétrica muestra un comportamiento escalonado en función a la demanda y un comportamiento cuasi lineal en relación a la temperatura. La variación de los ahorros solares es logarítmica con respecto a la temperatura y lineal en función a la demanda. Finalmente el tiempo de retorno muestra un comportamiento de la forma $y = a + b/x^2$ debido a la demanda mientras que a la temperatura es práctiamente lineal.

ACKNOWLEDGEMENTS

Este trabajo se debe al apoyo del CONACYT, los autores agradecen el apoyo brindado por esta institución.

REFERENCIAS

Abdunnabi, M., Alakder, K., Alkishriwi, N., and Abughres, S. (2014). Experimental validation of forced circulation of solar water heating systems in trnsys. *Energy Procedia*, 57, 2477–2486.

Allouhi, A., Agrouaz, Y., Amine, M.B., Rehman, S., Buker, M., Kousksou, T., Jamil, A., and Benbassou,

A. (2017). Design optimization of a multi-temperature solar thermal heating system for an industrial process. *Applied Energy*, 206, 382–392.

Anderson, D.R., Sweeney, D.J., and Williams, T.A. (2016). *Estadística para negocios y economía* . Cengage Learning.

Arcos-Adame, J.G. (2018). Dimensionamiento de sistemas de precalentamiento solar de agua para calderas utilizando energía solar y almacenamiento térmico. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, Cuernavaca, Mor, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Barrera-Ayar, R. (2017). Diseño de un sistema de catación solar de mediana temperatura. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, Cuernavaca, Mor, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Bouhal, T., Agrouaz, Y., Allouhi, A., Kousksou, T., Jamil, A., El Rhafiki, T., and Zeraouli, Y. (2017). Impact of load profile and collector technology on the fractional savings of solar domestic water heaters under various climatic conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(18), 13245–13258.

Duffie, J.A., Beckman, W.A., and WM, W. (2013). *Solar engineering of thermal processes*, volume 3. Wiley Online Library.

Frasquet, M. (2016). Shipcal: Solar heat for industrial processes online calculator. *Energy Procedia*, 91, 611–619.

Gao, Y., Zhang, Q., Fan, R., Lin, X., and Yu, Y. (2013). Effects of thermal mass and flow rate on forced-circulation solar hot-water system: comparison of water-in-glass and u-pipe evacuated-tube solar collectors. *Solar Energy*, 98, 290–301.

Hazami, M., Naili, N., Attar, I., and Farhat, A. (2013). Solar water heating systems feasibility for domestic requests in tunisia: Thermal potential and economic analysis. *Energy conversion and management*, 76, 599–608.

Helmke, A.A., Hess, S., and Platzer, W. (2015). Suggestion for Reference Cases Subtask C2 Simulation. *Integration Guideline. IEA SHC Task*, 49, 1–16.

INEGI (2018a). Global solar atlas. `https://globalsolaratlas.info`. Accesado: 2019-03.

INEGI (2018b). Producto interno bruto por entidad federatíva 2017. `https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/OtrTemEcon/PIBEntFed2017.pdf`. Accesado: 2019-03.

Jannesari, H. and Babaei, B. (2018). Optimization of solar assisted heating system for electro-winning process in the copper complex. *Energy*, 158, 957–966.

Kalogirou, S.A. (2005). Use of artificial intelligence for the optimal design of solar systems. *International journal of computer applications in technology*, 22(2/3), 90–103.

Lugo, S., García-Valladares, O., Best, R., Hernández, J., and Hernández, F. (2019). Numerical simulation and experimental validation of an evacuated solar collector heating system with gas boiler backup for industrial process heating in warm climates. *Renewable energy*, 139, 1120–1132.

Ortega, H. (2018). Energía solar térmica para procesos industriales en méxico, estudio de mercado. SENER; CONUEE; ANES; cooperación akemana;giz.

Payback, S. (2018). Calor solar para la industria méxico.

Pérez-Grajales, E.V. (2015). Simulación de sistemas de aprovechamiento de la energía solar. Instituto Tecnoógico de Tuxtla Gutiérrez.

Quijera, J.A., Alriols, M.G., and Labidi, J. (2014). Integration of a solar thermal system in canned fish factory. *Applied thermal engineering*, 70(2), 1062–1072.

Silva, R., Berenguel, M., Pérez, M., and Fernández-Garcia, A. (2014). Thermo-economic design optimization of parabolic trough solar plants for industrial process heat applications with memetic algorithms. *Applied Energy*, 113, 603–614.

Yaïci, W. and Entchev, E. (2016). Adaptive neuro-fuzzy inference system modelling for performance prediction of solar thermal energy system. *Renewable Energy*, 86, 302–315.

Análisis de la microestructura de una caja de conexión de Aluminio fundido mediante un estudio metalográfico

Trejo-Enríquez, A.* Urriolagoitia-Sosa, G. Romero-Ángeles, B.***Correa-Corona, M.**** Islas-Jiménez, D.I.***** y Espinosa-Hernández, M.E.****** Urriolagoitia-Calderón, G.*******
ponchoponchotrejo@outlook.com*guiurri@hotmail.comromerobeatriz97@hotmail.com***ingenieria.ivan.95@gmail.com****islas1718jmz@gmail.com*****mespinosahe@ipn.mx******urrio332@hotmail.com*******

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, Colonia Lindavista, Código Postal 07300, Ciudad De México, México.

Resumen: En este trabajo de investigación, se realizará un análisis mecánico–metalúrgico de una caja de conexión hecha de la aleación de Al – 36% Mg. (manufacturada por fundición en molde de arena). El objetivo principal de esta investigación es analizar los defectos que se presentan durante la colada y proponer alternativas para disminuir el espesor de las paredes de la caja.

Finalmente, se establece la relación que tienen las propiedades mecánicas de la caja con el proceso de manufactura utilizado para su fabricación, la pieza se sometió a un análisis metalográfico experimental para verificar la homogeneidad y el tamaño de grano en la microestructura obtenida. Los resultados del análisis experimental se tomaron como base para el estudio de optimización de espesores, obteniendo como resultado sólo un 5% de reducción de éstos.

Palabras clave: Propiedades mecánicas, fundición, manufactura, optimización, análisis metalográfico.

1.- INTRODUCCIÒN

En México en la última década, la industria de la fundición de piezas vaciadas en Aluminio y sus aleaciones han presentado un desarrollo considerable, principalmente por el crecimiento de la industria automotriz. Esto ha sido posible debido al mejoramiento en los procesos metalúrgicos, que permiten obtener piezas con las más altas propiedades mecánicas que mejoran el desempeño, eficiencia y la confiabilidad del producto, para ser más competitivos. La finalidad de este estudio es optimizar los recursos materiales sin comprometer la vida útil del componente. Las características microestructurales que más afectan las propiedades mecánicas de las aleaciones base Aluminio, son el tamaño y forma de grano; el espaciamiento de los brazos dendríticos; el tamaño y la distribución de fases secundarias y las inclusiones.

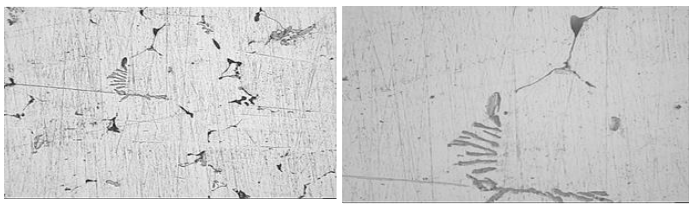


Fig 1.- Microestructuras características de una aleación de Aluminio.

En la Figura 1 se puede observar la microestructura a 500 X a diferentes velocidades de solidificación y con varios procesos de vaciado, en molde de arena, en molde permanente o en molde inyectado a presión. Puede apreciarse que el tamaño de grano disminuye con el incremento de la velocidad de enfriamiento. Algunas de estas características microestructurales, como son el tamaño de grano y el espaciamiento de los brazos dendríticos se controlan principalmente por la velocidad de enfriamiento durante la solidificación.

El tamaño de grano también depende de la presencia de elementos refinadores (principalmente Titanio y Boro) en la aleación. El tamaño de grano (Gonzales 2003, p. 117) y el espaciamiento Inter dendrítico son variables que afectan la dispersión de inclusiones y la presencia de fases secundarias, provocando cambios en las propiedades mecánicas de las piezas.

Con lo mencionado la reducción de espesores de la caja implica el riesgo de exponer equipos e instalaciones a una falla o mal funcionamiento. Por la inconsistencia del método que son fabricadas (fundición).

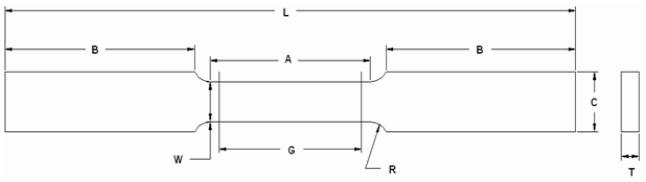
Por consecuente se hace un análisis de la microestructura, con el tamaño de grano requerido y los valores obtenidos. Se muestra la relación entre la resistencia a la tensión, de algunas

de las secciones de la caja, con los defectos encontrados. Se exponen los aspectos teóricos para el estudio de la reducción de defectos y el criterio de diseño para la optimización de espesores de la caja. Se expone el resultado de la optimización de los espesores de la caja, tomando como base la tabla de resultados y el valor de la presión soportada en la prueba hidrostática.

1.1 PROBETAS Y ESTUDIO METALOGRÁFICO DE LAS CAJAS

Se analiza la microestructura de la pieza, mediante un estudio metalográfico. Se busca comprobar el tamaño de grano (Garrido 2010, p. 157) y la presencia de defectos. Así mismo, la correspondencia entre la presencia de imperfecciones (asociada a una estructura indeseable) y el diseño de colada inadecuado junto a un proceso de producción no estandarizado. De acuerdo, a este planteamiento, para el análisis experimental se obtuvieron tres muestras, cortando tres cajas de conexión (marcadas con A, B, C) en secciones representativas de la caja. Se obtuvieron probetas, según norma *DIN 50125* de las secciones del fondo, paredes laterales y parte superior de la pieza, que consisten en una lámina de forma plana de 40 mm de longitud x 10 mm ancho x 5 mm de espesor. El material de la caja de conexión es una aleación Al–Mg, según ASTM, B 26 – 535. Se tomaron las muestras, tanto para el estudio metalográfico como para hacer las probetas para prueba axial de tensión como se muestra en la Figura 2.

En ellas se determina el tamaño de grano de las secciones de la pieza, el estudio muestra que la microestructura no es homogénea y se analizan los defectos encontrados.



A = 50 mm	B = 42 mm	C = 15 mm	G = 40 mm
L = 140 mm	T = 5 mm	W = 10 mm	R > = 35 mm

Fig 2.- Probeta de tensión

Los aspectos teóricos del estudio sientan la base para relacionar las propiedades mecánicas de la pieza con la caracterización de la microestructura obtenida a partir del estudio metalográfico (Skaupy 1955, p.127).

1.2.- REFINAMIENTO DE GRANO

El principio de que el tamaño del grano afecta a las propiedades de las aleaciones, ha sido conocido por la humanidad durante miles de años. De hecho, la primer referencia del tamaño del grano fino puede encontrarse en correspondencia que data de 1 500 *AC*, entre los faraones egipcios y los reyes hititas, los expertos fundidores de la época. Sin embargo, la asociación de la resistencia con el tamaño del grano y el tratamiento térmico fue sin duda conocida antes de este tiempo.

Hall-Petch y sus colaboradores fueron los primeros en relacionar el tamaño del grano, L, con el límite de cedencia y la resistencia a la rotura. Mostrando que el límite de cedencia variaba con el tamaño del grano -½ en un rango de tamaños de grano, entre 6 y 30 µm, de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\sigma_{lys} = \sigma_0 + k_y \, . \, L^{-½} \qquad \text{Ec. 1}$$

Donde; σ_{lys} = Resistencia de cedencia, punto de fluencia, punto de cedencia o límite elástico. (MPa), σ_0 = La tensión de fluencia para el material (constante, MPa), L= Tamaño promedio de grano (m), y k_y = Es conocida como parámetro de anclaje de las dislocaciones, que representa el aporte de endurecimiento relativo debido a los bordes de grano y es constante para cada material. (MPa / m ½). Sin embargo, en algunos estudios iniciales de Petch y sus colaboradores, el tamaño de grano utilizado fue denominado diámetro de grano. Ahora se considera que dicho término no tiene sentido dada la distribución típica de tamaños de grano en una aleación. Por lo tanto, la mayoría de los estudios llevados a cabo desde entonces han utilizado la intercepción lineal media como una medida del tamaño o diámetro de grano.

Tabla 1.- Constantes de Hall–Petch para algunos materiales

Material	σ_0 MPa	k_y MPa-m $^{-½}$
Aluminio	15.7	0.07
Cobre	25.5	0.11
Al – 3-6 %Mg	49.1	0.26
Cobre 70/30 (punto de cedencia)	45.1	0.31

A pesar de diversos errores de medición, un número importante de estudios ha mostrado diferencias en los valores para las constantes de la ecuación de *Hall – Petch*. Algunos de los cuales se muestran en la Tabla 1. Algunos autores han atribuido estas diferencias a los diversos métodos de medición del tamaño de grano. En algunos de sus primeros estudios, *Petch,* por ejemplo, ha citado al diámetro de grano como la medida del tamaño de grano y esta diferencia ha llevado a *Gladman* a concluir que este factor es parcialmente responsable del rango de las constantes de *Hall – Petch*. Si se analiza la teoría implícita en la ecuación de *Hall - Petch* surgen otros motivos de variabilidad.

 ISSN en trámite

2. ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA, CON EL TAMAÑO DE GRANO REQUERIDO Y LOS VALORES OBTENIDOS.

2.1.- CÁLCULO DEL TAMAÑO DE GRANO REQUERIDO.

Tomando como base el tamaño de grano observado en las diferentes secciones de la pieza, que se mostró, se realiza el cálculo del tamaño de grano presentados en la Tabla 2. Lo cual se puede elaborar utilizando la ecuación de Hall–Petch y los valores de las constantes de la Tabla 1.

Con la ecuación de *Hall–Petch*:

$\sigma_{lys} = \sigma_0 + k_y . L^{-½}$ y los valores de la Tabla 1;

$\sigma_0 = 49.1$ MPa y K = 0.26 MPa / m ^{½}

Tabla 2.- Resistencia a la tensión calculada en base al tamaño de grano

TAMAÑO DE GRANO ASTM	DIÁMETRO PROMEDIO (μm)	RESISTENCIA A LA TENSIÓN (MPa)
4	8.89	135.863
5	6.35	152.277
6	4.49	171.80
7	3.17	195.13
8.5	1.89	238.222

2.2.- RESULTADOS DE LA PRUEBA DE TENSIÓN

Los resultados que arroja la prueba de tensión de las secciones del fondo y de las paredes laterales de la pieza, permiten hacer el estudio comparativo del espesor. Se puede apreciar que las cajas A y C son las que tuvieron mejores resultados de la prueba de tensión, y que la caja B presenta resultados diferentes, lo que se asocia con el estudio metalográfico. Las muestras obtenidas de las tres cajas (*A, B* y *C*), fueron atacadas con solución *Tucker* durante *3* segundos, para observar el tamaño de grano a *10X*, con el que va a determinarse la resistencia a la tensión con la ecuación de semejanza [Ec.2].

$$L_0 = K\sqrt{S_0} \Rightarrow K = \frac{L_0}{\sqrt{S_0}};$$

$$\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = \frac{L_0}{\sqrt{S_0'}} = ... = K \qquad \text{Ec.2}$$

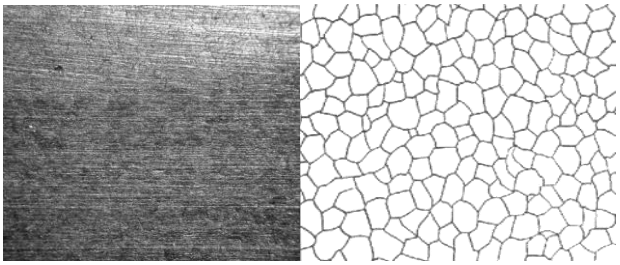


Fig 3.- Pieza *A*, sección 5 (fondo) Macroataque *10X*.

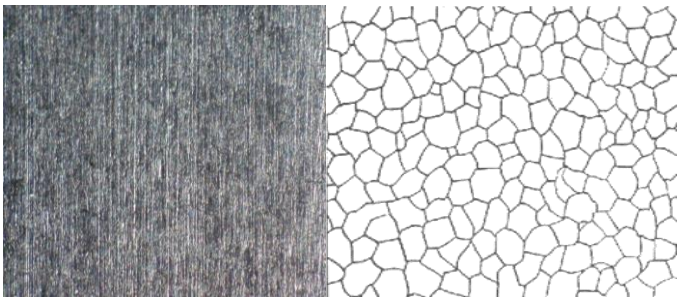


Fig 4.- Pieza *C*, sección 19 (fondo) Macroataque *10X*.

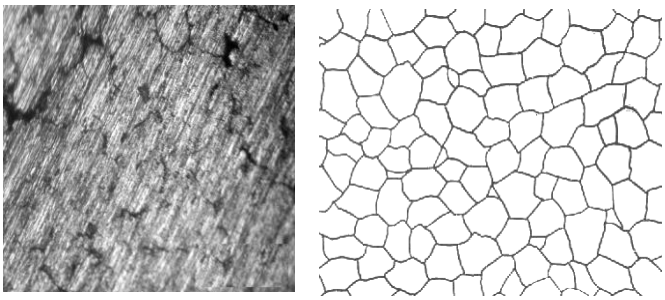


Fig 5.- Pieza *B*, sección 12 (fondo) Macroataque *10X*.

Las metalografías muestran que la porosidad de esa zona de la pieza es provocada por un tamaño de grano grande, lo que crea un problema de contracción en esa zona, aunado a que se trata de la zona con puntos más calientes, ya que es la zona que enfría al último. Esto es causado porque el diseño del molde no es el adecuado, debido a que el alimentador (bebedero) está colocado encima de dicha sección de la pieza. Lo cual como puede observarse en los resultados de las muestras, es inadecuado ya que provoca un mayor número de defectos en esa sección de la caja (Figura 6).

 ISSN en trámite

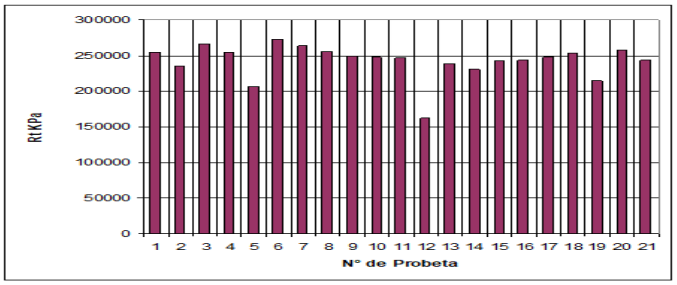


Fig 6.- Gráfica de resistencia a la tensión (KPa) vs. N.º de probeta

2.3.- CÁLCULO ANALÍTICO DE ESFUERZO

Para realizar el cálculo, tanto de la deflexión que puede presentar las paredes de la caja de conexión como de la resistencia a la tensión que puede soportar, se hace un análisis de las secciones. Lo que se puede efectuar analizando las secciones de la caja como placas planas sujetas a una carga uniforme y se analiza el criterio a aplicar para este estudio, por medio de la teoría de fallas (Figura 6).

2.4.- PLACAS PLANAS

El análisis de placas planas sujetas a cargas laterales es muy complicado, porque las placas se flexionan en todos los planos verticales. Por eso se han logrado deducciones matemáticas estrictas sólo en algunos casos especiales. La mayor parte de las fórmulas disponibles contienen cierto empirismo racional. Las placas pueden clasificarse en:

1) *Placas gruesas.* - El más importante el esfuerzo cortante transversal.
2) *Placas de espesor promedio.* - Predomina el esfuerzo por flexión.
3) *Placas delgadas.* - Dependen en parte de la tensión directa.
4) *Membranas.* - Miembros de pared muy delgada que se sujetan sólo a tensión directa. Sin embargo, no existen líneas exactas de demarcación.

Las fórmulas utilizadas para elementos mecánicos de placas planas se aplican principalmente a las placas de espesor promedio, de espesor constante y con carga simétrica. En el análisis matemático, no se toma en cuenta en general la redistribución de esfuerzos, a causa de la ligera fluencia local. Puesto que esta fluencia, sobre todo en materiales dúctiles, es benéfica.

Los esfuerzos máximos en placas circulares y rectangulares se calculan mediante:

$$S_M = k\frac{wr^2}{t^2} \qquad \text{Ec.3}$$

La Ecuación 3 es para una carga uniformemente distribuida, *w*.

Las combinaciones de estas cargas pueden tratarse por superposición. Los factores *k* se dan en tablas [3.1], donde *R* es el radio de las placas circulares o un lado de las placas rectangulares y *t* es el espesor de la placa (*r* = *R*, para placas circulares y *r* = lado menor, para placas rectangulares).

La deflexión máxima para los mismos casos está dada por:

$$y_M = k_1\frac{wr^4}{Et^3} \qquad \text{Ec.4}$$

3.- ANÁLISIS ANALÍTICO

La presión mínima especificada que debe soportar este tipo de caja, en la prueba hidrostática, es de 38.610 MPa [IV.4]. Con este valor se obtiene la fuerza aplicada sobre las paredes de la caja, para calcular los espesores requeridos.

Datos para la sección 1 (fondo de la caja):

Carga uniforme (*w*) = 3.861 MPa, Módulo de Young (*E*) = 70.01 GPa, Lado menor de la placa (*r*) = 85 x 10^{-3} m, Lado mayor de la placa (*R*) = 90 x 10^{-3} m, Espesor de la placa (*t*) = 9.5 x 10^{-3} m, Lado mayor/lado menor = *R*/*r* = 1.05

La relación R/r se obtiene el valor numérico para poder observar el valor de *k* y k_1 que se obtienen de tablas.

Coeficiente *k* = 0.308 y Coeficiente k_1 = 0.0138

Se calculó el esfuerzo máximo soportado por la placa de con la Ecuación 3:

$$S_M = k\frac{wr^2}{t^2} = 0.308\frac{(3.861MPa)(85x10^{-3}m)^2}{(9.5x10^{-3}m)^2} = 95.201MPa$$

Se calculó la deflexión máxima en esa sección, con la Ecuación 5:

$$Y_M = k_1\frac{wr^4}{Et^3} = 0.0138\frac{(3.861MPa)(85x10^{-3}m)^4}{(70.01GPa)(9.5x10^{-3}m)^3} = 4.63x10^{-5}m = 0.046mm$$

Los cálculos para las secciones 2 y 3 (paredes laterales) se realizan con los valores de las constantes para una placa rectangular fija en un borde y simplemente apoyada en los otros tres bordes:

Datos para la sección 2 (lateral 8 y 9):

Carga uniforme (*w*) = 3.861 MPa, Módulo de Young (*E*) = 70.01 GPa, Lado menor de la placa (*r*) = 67 x 10^{-3} m, Lado mayor de la placa (*R*) = 85 x 10^{-3} m, Espesor de la placa (*t*) = 14.7 x 10^{-3} m, Lado mayor/lado menor = *R*/*r* = 1.269

La relación R/r se obtiene el valor numérico para poder observar el valor de *k* y k_1 que se obtienen de tablas.

Coeficiente $k = 0.670$ y Coeficiente $k_1 = 0.070$

Se calculó el esfuerzo máximo soportado por la placa 8 Y 9 de con la Ecuación 2:

$$S_M = k\frac{wr^2}{t^2} = 0.67\frac{(3.861MPa)(67x10^{-3}m)^2}{(14.7x10^{-3}m)^2} = 53.739MPa$$

Se calculó la deflexión máxima en esa sección, con la Ecuación 5:

$$Y_M = k_1\frac{wr^4}{Et^3} = 0.07\frac{(3.861MPa)(67x10^{-3}m)^4}{(70.01GPa)(14.7x10^{-3}m)^3} = 2.45x10^{-5}m = 0.024mm$$

Datos para la sección 3 (lateral 6 y 7):

Carga uniforme (*w*) = 3.861 MPa, Módulo de Young (*E*) = 70.01 GPa, Lado menor de la placa (*r*) = 67 x 10^{-3} m, Lado mayor de la placa (*R*) = 90 x 10^{-3} m, Espesor de la placa (*t*) = 914.7 x 10^{-3} m, Lado mayor/lado menor = *R/r* = 1.343

La relación R/r se obtiene el valor numérico para poder observar el valor de *k* y k_1 que se obtienen de tablas.

Coeficiente $k = 0.670$ y Coeficiente $k_1 = 0.070$

Se calculó el esfuerzo máximo soportado por la placa 6 y 7 de con la Ecuación 2:

$$S_M = k\frac{wr^2}{t^2} = 0.67\frac{(3.861MPa)(67x10^{-3}m)^2}{(14.7x10^{-3}m)^2} = 53.739MPa$$

Se calculó la deflexión máxima en esa sección:

$$Y_M = k_1\frac{wr^4}{Et^3} = 0.07\frac{(3.861MPa)(67x10^{-3}m)^4}{(70.01GPa)(14.7x10^{-3}m)^3} = 2.45x10^{-5}m = 0.024mm$$

Se comprueba que los resultados obtenidos pueden ser validados por medio simulación numérica, mediante paquetes computacionales que utilizan el método de elemento finito, método de frontera y otros.

Para el análisis analítico solo se tomó la Ec.2 y la Ec.5 que son para una carga uniformemente distribuida que son aquellas que se aplican y retiran varios miles de veces durante la vida útil diseñada de la pieza. Bajo cargas repetidas, una pieza se fractura por el mecanismo de fatiga a un nivel de esfuerzo mucho menor que el que podría causar fractura bajo una carga estática. Por esto, se requiere un factor de diseño de *N = 8*. Además, las concentraciones de esfuerzo deben tomarse en cuenta puesto que las fallas por fatiga se originan, con frecuencia, en puntos de concentración de esfuerzos. Cuando se cuenta con datos para el límite de fatiga de un material, el esfuerzo de diseño puede calcularse de:

$$\sigma_d = \frac{s_n}{N} \qquad \text{Ec.5}$$

Donde *Sn* es la resistencia a la fatiga [Ec.4].

Tabla 3.- Criterios para esfuerzo de diseño; esfuerzos normales directos

Forma de carga	Material dúctil	Material frágil
Estática	$\sigma_d = S_y/2$	$\sigma_d = S_u/6$
Repetida	$\sigma_d = S_y/8$	$\sigma_d = S_u/10$
De impacto o de choque	$\sigma_d = S_y/12$	$\sigma_d = S_u/15$

3.1.- CÁLCULO ANALÍTICO DE ESPESORES

Puesto que los materiales quebradizos no presentan cedencia, el esfuerzo de diseño debe basarse en la resistencia última. Con este criterio de diseño para materiales quebradizos y forma de carga repetida, se procede a calcular los espesores de las secciones con los datos obtenidos y los valores de la presión soportada, en la prueba hidrostática P = 3.861 MPa (560 psi). Si; P = F/A => F = P x A

A_1 = Largo$_1$ x Ancho$_1$ = (0.09 m x 0.085 m) = 7.65 x 10^{-3} m^2

A_2 = Lasrgo$_2$ x Ancho$_2$ = (0.067 m x 0.085 m) = 5.695 x 10^{-3} m^2

A_3 = Largo$_3$ x Ancho$_3$ = (0.067 m + 0.90 m) = 6.03 x 10^{-3} m^2

Por consiguiente:

F_1 = Presión x Area$_1$ = (3.861 MPa) (7.65 x 10^{-3} m^2) = 29,536.65 N

F_2 = Presión x Area$_2$ = (3.861 MPa) (5.695 x 10^{-3} m^2) = 21,988.39 N

F_3 = Presión x Area$_3$ = (3.861 MPa) (6.03 x 10^{-3} m^2) = 23,281.0 N

Con estos valores se hace ahora el cálculo de los espesores requeridos de acuerdo a la Tabla 3, para los factores de diseño *N = 8* y *N = 10*. Con la misma metodología se calculó el factor requerido si los espesores fueran, en un caso el espesor de la probeta de tensión ensayada (5 mm) y en otro el espesor real de la pieza (9.4 mm y 14.73 mm) en esas secciones, dando esto como resultado los valores presentados en la Tabla 4. La cual muestra los espesores calculados con los valores encontrados, comparados con los que se encuentran a partir de los factores, *N = 6*, de acuerdo al espesor de la probeta.

 ISSN en trámite

Tabla 4.- Cálculo de espesores del fondo y laterales de la caja

CÁLCULO TEÓRICO DE ESPESORES		
PRESIÓN SOPORTADA	3.861	MPa
RESISTENCIA ULTIMA 1(Su)	95.201	MPa
RESISTENCIA ULTIMA 2Su)	53.739	MPa
RESISTENCIA ULTIMA 3(Su)	53.739	MPa

ÁREA = LARGO x ANCHO (m^2)		
ÁREA 1 = (0.090 m x 0.085 m)	7.650×10^{-3}	m^2
ÁREA 2 = (0.085 m x 0.067 m)	5.695×10^{-3}	m^2
ÁREA 3 = (0.090 m x 0.067 m)	6.03×10^{-3}	m^2
FUERZA = PRESIÓN x ÁREA (Mpa x m^2 = N)		
FUERZA 1 = (3.861) (7.65×10^{-3})	29,536.65	N
FUERZA 2 = (3.861) (5.695×10^{-3})	21,988.395	N
FUERZA 3 = (3.861) (6.03×10^{-3})	23,281.0	N

ESFUERZO DE DISEÑO $\sigma_d = Su / N$ (MPa)			FACTOR DE DISEÑO (N)
15.867	8.95	8.95	6
11.9	6.717	6.717	8
9.52	5.374	5.374	10

ÁREAS CALCULADAS (m^2)			
$A_1 = F_1 / \sigma_d$	1.864×10^{-3}	2.45×10^{-3}	2.59×10^{-3}
$A_2 = F_2 / \sigma_d$	2.48×10^{-3}	3.27×10^{-3}	3.46×10^{-3}
$A_3 = F_3 / \sigma_d$	3.10×10^{-3}	4.09×10^{-3}	3.920×10^{-3}

PERÍMETROS (m)	
1	0.350
2	0.304
3	0.314

ESPESORES CALCULADOS (m)			
FACTOR DE DISEÑO (N)	N = 6	N = 8	N = 10
ESPESOR t_1 = ÁREA 1 / PERÍMETRO 1	5.31×10^{-3}	7.09×10^{-3}	8.86×10^{-3}
ESPESOR t_2 = ÁREA 2 / PERÍMETRO 2	8.07×10^{-3}	10.77×10^{-3}	13.46×10^{-3}
ESPESOR t_3 = ÁREA 3 / PERÍMETRO 3	8.27×10^{-3}	11.03×10^{-3}	13.79×10^{-3}

De acuerdo, a las premisas expuestas anteriormente, se realiza un cálculo analítico, con los resultados experimentales obtenidos y los factores de diseño seleccionados. Adicionalmente, se calculó el porcentaje de reducción de espesores de la pieza.

Con base, a los valores obtenidos analíticamente se puede calcular el porcentaje de reducción de espesores de las secciones de la pieza, con respecto a los espesores reales. Para la sección del fondo se estima una reducción del 6.73%, para la sección lateral 6 y 7 se estima una reducción del 8.43% y para la sección lateral 8 y 9 una reducción del 6.14%.

La estimación de reducción del espesor de las secciones de la caja de conexión se ve claramente afectada por la presencia de defectos de contracción e inclusiones en la pieza, por lo que una reducción del 5% sería una propuesta más viable.

De este estudio se deduce que las probetas elaboradas, de la pieza B, presentaron valores más bajos que las otras dos debido a la presencia de microestructuras indeseables, a un tamaño de grano relativamente grande y a problemas de contracción, derivados de una mala práctica de colada, lo que redunda en una cantidad inconveniente de piezas rechazadas, lo que incrementa los costos de manufactura.

4.- ANÁLISIS NUMÉRICO

En este análisis, se basa en el Método de Elemento Finito (ANSYS,2005. Manual, 10.0.) por medio de un programa computacional *ANSYS®* para la evaluación de la caja propuesta con una reducción de paredes del 5%. En esta evaluación se presenta el estudio del campo de esfuerzos obtenidos en la caja, bajo la acción de una carga súbita. Sin embargo para poder hacer el diseño de esta caja partimos de un análisis mecánico, donde se puede obtener las propiedades de las secciones de la caja de conexión y es posible hacer un cálculo para reducir los espesores de la misma. En la Tabla 5 se muestran en forma general las medidas de la caja de conexión y en las Figuras 7 y 8 las vistas de ella.

ISSN en trámite

Tabla 5.- Dimensiones y peso de la caja de conexión

MATERIAL: Aleación Al – Mg, 535		
	Medidas	
Secciones	mm	Pulgadas
A	159.00	6.26
B	108.20	4.26
C	258.06	10.16
D	207.26	8.16
E	19.81	0.78
F	152.40	6.00
G	101.60	4.00
H	105.66	4.16
J	14.73	0.58
K	9.65	0.38
L	12.70	0.50
M	57.15	2.25
N	107.95	4.25
O	127.00	5.00
P	76.20	3.00
R	12.70	0.50
T	8.89	0.35
PESO	3.90 KG	8.60 LBS

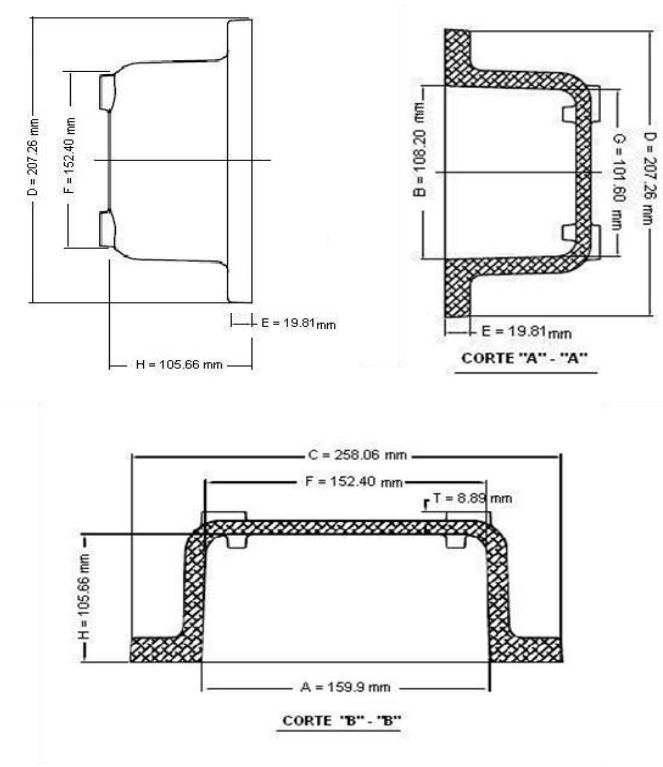


Fig 7- Esquema de la caja de conexión. Vista lateral

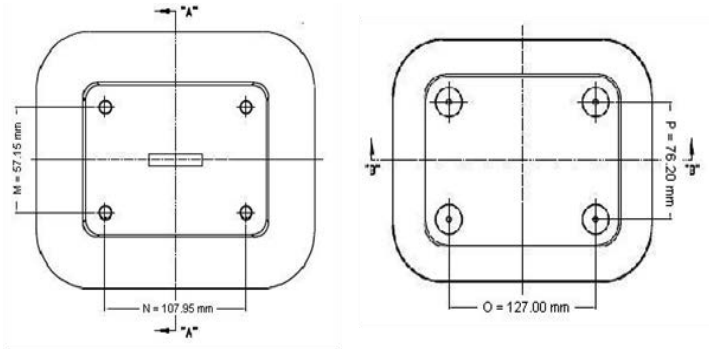


Fig 8- Esquema de la caja de conexión. Vista de planta.

4.1.- FUNDAMENTOS GENERALES DEL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

El Método del Elemento Finito (MEF), es una técnica numérica utilizada para obtener una solución aproximada de problemas de valor frontera en Ingeniería. Los problemas de valor frontera son algunas veces llamados problemas campo. De esta forma, las variables campo son dependientes gobernadas por una ecuación diferencial. Las condiciones de frontera son valores especificados de variables de campo en los límites del campo. Dependiendo del tipo de problema físico siendo analizado, las variables de campo deben incluir desplazamientos físicos, temperatura, flujo de calor y velocidad del fluido por nombrar algunos.

 ISSN en trámite

4.2.- DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema medular del análisis numérico propuesto en este trabajo de investigación es cuantificar el nivel de esfuerzos que se presentan en la caja con una reducción de paredes del 5% y bajo el efecto de una carga súbita.

El análisis será una evaluación elástica donde el Módulo de Elasticidad E es igual a 70 MPa y el Módulo de Poisson es de 0.29. Se decidió realizar un análisis en 3D y utilizar un elemento SOLID BRICK de 20 nodos. La carga que se aplicó en forma súbita y por la geometría de la caja de decidió realizar un mallado libre (Figura 9).

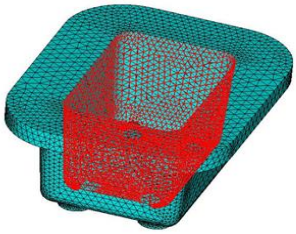


Fig 9.- Aplicación de la carga y restricciones de movimiento

La solución para este tipo de problemas se establece de una manera muy sencilla, ya que lo único que se debe de realizar es mandar al modelo a resolver. Posteriormente se piden los resultados.

Los resultados pueden ser solicitados o evaluados de diferentes maneras, ya sean esfuerzos de diferentes formas y deformaciones. En las siguientes figuras se presentan los resultados más significativos.

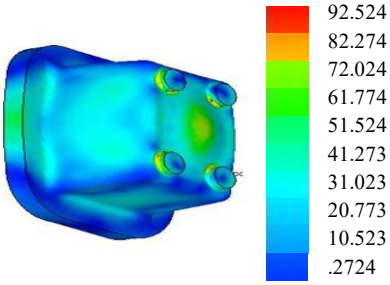


Fig 10.- Esfuerzos Von Mises parte posterior de la caja (MPa)

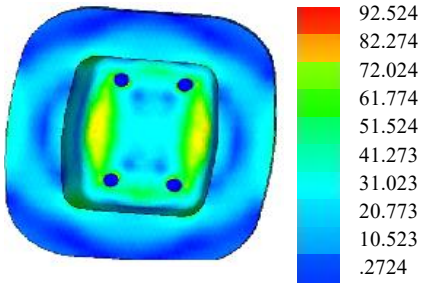


Fig 11.- Esfuerzos Von Mises parte frontal de la caja (MPa)

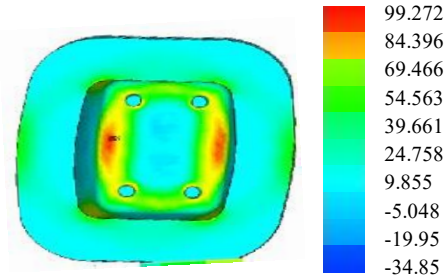


Fig 12.- Esfuerzos principales parte frontal de la caja (MPa)

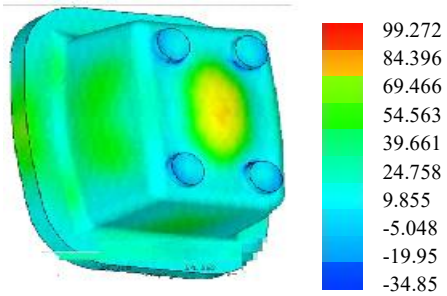


Fig 13.- Esfuerzos principales parte posterior de la caja (MPa)

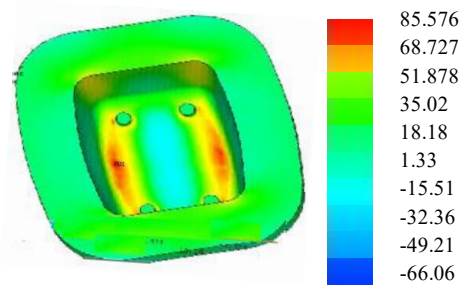


Fig 14.- Esfuerzos axiales en x parte frontal de la caja (MPa)

 ISSN en trámite

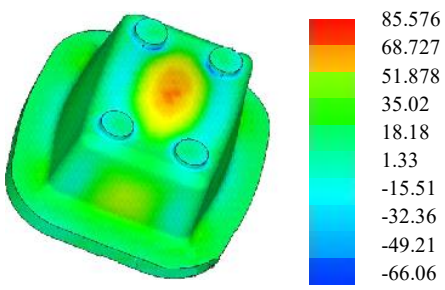


Fig 15.- Esfuerzos axiales en x parte posterior de la caja (MPa)

Los resultados arrojados por el análisis numérico la variación de los colores representa del mínimo con el color azul fuerte hasta el máximo con el color rojo que comprende donde el material sufre mayor impacto por la carga aplicada con tensión por ello se muestra en la caja de conexión la variación de colores con la tensión máxima admisible por el material, esta puede ser la correspondiente al límite elástico.

Por medio de los resultados obtenidos por el análisis numérico, se puede comprobar que todos los esfuerzos encontrados no están cerca del esfuerzo de cedencia del material. Por tal motivo se puede rápidamente concluir que la optimización de la caja es posible y que un 5% puede considerarse conservador.

5.- CONCLUSIONES

La sección de la caja que muestra menores propiedades mecánicas, es la sección del fondo. Esta sección tiene la particularidad de que contiene el alimentador de la pieza (bebedero). Es decir, es la parte que enfría al final, provocando con esto una microestructura con mayor número de defectos que el resto del componente. Estos defectos en la estructura interna de la pieza, son la causa más probable de las menores propiedades encontradas en la pieza *B* de este estudio.

En esta investigación se puede concluir entre otras cosas, que es posible reducir los espesores de la caja de conexión de Al- 36% Mg. fundido en una proporción razonable del 5%, sustentado en el estudio analítico y corroborado por medio del análisis numérico. Con la reducción propuesta se garantiza que bajo las condiciones de trabajo bajo las cuales se hizo este estudio el producto no fallara en servicio. Asimismo, se deja abierta la posibilidad para el análisis futuro de la caja de fundición, usada para la obtención de la pieza, buscando optimizar el diseño y de esta forma reducir los defectos ocasionados en el proceso de manufactura.

6.- REFERENCIAS

1.- Gonzales, J. L.,2003. Metalurgia mecánica, Ed. LIMUSA, pp 63-75.

2.- Charles P., Frank J., 2003. Introducción a la nanotecnología, Ed. REVERTÉ, pp 82-94.

3.- Ashby, M. F. 2008. Materiales para ingeniería 1 Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño, Ed. REVERTÉ. Pp 123-140.

4.- Garcia-Garrido, S., 2010. La contratacioin del mantenimiento industrial: procesos de externalización, contratos y empresas de mantenimiento, Ed. Diaz de Santos, pp 110-120.

5.- Mott, R. L.,1996. Resistencia de Materiales Aplicada, 3rd edn., Prentice Hall Hispanoamericana.

6. - ANSYS,2005. Manual, 10.0.

7. -Boresi A., Schmidt R. y Sidebottom O.,1993. Advanced Mechanics of Materials, 5th edn, Nueva York, John Wiley & Sons..

8. - Urriolagoitia-Sosa, G., Durodola, J. F. y Fellows, N. A.,2004. Determination of Tensile and Compressive Stress Strain Curves from Bend Tests, *Applied Mechanics and Materials*, pp 133-138.

9.- Taylor, H. F., Flemings, M. C. y Wulff, J.,1962. Fundición para Ingenieros, Cia. Ed. Continental, México, pp 39-47.

10.- Skaupy, F., 1955. Ceramica de los Metales, Ed. REVERTÉ.

11.- Sopeña e Irabien, J. A.,1968. Aceros; Productos y Derivados, Ed. Comercial Sidero Metalúrgico Velasco.

12.- Reed Hill, R. E.,1977. Principios de Metalurgia Física, Ed. Continental, pp 431-433.

13.- González, J. L.,1999. Metalurgia Mecánica, Ed. Limusa, pp 117.

14.- Kelly, A. y Nicholson, R.,1972. Strengthening Methods in Crystals, Ed. Halstead Press Division, pp 332 y 545.

15. - Norma ASTM, B 26 – 535, 2005

16. - Gladman, T,.1997. The Physical Metallurgy of Micro Alloyed Steels, The Institute of Materials, pp 217-235.

Viabilidad económica de la nanofiltración fotovoltaica de baja presión en San Luis Potosí

Almonte-Lemus Mauricio y Flores-Prieto José Jassón

Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, CP 62490 México; e-mail: mauricio_a_l@hotmail.com, jose.fp@cenidet.edu.mx; Tel: 777-362-7770.

Resumen: En este trabajo se presenta un estudio de viabilidad económica de la aplicación de la nanofiltración fotovoltaica a baja presión (NF-FV-BP) en San Luis Potosí, considerando un comparativo de los costos actuales del agua en el lugar de estudio. La capacidad de permeado del sistema, el valor actual neto (VAN), y los costos nivelados (CNV), se utilizaron como indicadores en el análisis. En TRANSYS se realiza la simulación del proceso y se estima la potencia fotovoltaica en función del recurso solar, el bombeo en función de la potencia fotovoltaica, el permeado nanofiltrado en función del bombeo fotovoltaico y los indicadores financieros en función del permeado. La diferencia entre lo simulado y lo reportado de experimentos en campo fue hasta de 12.50% para el permeado. El VAN y CNV resultaron de 168 mil *MXN* y 38.51 MXN/m^3, respectivamente. Considerando la tarifa industrial del agua en San Luis Potosí, el sistema de NF-FV-BP resultó viable al resultar 2.99 MXN/m^3 más barato.

Keywords: Nanofiltración solar, tratamiento de agua salobre, tratamiento de agua en cuencas endorreicas.

1. INTRODUCCIÓN

La escasa distribución, el desperdicio y la contaminación ha venido limitando abastecimiento de agua de calidad en hogares, campos, industrias y ecosistemas. La WWAP, (2018) determinó que la demanda mundial de agua es de 4600 $km^3/año$, y se incrementa año con año, creando aún más el desabasto. México no es la excepción de desabasto del agua. El desabasto de agua ha dado lugar a la búsqueda de alternativas para su almacenamiento, ahorro y uso eficiente, tratamiento, desalinización y distribución.

El 76% del consumo de agua está destinada a la agricultura, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Comisión Nacional del Agua (2016). La nanofiltración es una alternativa que se distingue por la capacidad de separar solutos divalentes, tales como iones de calcio, sulfato y magnesio, suavizando el agua, sin requerir de adición de iones de sodio, permitiendo su aplicación para el caso del riego agrícola de acuerdo a D'Costa (2015) Abdel-Fatah (2018), Flores-Prieto *et al.,* (2015) y Labban *et al.,* (2017). Sin embargo, para su aplicación es importante distinguir la zona de aplicación, calidad del agua y aplicación posterior al proceso. Diversos autores como Alghoul *et al.,* (2016); Alsheghri *et al.,* (2015); Bilton *et al.*, (2011); Fierro *et al.,* (2012); García-Martín *et al.,* (2014) y Oh *et al.,* (2009) han modelado sistemas de desalinización enfocados principalmente en osmosis inversa, dejando a un lado el proceso de nanofiltración.
Por su parte, Zarzo y Prats (2018) determinaron que los costos de tratamiento, control y almacenamiento dependen en gran medida al consumo energético, llegando a representar el 50-60% del costo total. La nanofiltración fotovoltaica NF-FV al ser impulsada por una fuente energética variable, dificulta determinar los costos totales.

La competitividad económica de la NF-FV se ha estimado de manera limitado en el país, limitando su desarrollo y la penetración de la tecnología en el mercado. En este trabajo se presenta un estudio económico de nanofiltración fotovoltaica, considerando un trabajo experimental realizado en Rio Verde, San Luis Potosí, para identificar su viabilidad económica de basándose en un comparativo del CNV simulado respecto a las tarifas de agua en la región.

Sistema de nanofiltración

En la Figura 1 se muestra el sistema de nanofiltración propuesto, el cual se compone de ocho módulos fotovoltaicos de 255 *W*, cuatro en serie y dos en paralelo, una bomba marca Grunfos 16-SQF-10 de 1400 *W*, un filtro de microfiltración, cuatro membranas de nanofiltración modelo ESNA1-LF-LD-4040, dos en paralelo y dos en serie. El sistema capta la irradiancia solar (*G)* sobre la superficie de los módulos fotovoltaicos, los módulos fotovoltaicos mediante el efecto fotoeléctrico generan potencia (*Wph)*, la cual, impulsa la bomba hidráulica de corriente directa. La bomba hidráulica impulsa el agua salobre a una presión (*Ps)*, potencia (*Wp)* y caudal de agua salitrosa. El caudal (*Qs)* dependen de la irradiancia solar. La fricción y sus componentes consumen energía del desplazamiento del agua, generando caídas de presión. El *Qs* impulsado por la bomba pasa por la

membrana de nanofiltración a una concentración (*Cs)*, el cual en membrana de NF se separa en dos caudales; caudal de permeado (*Qp)* y caudal de rechazo *(Qd)*, con concentración de permeado (*Cp*) y de rechazo (*Cp*).

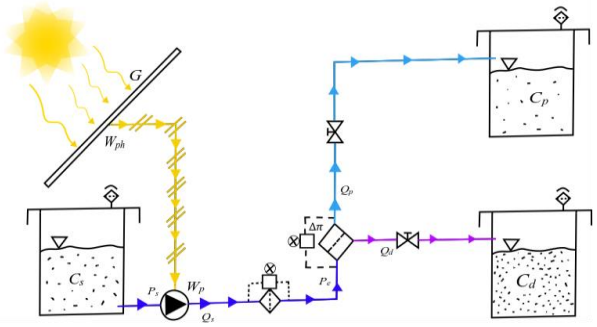


Figura 1 *Sistema de nanofiltración.*

Lugar de estudio y calidad del agua

La zona de estudio se consideró representativa de cuencas con drenaje ineficiente con sedimentos salinos, al estar cerrada y carecer de grandes corrientes superficiales, lo que conlleva a la acumulación de sedimentos. La localidad se ubica en la Región Hidrológica RH26 de la cuenca del río Pánuco en la subcuenca Aj Río Verde, en el municipio de Río Verde, San Luis Potosí SLP situada a, 99° 48′ 34.84′′ longitud oeste del Meridiano de Greenwich a los 21° 59′ 16.98′′ latitud norte; a una elevación de 1 065 *m*. La localidad presenta una irradiación promedio diaria de 6.3 kWh/m^2-*d*, clima seco-semi-cálido, con una temperatura media anual de 24°C y precipitación pluvial de 479.5 *mm*. La calidad del agua de la cuenca es de 2195 *ppm*.

2. METODOLOGÍA

El CNV se compara respecto a las tarifas industriales, comerciales y domesticas actuales, en el caso de que el CNV reste menor a las tarifas actuales, entonces el sistema se considera viable. En la Figura 2 se muestran la metodología que se utilizó para determinar la viabilidad de la nanofiltración en el lugar de estudio, que se divide en tres rubros; análisis energético-hidráulico por componentes, análisis económico y análisis comparativo.

Análisis energético-hidráulico por componentes

El análisis inicia identificando la zona de estudio y el histórico de costos del agua en la localidad de acuerdo a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Comisión Nacional del Agua (2016). En el caso de años posteriores, el comportamiento de las tarifas industrial, comercial y doméstico se ajusta con regresiones lineales. La capacidad de permeado anual del NF-FV-BP se determina empleando TRNSYS®, basado en modelación por componentes en estado transitorio. En la Figura 3 se muestra la configuración del programa de simulación que se subdivide en cuatro rubros: *a)* modelación climática, *b)* modelación fotovoltaica, *c)* modelación de bombeo y *d)* modelación de permeado.

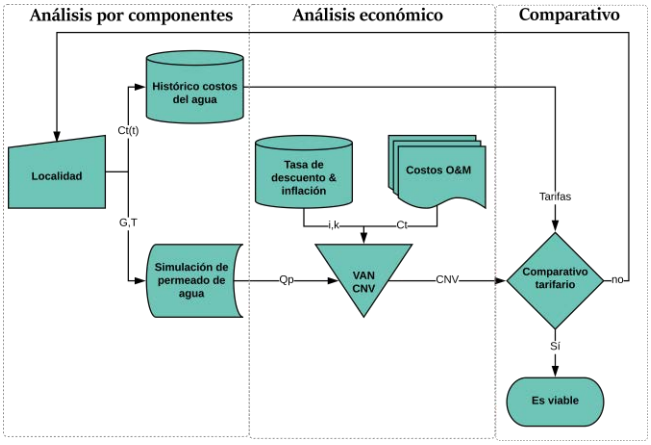


Figura 2 *Metodología del análisis.*

La modelación considera datos meteorológicos de irradiancia, temperatura del aire y velocidad del viento de un año típico. Los datos se obtienen de METEONORM®. Como se muestra en la Figura 3, la entrada de la simulación son los datos meteorológicos que, con el modelo de Pérez, se ajustan para determinar las variables a pasos de tiempo menores. La simulación del sistema fotovoltaico, toma como datos de entrada la irradiancia incidente y la temperatura del aire. El modelo de los cinco parámetros, permite determinar la tensión y corriente de suministro por la irradiación incidente en el intervalo de tiempo establecido. El modelo de Gherbi *et al.* (2017) permite simular el bombeo fotovoltaico, a partir de la tensión y corriente de suministro, proporcionando el caudal y la presión de suministro. El modelo de concentración y polarización permite simular el comportamiento del permeado a partir del caudal y la presión de suministro.

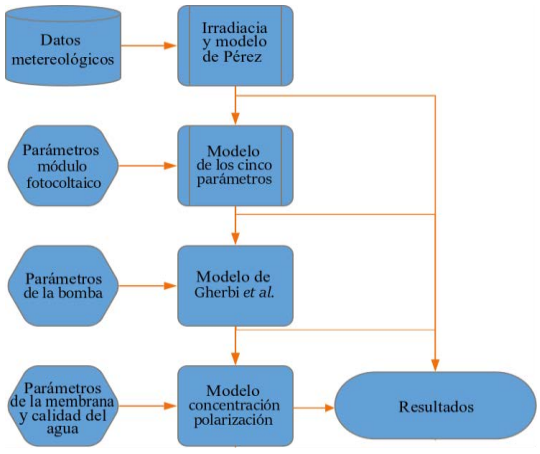


Figura 3 *Metodología modelación de permeado.*

 ISSN en trámite

El desempeño del modelo se determina en términos del residual porcentual absoluto de la presión, permeado, energía específica y de los sólidos totales disueltos, para el caso de la cuenca de la Región Hidrológica RH26. Para esto, la comparativa toma como referencia los resultados correspondientes de datos experimentales reportado por Flores-Prieto *et al.* (2015).

Análisis económico

El estudio se basa en balances economicos empleando la tasa de inflación y descuento de 3 y 8%, de acuerdo a Banco de México (2019). En el análisis económico se consideran los costos del sistema propuesto, los ahorros al utilizar la tecnología, el valor actual neto (VAN) y el costo nivelado (CNV). Los costos del sistema se determinan a partir de los costos de inversión, mantenimiento y operación. Los ahorros se determinan de la tarifa del mercado, sin costo de transportación, en el periodo de tiempo, a partir de su tendencia en el mercado multiplicado por el volumen de permeado logrado por el sistema, con una vida operativa del sistema de 19 años. El costo del dólar se estima de 19.39 *MXN/DLL*.

3. RESULTADOS

El comparativo de los resultados de la simulación respecto a los experimentales se muestra en la Tabla 1. Las desviaciones de la presión, permeado, energía específica, y sólidos totales disueltos fueron de 4.08%, 12.50%, 2.78% y 3.61% respectivamente. La desviación promedio global fue del 5.74%.

Tabla 1 *Comparativo datos horarios experimental*

Información	***Presión***	***Permeado***	***EE***	***SDT***
	[Bar]	***[m3/día]***	***[kWh/m3]***	***[mg/l]***
Flores-Prieto et al.	*0.49*	*3.20*	*1.94*	*545.46*
Presente trabajo	*0.47*	*2.88*	*1.89*	*565.17*
Diferencia %	***4.08%***	***12.50%***	***2.78%***	***3.61%***

En la Figura 4 se muestra el comparativo de los costos del agua a tarifa industrial, comercial y doméstica respecto al costo nivelado del sistema de nanofiltración en San Luis Potosí. El costo nivelado resulta de $38.51 *MXN/m*^{3}. El costo nivelado en esa región es superior al agua comercial de $ 30.38 *MXN/m*^{3} y doméstica de $ 28.56 *MXN/m*^{3}, pero, es inferior a la tarifa industrial de $ 40.50 *MXN/m*^{3}.

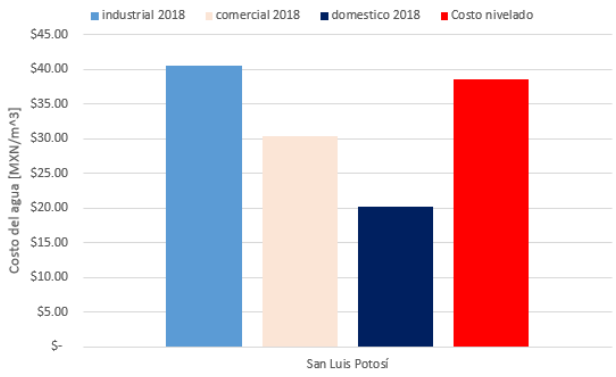


Figura 4 *Costos del agua en San Luis Potosí.*

En la Figura 5 se presenta el punto de equilibrio operativo del proyecto a lo largo de su vida útil, en este caso, el costo inicial es de $ 111,066.93 *MXN*, con lo que se tiene una TIR de 27.24%, VAN de $ 263,008.12 *MXN* y PB de 7.73 *años*.

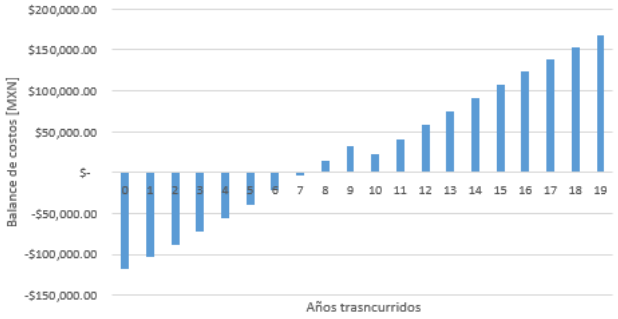


Figura 5 *Punto de equilibrio operativo de la NF-FV-BP en SLP.*

4. CONCLUSIONES

El Sistema de nanofiltración permite el tratamiento de agua para irrigación de manera viable económicamente al presentar 2.99 *MXN/m*^{3} más barato, en referencia con la tarifa de agua para uso industrial local. También, en los resultados se observó que en la Región Hidrológica RH26 de la cuenca del río Pánuco en la subcuenca Aj Río Verde, en el municipio de Río Verde, San Luis Potosí SLP, se presenta un incremento del costo de agua de 2.30 *MXN/m*^{3} al año. El VAN es de $ 263,008.12 MXN, a los 19 años de vida del proyecto, siendo mayor que costo inicial. La TIR fue 27.24% mayor que la inflación en el mercado, con un periodo de recuperación de la inversión de 7.73 *años.*

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen ampliamente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico para hacer realidad este proyecto.

6. REFERENCIAS

Abdel-Fatah, Mona A. 2018. "Nanofiltration Systems and Applications in Wastewater Treatment: Review Article." *Ain Shams Engineering Journal* 9(4): 3077–92. https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.08.001.

Alghoul, M. A. et al. 2016. "Design and Experimental Performance of Brackish Water Reverse Osmosis Desalination Unit Powered by 2 KW Photovoltaic System." *Renewable Energy* 93: 101–14. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.015.

Alsheghri, Ammar, Saad Asadullah Sharief, Shahid Rabbani, and Nurzhan Z. Aitzhan. 2015. "Design and Cost Analysis of a Solar Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant for Masdar Institute." *Energy Procedia* 75: 319–24. http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.365.

Banco de México. 2019. "Sistema de Información Económica." https://www.banxico.org.mx/tipcamb/main.do?page=tas&idioma=sp (February 4, 2020).

Bilton, Amy M., Leah C. Kelley, and Steven Dubowsky. 2011. "Photovoltaic Reverse Osmosis, Feasibility and a Pathway to Develop Technology." *Desalination and Water Treatment* 31(1–3): 24–34. http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.5004/dwt.2011.2398.

D'Costa, Kimberly. 2015. "Seawater Sulfate Removal with Nanofiltration." *Filtration and Separation* 52(2): 22–24.

Fierro, Daniel, Adriana Boschetti-de-Fierro, and Volker Abetz. 2012. "The Solution-Diffusion with Imperfections Model as a Method to Understand Organic Solvent Nanofiltration of Multicomponent Systems." *Journal of Membrane Science* 413–414: 91–101. http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2012.04.027.

Flores-Prieto, José Jassón et al. 2015. "Tratamiento de Agua Salobre Mediante Nanofiltración Solar a Baja Presión Para Irrigación." *Tecnologia y Ciencias del Agua* 6(6): 5–17.

García-Martín, Noemi et al. 2014. "Pore Size Analysis from Retention of Neutral Solutes through Nanofiltration Membranes. The Contribution of Concentration-Polarization." *Desalination* 344: 1–11. http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.038.

Labban, Omar, Chang Liu, Tzyy Haur Chong, and John H. Lienhard V. 2017. "Fundamentals of Low-Pressure Nanofiltration: Membrane Characterization, Modeling, and Understanding the Multi-Ionic Interactions in Water Softening." *Journal of Membrane Science* 521: 18–32. http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2016.08.062.

Oh, Hyun Je, Tae Mun Hwang, and Sangho Lee. 2009. "A Simplified Simulation Model of RO Systems for Seawater Desalination." *Desalination* 238(1–3): 128–39. http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2008.01.043.

Reif, John H., and Wadee Alhalabi. 2015. "Solar-Thermal Powered Desalination: Its Significant Challenges and Potential." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48: 152–65. http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403211500218X.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Comisión Nacional del Agua. 2016. "Estadísticas Del Agua En México, Edición 2016." : 282.

Sharon, H., and K. S. Reddy. 2015. "A Review of Solar Energy Driven Desalination Technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41: 1080–1118. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.002.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2018. *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions.* Paris. http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2018-nature-based-solutions/?utm_source=IWA-NETWORK&utm_campaign=225734ad48-EMAIL_CAMPAIGN_2018_03_15&utm_medium=email&utm_term=0_c457ab9803-225734ad48-158989237.

Zarzo, Domingo, and Daniel Prats. 2018. "Desalination and Energy Consumption. What Can We Expect in the near Future?" *Desalination* 427(October 2017): 1–9. http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.046.

Dimensionamiento de un sistema híbrido solar-solar para generación de vapor en la industria, utilizando herramientas gráficas

D. Santizo-Díaz [1], J.J. Flores-Prieto[1], S.U. Lugo-Ucan[1],

(1) Tecnológico Nacional de México-Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM-CENIDET)
Interior Internado Palmira S/N, Colonia Palmira, C.P 62490 Cuernavaca, Morelos.
e-mail:danier.santizo18me@cenidet.edu.mx, jasson@cenidet.edu.mx sergio.lugo@cimav.edu.mx

Resumen: En este trabajo se presenta el dimensionamiento de un sistema híbrido con tecnología solar de concentración y sin concentración utilizando una herramienta gráfica. El sistema híbrido se integra con un sistema de precalentamiento con tecnología de captación solar de placa plana *CPP*, y otro de generación directa de vapor con un campo de captación de cilindro parabólico *CCP*. El sistema de precalentamiento se compone de un campo *CPP* y un tanque de almacenamiento térmico. La demanda de vapor por parte del industrial es de 63 *ton/d*, a 167°*C* y 7.5 *Bares*, para la ciudad de Hermosillo, México. La herramienta gráfica se construye con estudios paramétricos con simulación en TRNSYS. En el diseño, la fracción solar *FS*, y la ganancia de calor solar *GCSA* se optimizan iterando razones de área, razón de volumen y temperatura de precalentamiento. En los resultados se encontró una *FS* y *GCSA* total del sistema híbrido de 0.34 y 508 kWh/m^2-*año*, respectivamente, con un área total de 10787 m^2 a una temperatura de precalentador de 80℃. De esto, el sistema de precalentamiento aporta una *FS* de 0.054, a una R_u de 80 l/m^2 y R_v de 50 l/m^2-*d*, que corresponde a un A_{cpp}, y volumen del tanque de 787 m^2 y 39 m^3, respectivamente. El *CCP* aporta una *FS* y *GCSA* de 0.29 y 426 kW/m^2-*año*, respectivamente con un A_{ccp} de 10000 m^2.

Palabras claves: Generador de vapor solar, Calentador solar híbrido, Vapor solar, Precalentamiento solar, SHIP.

FS	Fracción solar
GCSA	Ganancia de calor solar anual
T_o	Temperatura de precalentamiento
$R_{u/v}$	Razón de uso y razón volumétrica

1. INTRODUCCION

Hoy en día, el estudio de los sistemas alternativos que utilizan energía solar atiende la optimización de costos energéticos, económicos y ambientales, con relación a sistemas convencionales. La energía solar es considerada una alternativa atractiva, debido a que es renovable y con potencial de reducir costos económicos. En México, el potencial anual de energía solar que puede ser captado por colectores solares oscila entre 4115-4391 kWh/m^2, equivalente a 411-493 m^3 de gas natural (ANES, 2018).

Los sectores que más consumen energía a nivel mundial son el industrial, que representa el 28.6%, el transporte 27.8%, y el residencial 23.2% (SENER, 2014). En la escala mundial el 50% de la demanda de calor se estima en el intervalo de temperatura de 80-240°*C*, que puede ser suministrada con tecnología solar térmica de baja y mediana temperatura (Schweiger *et al.,* 2005) La energía solar térmica se ha reportado que puede proveer del 3-4% de la demanda de calor del sector industrial (IEA, 2009). Este factor, da oportunidad a la integración de tecnologías de captación solares en los procesos industriales disminuyendo el consumo de energía. Por lo que la evaluación e implementación de métodos que permitan optimizar estos sistemas, son una alternativa al buen desarrollo del mercado nacional de calentamiento solar en procesos industriales. (Frein *et al*., 2014) optimizaron un sistema de calentamiento solar utilizando el método de variación por componentes, basado en un modelo estático de acuerdo con el consumo energético, encontraron que implementando almacenamiento e intercambiadores de calor se pueden obtener mayores fracciones solares (0.8). (Tian *et al*., 2017) diseñaron y evaluaron el rendimiento de un sistema híbrido, con colectores planos y cilindros parabólicos en Taars Denmark. El diseño se basó en el precalentamiento de agua a 70℃ y la evaluación en términos de la fracción solar anual. La evaluación mostro que hibridando un sistema se pueden obtener fracciones solares de 0.22, esto dependiendo las condiciones climáticas. (Tagle *et al.,* 2016) modelaron y evaluaron un

sistema de captación solar con cilindros parabólicos para una industria en México. El modelo se realizó por balances de energía y la evaluación en términos de la demanda diaria, los resultados mostraron que este tipo de sistema puede cubrir el 58% de la demanda.

El estudio de los sistemas de generación de vapor con tecnología cilindros parabólicos, se han realizado con la implementación de modelos, que describen el comportamiento óptico-termo hidráulico (Elsafi, 2015). También, los estudios de estos sistemas se han llevado a cabo con análisis de sensibilidad, variando las condiciones de entrada, presión, temperatura, (Amine *et al.,* 2018) y (Sun *et al.,* 2015). Para esto, se han utilizado herramientas de software que permiten modelar estos sistemas y evaluarlos en estado estable, sin embargo, los trabajos enfocados a la optimización y dimensionamiento de estos sistemas son limitados.

Un novedoso concepto de diseño en el industrial es la integración de un sistema solar híbrido, que podría disminuir el consumo de energía, acoplando el colar solar con la red de distribución en los procesos de calor convencionales (IEA/SHC 49). Los sistemas híbridos se integran de tecnología de baja y mediana temperatura para el precalentamiento o producción de vapor. Po lo que, estudios enfocados a la optimización del rendimiento térmico y estrategias de control en las plantas de calentamiento solar híbrido son una alternativa al buen desarrollo del mercado nacional en procesos industriales (Tian *et al.,* 2017). Por lo que se contempla dimensionar los sistemas solares de placa plana y sistemas cilindros parabólicos determinado el área, volumen, y temperatura óptima que se relacionan con rendimiento óptimo del sistema.

2. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

La ciudad de Hermosillo, Sonora, se encuentra ubica a los 29°06′09″ de latitud Norte y de 110°58′38″ de longitud Oeste. La radiación solar total y directa, es de 2126 y 1518 kW/m^2-*año,* respectivamente, cuenta con una temperatura ambiente promedio de 32℃, de acuerdo con los datos obtenidos de Meteonorm 7.0. De acuerdo con la demanda de calor de procesos industriales (Weiss, 2005), el caso de estudio considera una demanda de 63 toneladas de vapor al día a una temperatura de 167℃ con una presión de 6.5 *bar* por parte de la industria química.

En las Fig. 1 y 2, se presenta la configuración del sistema de precalentamiento y generación directa de vapor que serán acoplados para formar sistema híbrido. El sistema de precalentamiento se considera similar a lo reportado por la Agencia Internacional de Energía, y el sistema de generación directa de vapor al de (Biencinto *et al.,* 2016). El sistema de precalentamiento se utiliza para incrementar la temperatura de entrada T_o al generador de vapor, y evaporar a 167℃ utilizando cilindros parabólicos. El sistema de precalentamiento se configura de tres circuidos: *a)* captación solar, *b*) almacenamiento térmico y *c)* entrega de calor al proceso de generación de vapor. El circuito *a)*, se integra con colectores de placa plana, un intercambiador de calor (*Hx1*), y una bomba hidráulica. El circuito *b)*, se integra de un tanque de almacenamiento, dos intercambiadores de calor (*Hx2*), y dos bombas hidráulicas. El circuito *c)*, se integra de un intercambiador de calor, un calentador auxiliar (*Hx2*) y una bomba hidráulica para entrega de calor al proceso. El sistema de generación directa de vapor está integrado por tecnología cilindros parabólicos y una bomba hidráulica. La configuración consiste en un campo de colectores orientados Norte-Sur, con 11 colectores solares cilindros parabólicos conectados en serie. Los colectores son concentradores tipo LS-3 modificados con una longitud de 50 metros cada uno, excepto para los colectores nueve y diez, que tienen una longitud de 25 metros. El tubo absorbedor es de acero de aleación ferrítica *A335 P22* con un diámetro interno y externo de 0.05 y 0.07 metros, respectivamente.

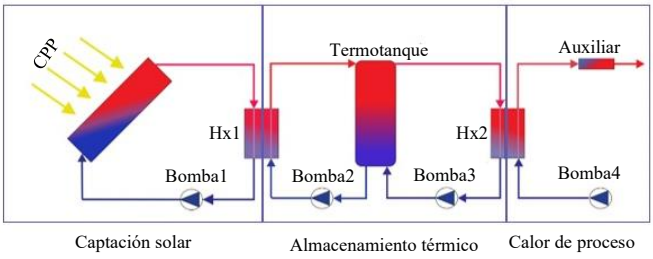


Fig. 1. Sistema de precalentamiento

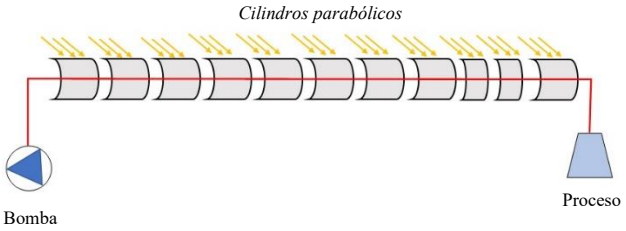


Fig. 2. Sistema de generación directa de vapor

3. METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la estrategia para la construcción de las dos herramientas gráficas para el dimensionamiento del sistema híbrido de generación de vapor solar con cilindros parabólicos y placa plana. Las herramientas graficas se construyen para dimensionar el sistema híbrido de manera iterativa, variando la razón de uso R_u, volumen R_v, área de colección A_{ccp} y temperatura T_o, en términos de la fracción solar *FS* y ganancia de calor anual *GCSA*.

En la Fig. 3 se muestra la metodología de construcción de la Herramienta grafica 1, para el sistema de precalentamiento. En esta herramienta se presenta la *FS* y la *GCSA* optimiza, resultado de la variación la R_u y R_v y T_o, en la plataforma de simulación. La metodología se divide en cuatro pasos. Paso 1) corresponde al suministro de datos, indicando que se tiene una de demanda

de 63 *ton/d* de vapor, y el recurso solar de Hermosillo, México. Paso 2) corresponde a la construcción y verificación de la plataforma de simulación del sistema de precalentamiento. Paso 3) corresponde a la variación de la razón de uso R_u, razón de volumen R_v, para cada temperatura de salida T_o. Paso 4) corresponde a la elaboración de la Herramienta gráfica, graficando la *FS* y la *GCSA*, en función de la R_u y R_v y T_o, óptimas.

En la Fig. 4, se presenta la metodología de construcción de la Herramienta grafica 2, del sistema híbrido, considerando el precalentamiento. La segunda herramienta gráfica, se construye graficando la fracción solar total FS_T y la ganancia de calor solar anual total $GCSA_T$ del sistema híbrido en función A_{ccp}, y T_o, considerando los datos optimizados de R_u y R_v obtenidos de la Herramienta grafica 1. La herramienta se utiliza para identificar el área de colección cilindros parabólicos A_{ccp}, que optimizan la FS_T y $GCSA_T$ del sistema híbrido, para diferentes T_o. La metodología se basa de cinco pasos. Paso 1), construcción, acoplamiento y validación de la plataforma de simulación híbrido. Paso 2) consiste en obtener los datos de R_v y R_u, optimizados para cada temperatura T_o, de la Herramienta grafica 1. Paso 3), consiste en la simulación y variación del A_{cscp} para cada T_o del sistema híbrido. Para cada iteración de T_o, se tiene una variación del A_{cscp} hasta un cierto límite, después de variar el A_{cscp}, la T_o cambia de paso de iteración. Esto si la diferencia de la T_o con la temperatura de precalentamiento anterior es menor que el criterio, entonces, la simulación se detiene y se imprime la FS_T y $GCSA_T$, del sistema híbrido. Paso 4), corresponde a la elaboración de la Herramienta grafica 2. En la herramienta, se grafica la FS_T y $GCSA_T$ para cada T_o y A_{cscp}, considerando también el rendimiento del precalentamiento.

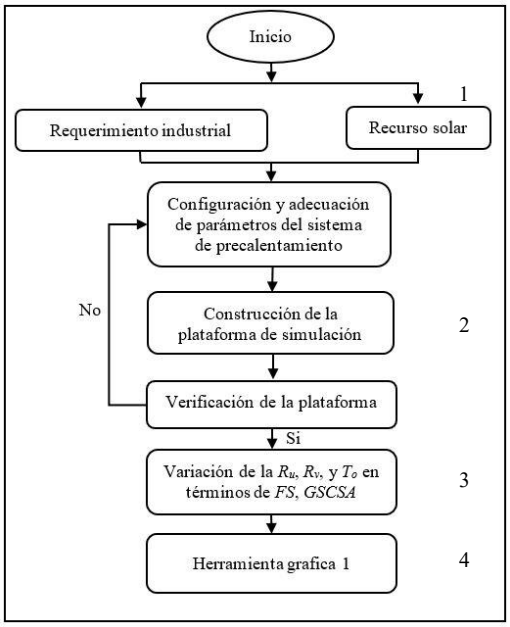


Fig. 3. Metodología construcción de la herramienta 1

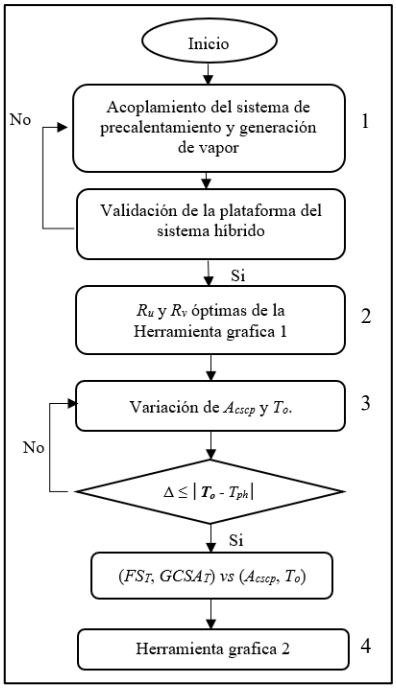


Fig. 4. Metodología de construcción de la herramienta 2

3.1 *Construcción y verificación de la plataforma de simulación*

La plataforma de simulación del sistema híbrido se construye en TRNSYS para el sistema de precalentamiento y generación directa de vapor. TRNSYS permite representar los componentes del sistema como proformas que son seleccionados e interconectados para construir el sistema. En la Fig. 5 se muestra el diagrama de flujo para la construcción del sistema utilizando los componentes de TRNSYS.

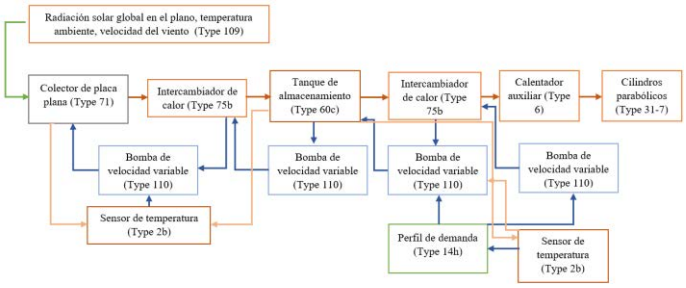


Fig. 5. Metodología de construcción de la plataforma de simulación en Trnsys

Los principales componentes que construyen el sistema hibrido son los colectores de placa plana (Type 71) y los cilindros parabólicos (Type 31-7), que captan la energía solar (Type 109). Adicionalmente, lo integran cuatro bombas hidráulicas (Type 110), dos intercambiadores de calor (Type 5b), un tanque de almacenamiento (Type 60c), dos sensores de temperatura (Type

2b), un perfil de demanda (Type 14h) y un calentador auxiliar (Type 6).

La plataforma de simulación del sistema de precalentamiento y generación de vapor se verifican y validan por separado. El sistema de precalentamiento se verifica comparando la *FS* y *GCSA*, con los datos reportados por la (IEA., 2015), con razones volumétricas de 10 y 20 l/m^2 con un área de 200 m^2. La diferencia para la *FS* simulada fue de 3.0% y la *GCSA* fue de 1.55%. El sistema de generación directa de vapor se valida comparando el perfil de temperatura del tubo absorbedor, en términos de la raíz del error medio cuadrático *RMSE*, con los datos reportados por (Lobón *et al.,* 2014) (Fig. 5). El presente estudio muestra un *RMSE* de 2.71°*C* respecto a (Lobón *et al.,* 2014).

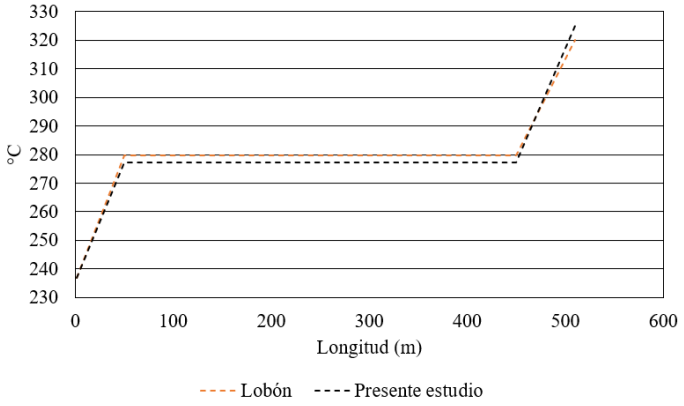


Fig.5. Validación con el perfil de temperatura

3.2 Estudio paramétrico

La variación de parámetros se realiza en la plataforma de simulación utilizando TRNSYS, se determina la *FS* y *GCSA* variando la R_u, R_v, A_{ccp} y T_o, esto, para el sistema de precalentamiento y generación directa de vapor. Para el sistema de precalentamiento se utilizaron R_v de 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 l/m^2 y R_u de 20-220 l/m^2-*d,* de acuerdo con la Tabla 1. Para el sistema de generación directa de vapor se utilizaron A_{ccp} de 1000-70000 m^2 y temperaturas de entradas de 50, 70, 80, 110 y 130°*C,* en términos de la *FS* y *GCSA*.

Tabla 1. Variación de parámetros

T_o °C	R_v l/m^2	Pasos de R_v	R_u l/m^2-*d*	Pasos de R_u
50,70,80,110,130	*10-50*	*10*	*20-220*	*20*

3.3 Construcción de herramientas gráficas y dimensionamiento

Las herramientas graficas se construyen considerando las condiciones climáticas de la ciudad de Hermosillo, México. La ciudad de Hermosillo cuenta con una radiación solar directa y difusa de 1526 y 608 kWh/m^2-*año*, respectivamente, también se considera una demanda de calor solar en los procesos de 63 *ton/d* de vapor a 167°*C* y 6.5 *bar*. La Herramienta grafica 1, se construye con información del precalentador, relacionando gráficamente *FS* y la *GCSA* con las áreas de captación (R_u), volumen de almacenamiento (R_v) y temperatura de salida del precalentador T_o. La Herramienta grafica 2, se construye relacionando la fracción solar total FS_T y la ganancia de calor solar total $GCSA_T$ con las áreas de captación total (A_{ccp} y A_{cpp}) y la temperatura de salida del precalentador T_o.

La optimización de la *FS* y *GCSA* del sistema de precalentamiento se realiza variando la R_u, R_v, y T_o, donde se obtiene un T_o óptimo. La *FS* y *GCSA* de la generación de vapor se optimiza variando el área de captación A_{ccp} y la temperatura de entrada T_o'. En el caso de que $Abs(T_o' - T_o)$ sea menor a una tolerancia establecida, entonces se termina el proceso, de lo contrario $T_o = T_o'$, y se itera el proceso hasta lograr la tolerancia establecida.

4. RESULTADOS: DISEÑO DEL SISTEMA HÌBRIDO

4.1 Desempeño del precalentamiento con la To, Ru, y Rv

En la Fig. 6 se muestra la *FS* y *GCSA* óptimas para el sistema de precalentamiento para R_u y R_v para diferentes T_o en el intervalo de estudio. En la Herramienta grafica 2, se muestra que se logra una mayor *FS* con menor temperatura (50°*C*), pero conforme se incrementa, el incremento de la *GCSA* se reduce al no requerir mayor cantidad de energía para elevar la temperatura. La mayor razón de cambio de la *FS* con T_o inicia a 80-90°*C*, de ahí, la *GCSA* se incrementa asintóticamente con la temperatura, por lo que a temperaturas mayores a 110°*C* el precalentador resulta más ineficiente.

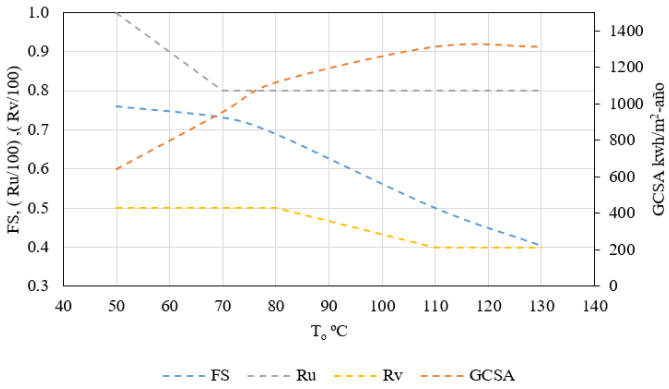


Fig. 6 Herramienta grafica 1, sistema de precalentamiento

También se observa, que, para cada T_o, la *FS* y *GCSA* varían considerablemente con la R_u y R_v. En herramienta grafica se

muestran los valores óptimos de las R_u y R_v correspondientes a cada temperatura T_o optimizada, del sistema de precalentamiento. En la herramienta, se muestra que la R_u es constante (80 l/m^2 -d) por arriba de los 80$°C$ y la R_v entre los 50-80$°C$ y 110-130$°C$, (50 y 40 l/m^2). Es de resaltar que a mayor T_o, la $GCSA$ no se incrementa. La T_o que el precalentador puede suministrar con un mejor rendimiento en términos de la FS y $GCSA$ corresponde a 80$°C$. Para confirmar esto, cada T_o se evalúa en la generación directa de vapor presentados en la Herramienta grafica 2.

4.2 Generator de vapor híbrido

En la Fig. 7 se presenta la Herramienta grafica 2, correspondiente al sistema híbrido, donde se optimiza la FS_T y la $GCSA_T$, variando el A_{ccp} y la T_o para cada paso de iteración, considerando el rendimiento óptimo del precalentamiento. La variación del A_{ccp} se realiza en intervalos de 2000-70000 m^2 y T_o de 30-130$°C$.

En la herramienta gráfica, la FS_T aumenta y la $GCSA_T$ disminuye al incrementar el área de colección A_{cscp}, y la temperatura del precalentador T_o y la FS del precalentador se mantienen constantes. También se observa, que el cambio de la FS_T a una T_o de 80$°C$, corresponde a 15%, 8.8%, 3% y 2.8% para temperaturas de 30, 50, 70, y 110 a 130$°C$, respectivamente, que conlleva a requerir un área de colección total de 10787 m^2 (10000 A_{ccp} y 787 de A_{cpp}), con un volumen de almacenamiento de 39 m^3. Para el caso de la $GCSA_T$ aumenta con un área total menores a los 10787 m^2, de lo contrario disminuye.

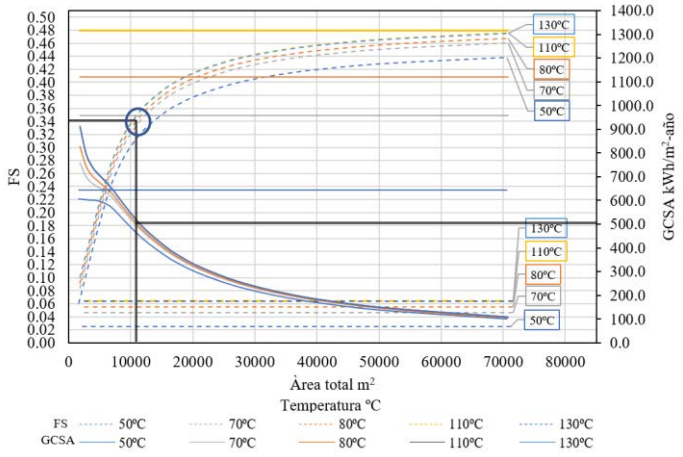


Fig. 7 Herramienta grafica 2, sistema híbrido

4.3 Dimensionamiento del sistema híbrido

El dimensionamiento del sistema híbrido se realiza con el apoyo de las dos herramientas graficas para cada sistema, en términos de la fracción solar total FS_T, y ganancia de calor solar anual total $GCSA_T$. El dimensionamiento considera la R_v, R_u, A_{ccp} y T_o óptimos de cada sistema.

En la Herramienta grafica 1, que corresponde al sistema de precalentamiento, se optimiza la FS y la $GCSA$ del precalentador en función de la R_v, R_u, y T_o óptimas. En la herramienta grafica 2, se identifica el A_{ccp} que optimizan la FS_T y la $GCSA_T$ del sistema híbrido, considerando el rendimiento óptimo del sistema de precalentamiento, para diferentes T_o.

Para el caso de estudio correspondiente a la ciudad de Hermosillo, México, el sistema híbrido propuesto, se dimensiona para cubrir una demanda de 63 *ton/d* de vapor a una temperatura de 167$°C$ con una presión de operación de 6.5 *bar*. La FS_T y la $GCSA_T$ óptimas del sistema híbrido es de 0.34 y 508 *kWh/m²-año*, respectivamente, con un área total A_T, de 10787 m^2 a una T_o de 80$°C$. Con esto, el sistema de precalentamiento presenta una FS de 0.054, R_u de 80 l/m^2 y R_v de 50 l/m^2-d, que corresponde a una A_{cpp}, y volumen del tanque V_T, de 787 m^2 y 39 m^3, respectivamente. El sistema de generación de vapor solar aporta una FS y $GCSA$ de 0.29 y 426 *kWh/m²-año*, utilizando tecnología de cilindro parabólicos.

5. CONCLUSIONES

El sistema híbrido se dimensiono considerando un sistema de precalentamiento con colectores de placa plana con almacenamiento térmico y un sistema de generación directa de vapor con cilindros parabólicos. Para el dimensionamiento del sistema híbrido, se construyó una plataforma de simulación en TRNSYS , que se verifico con datos de un sistema de precalentamiento y generación directa de vapor, de acuerdo a la (IEA, 2015) y (Biencinto *et al.,* 2016), con desviaciones menores al 3%.

La plataforma de simulación permitió realizar un estudio de variación de parámetros, con lo que se construyeron dos herramientas graficas que permiten dimensionar los sistemas de generación de vapor optimizando la fracción solar y la ganancia de calor solar anual. En la Herramienta grafica 1, se grafica la FS y la $GCSA$ optimizadas con la R_u, R_v y T_o. La Herramienta grafica 2, se construye relacionando la fracción solar total FS_T y la ganancia de calor solar total $GCSA_T$ con las áreas de captación total (A_{ccp} y A_{cpp}) y la temperatura de salida del precalentador T_o.

En el caso de estudio, con un área de colección total de 10787 m^2 (10000 m^2 A_{ccp} y 787 m^2 de A_{cpp}) y un V_t de 39 m^3, la FS_T resultó de 0.34 y la $GCSA_T$ de 508 *kWh/m²-año*, a T_o de 80$°C$. Respecto a la FS_T el 0.054 lo aporta el sistema de precalentamiento.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONACYT y al PRODETES17-PL-CCEL-000020 por el apoyo para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Amine, A. H., Rodríguez I., y Ghenai C. (2018). Thermo-hydraulic analysis and numerical simulation of a

ISSN en trámite

parabolic trough solar collector for direct steam generation. *Applied Energy, 214*, 152-165.

ANES, (2018). [Potencial anual de energía solar en México]. Recuperado de *https://anes.org.mx/*

Biencinto, M., Gonzáles L., y Valenzuela L. (2016). A quasi-dynamic simulation model for direct steam generation in parabolic troughs using TRANSYS. *Applied Energy, 169,* 133–142.

Elsafi, A. M. (2015). On thermo-hydraulic modeling of direct steam generation. *Solar Energy, 120*, 636-650.

IEA, (2009). [Informe anual World Energy Outlook] Recuperado de *http://www.omau-malaga.com/2/com1_md3_cd-307/agencia-internacional-energia-publicado-informe-anual-world-energy-outlook-2009*.

IEAS/SHC Task 49, (2012-2016). Solar Heat Integration in Industrial Process. *http://task49.iea-shc.org/*

Lobón, L., V, Valenzuela, L., y Baglietto, E. (2014). Modeling the dynamics of the multiphase fluid in the parabolic-trough solar steam generating systems. *Energy Conversion and Management, 78*, 393–404.

Schweiger, J. F. (2005). The potential of solar heat in industrial processes. *Solar Energy, 30*, 180-191.

SENER. (2014). Balance Nacional de Energìa. Recuperado *https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44353/Balance_Nacional_de_Energ_a_2014.pdf*

Tagle, P.D., Agraz. A., Rivera. I.C. (2016). Study of applications of parabolic trough solar collector technology in Mexican industry. *Energy Procedia, 91*, 661-667.

Tian, Z., Peres, B., Furbo, S., Fan, J. (2017). Annual measured and simulated thermal performance analysis of a hybrid solar district heating plant with flat plate collectors and parabolic trough collectors in series. *Applied Energy, 205*, 417-427.

Weiss, W., Schweiger, H., Battisti, R. (2005). Market potential and system designs for industrial solar heat applications.[s.p]

Efecto de la hibridación en las propiedades mecánicas a flexión de un laminado híbrido carbono/vidrio

German Alfonso Rosas*. Arturo Abúndez Pliego*. Enrique Alcudia Zacarías*. Jorge Colín Ocampo*. Andrés Blanco Ortega*. Wilberth Melchor Alcocer Rosado*

**Tecnológico Nacional de México / CENIDET. Av. Palmira esq. Apatzingán s/n. Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos, México. C.P. 62490. E-mail: german.alfonso19me@cenidet.edu.mx*

Resumen: En este trabajo se presentan los resultados del efecto híbrido sobre las propiedades mecánicas a tensión de laminado híbrido carbono/vidrio con la configuración de apilado [+90G/0G/-90C]s. Las pruebas se realizaron en la máquina de ensayos universales Shimadzu AG-Xplus 100kN, de acuerdo a la norma ASTM D3039. Los resultados experimentales exhiben un aumento de 147% en el porcentaje de deformación a la falla del laminado híbrido en comparación con el laminado de referencia [+90C/0C/-90C]s; este resultado se atribuye a la presencia de fibras de vidrio las cuales se caracterizan por su ductilidad. Además, la hibridación obtuvo una disminución de 70% en la cantidad de fibra de carbono presente en laminado, lo cual permite disminuir costos en comparación con un laminado de carbono. El modo de falla fue de tipo angular y se presentó en el centro de la longitud calibrada.

Palabras clave: material compuesto laminado, material compuesto híbrido, efecto híbrido, GFRP, CFRP.

1. INTRODUCCION

Los materiales compuestos se han posicionado recientemente sobre los materiales tradicionales y actualmente se emplean para la construcción de piezas estructurales para una gran variedad de aplicaciones en las diversas áreas de la ingeniería. Esto se debe a las propiedades físicas y mecánicas que exhiben respecto a los materiales monolíticos, como resistencia y rigidez específicas, además que presentan también una ventaja en relación al proceso de manufactura, dado que es posible construir piezas de gran tamaño y de formas complejas, lo cual representa ahorros significativos para las industrias. Por éstas y algunas otras razones es que los materiales compuestos están constantemente sustituyendo a los materiales comúnmente y, consecuentemente, los ha convertido actualmente en un objeto de estudio por su potencial para aplicaciones de mayor exigencia mecánica. Esta expansión en el uso de los materiales compuestos sólo se ha visto impedida por el desconocimiento de la respuesta mecánica ante entornos específicos de condiciones de carga, por lo que muchos investigadores (Bulut & Erkliğ, 2018)(de Oliveira Filho, de Sousa Mota, da Conceicao, Leao, & de Araujo Filho, 2019)(Roundi, El Mahi, El Gharad, & Rebière, 2017)(Caminero, Rodríguez, & Muñoz, 2016; Jesthi, Mandal, Rout, & Nayak, 2018; Keck & Fulland, 2019; Kureemun et al., 2018) han enfocado sus esfuerzos en estudios sobre el comportamiento de los materiales y han encontrado que las propiedades mecánicas de los materiales compuestos se ven afectadas por diversas variables que alteran o modifican dichas propiedades. Particularmente en los materiales compuestos laminados, se ha reconocido que variables como la secuencia de apilado, la fracción de volumen, las propiedades de los materiales constituyentes, el método de manufactura, orientación de las fibras, entre otras, tienen un gran impacto en propiedades como la resistencia mecánica, la deformación, flexibilidad y la resistencia a la corrosión .

Recientemente (Bulut & Erkliğ, 2018; de Oliveira Filho et al., 2019) se ha reportado que una forma de mejorar la respuesta mecánica de los materiales compuestos laminados es a través de la hibridación. Se han estudiado sistemas hibridados de fibra de vidrio con fibra de carbono para aplicaciones de vigas y parachoques de automóviles. Ambas aplicaciones demuestran que los compuestos híbridos se han convertido en un material alternativo aceptable y viable para aplicaciones estructurales (Safri, Sultan, Jawaid, & Jayakrishna, 2018). La hibridación se realiza combinando diferentes fibras naturales juntas, mediante una combinación de diferentes fibras sintéticas o combinando fibras naturales y sintéticas. La combinación de dos o más fibras diferentes proporciona un alto rendimiento estructural, lo que ayuda a obtener una alta propiedad de tenacidad con resistencia al impacto y capacidad de carga. Como resultado del efecto de hibridación, se produce un efecto híbrido positivo o negativo (Bulut & Erkliğ, 2018). Esto se debe a que influyen distintos parámetros en la respuesta mecánica del material, por ejemplo, la secuencia de apilado, orientación de las fibras y fracción de volumen de los refuerzos. Cabe señalar que, de acuerdo a cada prueba, estos parámetros influyen de manera distinta.

En 2012 Zhang *et al* (Zhang, Chaisombat, He, & Wang, 2012) investigaron las influencias de la secuencia de apilado en la resistencia de los compuestos híbridos mediante pruebas estáticas que incluían tensión, compresión y flexión de tres

puntos. Después de analizar cinco laminados compuestos, los resultados mostraron que los laminados compuestos híbridos con un 50% de refuerzo de fibra de carbono proporcionan las mejores propiedades de flexión cuando las capas de carbono están en el exterior, mientras que las capas de carbono / vidrio alternadas proporcionan la mayor resistencia a la compresión. En 2018 Jesthi *et al* (Jesthi et al., 2018) determinaron experimentalmente las propiedades mecánicas de polímeros reforzados con fibra de carbono, polímeros reforzados con fibra de vidrio y dos laminados híbridos simétricos. A partir de las pruebas de tensión y flexión, con distintas secuencias de apilado, identificaron que éstas afectaron las propiedades mecánicas de los laminados híbridos. Concluyen que el laminado que exhibió mejores características mecánicas fue el $[G_2/C_2/G]_S$, el cual presentó una resistencia a la tensión de 311.44 MPa (debido a la alta rigidez de las fibras de carbono en el medio del compuesto híbrido) y una resistencia a la flexión de 397.845 MPa, respecto al laminado $[C/G_3/C]_S$. En 2019 Jesthi y Nayak (Jesthi & Nayak, 2019a) evaluaron la influencia de la secuencia de apilado de los laminados híbridos de carbón/vidrio epoxi respecto a la resistencia a la flexión, a la tensión, al impacto y la absorción de agua de mar. A partir de las pruebas realizadas, reportaron que el laminado híbrido que presentó mejor resistencia a la tensión fue el $[C/G_3/C]_S$ con 311 MPa; concluyeron que este comportamiento puede deberse a que existen fibras de carbono en el centro de compuesto.

En este trabajo se presenta el efecto de la hibridación en la respuesta mecánica de un laminado híbrido carbono/vidrio sometido a ensayos de tensión. La configuración de este laminado es $[+90G/0G/-90C]s$ consta de 6 láminas apiladas en distinta orientación. La investigación se enfoca en el efecto de la hibridación sobre la resistencia última (σ_u), el porcentaje de deformación (ε), módulo de elasticidad (E) y modo de falla.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y configuración

El refuerzo de baja elongación (LE) está representado por la fibra de carbono unidireccional proporcionada por la empresa ACP Composites, con las siguientes características: “4.7 oz. Uni-Web”, densidad superficial de $16.275 +/- 5\% \text{ x}10^{-3} \text{g/cm}^2$ (ACP Composites, 2019b) y densidad volumétrica de 1.8 g/cm^3 (ACP Composites, 2019a). Por otra parte, la fibra de alta elongación (HL) está representada por fibra de vidrio unidireccional con una densidad superficial de $14.241 / -5\% \text{ x}10^{-3} \text{g/cm}^2$ y una densidad volumétrica de 2.5 g/cm^2. La matriz del compuesto híbrido se obtuvo a partir de resina epoxi EPOLAM 5015 con endurecedor EPOLAM 5015 (Axon Technologies, 2020).
Se fabricaron tres laminados para el estudio del efecto de hibridación, esto es, un material compuesto de referencia por cada refuerzo, carbono y vidrio, y un laminado híbrido carbón/vidrio. Los laminados de referencia se construyeron con seis láminas de similar espesor con apilado $[+90/0/-90]s$.

Por otro lado, el laminado híbrido se construyó usando la secuencia de apilado $[+90G/0G/-90C]s$. Esto indica que las fibras de LE se colocan cerca del plano medio y las fibras de HE se colocan en la parte exterior del laminado. Los laminados se fabricaron a temperatura ambiente mediante la combinación de dos métodos de manufactura, estos son: infusión de resina asistido por vacío y *hand lay-up.*

2.2 Ensayos de tensión

De cada laminado se estudiaron 5 probetas representativas con una geometría rectangular de 135mmx13mmx1.4mm, la cual es un *subsize* de la norma ASTM D3039 (ASTM, 2002). Las probetas fueron obtenidas por corte desde el laminado usando una fresadora multiusos Grizzly industrial® modelo G0704, con un cortador de acero al tungsteno 1/8” a una velocidad de operación de 2200rpm. Los ensayos a tensión se realizaron en la máquina de ensayos universales Shimadzu AG-X plus 100kN a una velocidad constante del travesaño de 2mm/min. Las deformaciones se registraron mediante un extensómetro Epsilon® 3542-050M-050-ST. Las probetas se sujetaron con cabezales de cuña, en ocasiones es necesario usar talones (pestañas de fricción) debido a que pueden arrojar mejores resultados en comparación con sujeciones sin talones, sin embargo, no siempre es así. Por esto, se realizó una prueba con talón y la otra sin talón, las demás pruebas se realizaron con el método de sujeción que obtuvo mejores resultados. Esto se debe repetir para cada laminado con sus distintas probetas.

La resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad y la deformación por tensión se determinaron de acuerdo a la norma ASTM D3039 (ASTM, 2002).

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

3.1 Propiedades mecánicas

En la Figura 1 se presentan las curvas de esfuerzo (σ) contra deformación (ε) de los laminados de estudio. Las líneas representan el comportamiento promedio del laminado correspondiente, cuando se someten a ensayos de tensión. El laminado híbrido $[+90G/0G/-90C]s$ exhibe un comportamiento que se encuentra entre los rangos de los laminados de referencia $[+90G/0G/-90G]s$ y $[+90C/0C/-90C]s$, lo cual es un buen indicador de la hibridación, dado que es posible observar el efecto sinérgico al adquirir una buena capacidad de deformación sin perder su capacidad de carga.

 ISSN en trámite

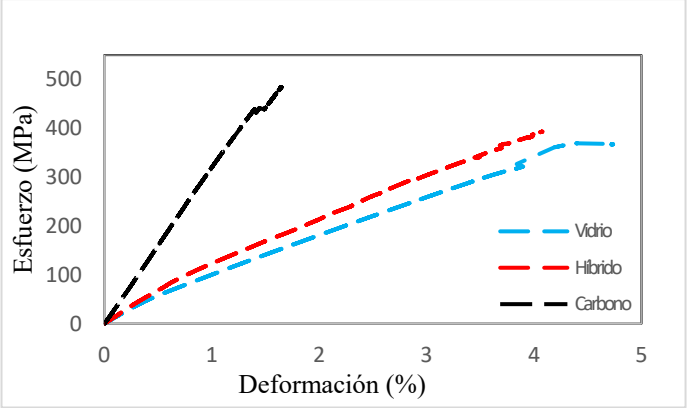


Fig. 1. Diagrama esfuerzo-deformación de los laminados de prueba.

En la Tabla 1 se presentan las propiedades mecánicas calculadas a través de las recomendaciones de la norma ASTM D3039 (ASTM, 2002) y la fracción de volumen de las laminados fibras. La fracción de volumen de fibras (v_f) se calculó a partir de la regla de mezclas:

$$v_f = \frac{\rho_r m_f}{\rho_r m_f + \rho_f m_r} \quad (1)$$

donde v_f es la fracción de volumen de las fibras, ρ_r y ρ_f son las densidades volumétricas $\mathrm{g/cm^3}$ de la resina y las fibras, respectivamente; m_r y m_f son la cantidad de masa (g) de la resina y las fibras dentro del material compuesto, respectivamente.

Por otra parte, en el laminado híbrido la fracción de volumen híbrida (v_{fh}) se obtuvo al sumar la fracción de volumen de fibras de carbono (v_{fc}) y de vidrio (v_{fv}) que se encuentran dentro del compuesto, usando la ecuación (2). Las fracciones de volumen de cada fibra dentro del compuesto híbrido se obtuvieron a través de la ecuación (1).

$$v_{fh} = v_{fc} + v_{fv} v_{fh} \quad (2)$$

Tabla 1. Propiedades de los laminados.

Propiedades de los laminados de estudio					
Laminado	$E(GPa)$	$\sigma_u(MPa)$	$\varepsilon(\%)$	$v_f(\%)$	
Carbono	29.394	484.47	1.648	44	
Híbrido	9.640	393.32	4.080	29	$v_{fc} = 44.83$ $v_{fv} = 55.17$
Vidrio	7.514	368.57	4.905	23	

3.2 Efecto híbrido

En la Tabla 2 se muestran los resultados del efecto híbrido calculado como un porcentaje de incremento (+) o decremento (-) de la deformación a la falla de la primera capa, módulo de elasticidad y resistencia del laminado híbrido $[+90G/0G/-90C]s$ en relación al laminado de referencia $[+90C/0C/-90C]s$, presentados en la Tabla 1. Por otra parte, el volumen de fibras de carbono en el laminado híbrido se calcula a través de la fracción de volumen híbrida en el laminado (ver Tabla 1).

Tabla 2. Resultados del efecto híbrido con respecto al laminado de carbono.

Efecto híbrido en el laminado [+90G/0G/-90C]s	
Deformación	+147.572
Volumen de fibras de carbono	-70.450
Módulo de elasticidad	-67.204
Resistencia última	-18.815

También, en la Tabla 3 se muestran los resultados del efecto híbrido calculado en porcentaje del laminado híbrido $[+90G/0G/-90C]s$ en relación con el laminado de referencia $[+90G/0G/-90G]s$. El porcentaje de volumen de fibra de vidrio es calculado de la misma forma que el volumen de fibra de carbono.

Tabla 3. Resultados del efecto híbrido con respecto al laminado de vidrio.

Efecto híbrido en el laminado [+90G/0G/-90C]s	
Deformación	-16.819
Volumen de fibras de vidrio	-30.434
Módulo de elasticidad	+28.293
Resistencia última	+6.714

3.3 Modo de falla

En la Figura 2 se muestra una fotografía de laminado híbrido $[+90G/0G/-90C]s$ después de haberse ensayado a tensión. La falla del laminado se presentó a la mitad de la longitud de prueba del laminado. De acuerdo con la descripción estándar que ofrece la norma ASTM D3039 (ASTM, 2002), es posible asociar el modo en que falló la probeta. En este caso, la falla es del tipo AGM (2), la cual indica que fue de tipo angular (A) dentro del área calibrada (G) con falla a la mitad de la longitud calibrada (M).

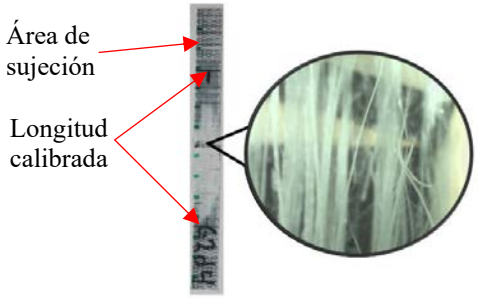


Fig.2. Modo de falla del laminado $[+90G/0G/-90C]s$.

3.4. Comparación con resultados de la literatura

Los datos obtenidos del laminado híbrido $[+90G/0G/-90C]s$ fueron comparados con los resultados del laminado $[G_3/C_2]s$ reportados por Jesthi y Nayak (Jesthi & Nayak, 2019b). Ellos utilizaron diez láminas de fibras cruzadas (cuatro de carbono y seis de vidrio) y obtuvieron una resistencia máxima a tensión (esfuerzo último) de 329 MPa. En la Tabla 3 se muestran los resultados del laminado $[+90G/0G/-90C]s$ y $[G_3/C_2]s$.

Tabla 4. Comparación de resultados del laminado [+90G/0G/-90C]s y el laminado $[G_3/C_2]s$.

Laminado	σ_u (MPa)	ε (%)	E (GPa)	No. de carbono
[+90G/0G/-90C]s	393.321	4.08	9.640	2
$[G_3/C_2]s$	329	3.8 (aprox)	8.333(aprox)	4

Como se puede observar en la Tabla 3, el laminado $[G_3/C_2]s$ contiene más material de carbono y exhibe un menor esfuerzo último (en la primera capa) en comparación con el laminado $[+90G/0G/-90C]s$ estudiado en el presente trabajo. Por lo tanto, el laminado híbrido $[+90G/0G/-90C]s$ exhibe un desempeño 19.550% superior además de que se ahorra un 24.74% en el costo de las fibras de carbono.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñaron, construyeron, ensayaron y compararon un laminado de polímero reforzado de fibra de vidrio (GFRP) $[+90G/0G/-90G]s$, un laminado de polímero reforzado de fibra de carbono (CFRP) $[+90C/0C/-90C]$ y un laminado híbrido de carbono/vidrio $[+90G/0G/-90C]s$, con el propósito de evaluar el efecto híbrido sobre las propiedades de esfuerzo último, deformación a la falla y el módulo de elasticidad. De los resultados obtenidos se pueden concluir que:

a) La hibridación tiene un efecto significativo sobre las propiedades de los polímeros reforzados con fibras.

b) El laminado híbrido $[+90G/0G/-90C]s$ exhibió 18.8% menor esfuerzo último que el laminado de referencia de carbono $[+90C/0C/-90C]s$.

c) El laminado híbrido $[+90G/0G/-90C]s$ exhibió 6.7% mayor esfuerzo último que el laminado de referencia de vidrio $[+90G/0G/-90G]s$.

d) La presencia de capas de vidrio en el laminado híbrido $[+90G/0G/-90C]s$ permite un ahorro del 70.45% de fibras de carbono en comparación con el laminado de referencia $[+90C/0C/-90C]s$. Esto representa un beneficio monetario al comparar los costos de la fibra de carbono con la fibra de vidrio.

e) El laminado hibrido $[+90G/0G/-90C]s$ en comparación con el laminado de la literatura $[G_3/C_2]s$ exhibe un desempeño 19.550% mayor además de que se ahorra 24.74% en el costo de las fibras de carbono.

f) El modo de falla fue de tipo angular en el área calibrada. Esto se debe a la orientación de las láminas que se ubican en el plano medio del compuesto laminado híbrido.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la hibridación mejoró las propiedades de los laminados de referencia (carbono y vidrio) por lo que es una opción recomendable para ahorrar costos de fabricación con menor número de láminas de carbono y con propiedades similares a los laminados de referencia. Sin embargo, aún se desconocen las propiedades que se pueden obtener antes de realizar el proceso de hibridación de carbono y vidrio.

Agradecimientos:

Este trabajo se desarrolló gracias al apoyo del CONACYT a través de la beca nacional No CVU. 955774 y del Tecnológico Nacional de México a través de la Convocatoria de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica 2018 para los Institutos Tecnológicos y Centros con el proyecto 6375.18-P.

Referencias

ACP Composites. (2019a). *12K carbon fiber tow datasheet*.

ACP Composites. (2019b). *4.07 oz Uni-web unidirectional carbon fiber datasheet*.

ASTM. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. , (2002).

Axon Technologies. (2020). *EPOLAM 5015 resin*.

Bulut, M., & Erkliğ, A. (2018). The investigation of quasi-static indentation effect on laminated hybrid composite plates. *Mechanics of Materials*, *117*(November 2017), 225–234. https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2017.11.005

Caminero, M. A., Rodríguez, G. P., & Muñoz, V. (2016). Effect of stacking sequence on Charpy impact and flexural damage behavior of composite laminates. *Composite Structures*, *136*, 345–357. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.10.019

de Oliveira Filho, G. C., de Sousa Mota, R. C., da Conceicao, A. C. R., Leao, M. A., & de Araujo Filho, O. O. (2019). Effects of hybridization on the mechanical properties of composites reinforced by piassava fibers tissue. *Composites Part B: Engineering*, *162*(October 2018), 73–79. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.050

Jesthi, D. K., Mandal, P., Rout, A. K., & Nayak, R. K. (2018). Effect of carbon/glass fiber symmetric inter-ply sequence on mechanical properties of polymer matrix composites. *Procedia Manufacturing*, *20*(20 18), 530–535. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.079

Jesthi, D. K., & Nayak, R. K. (2019a). Evaluation of mechanical properties and morphology of seawater aged carbon and glass fiber reinforced polymer hybrid

composites. *Composites Part B: Engineering*, *174*(March), 106980. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106980

Jesthi, D. K., & Nayak, R. K. (2019b). Improvement of mechanical properties of hybrid composites through interply rearrangement of glass and carbon woven fabrics for marine application. *Composites Part B: Engineering*, *168*(March), 467–475. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.042

Keck, S., & Fulland, M. (2019). Effect of fibre volume fraction and fibre direction on crack paths in unidirectional flax fibre-reinforced epoxy composites under static loading. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, *101*(January), 162–168. https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.01.028

Kureemun, U., Ravandi, M., Tran, L. Q. N., Teo, W. S., Tay, T. E., & Lee, H. P. (2018). Effects of hybridization and hybrid fibre dispersion on the mechanical properties of woven flax-carbon epoxy at low carbon fibre volume fractions. *Composites Part B: Engineering*, *134*, 28–38. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.035

Roundi, W., El Mahi, A., El Gharad, A., & Rebière, J. L. (2017). Experimental and numerical investigation of the effects of stacking sequence and stress ratio on fatigue damage of glass/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, *109*, 64–71. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.044

Safri, S. N. A., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., & Jayakrishna, K. (2018). Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review. *Composites Part B: Engineering*, *133*, 112–121. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.008

Zhang, J., Chaisombat, K., He, S., & Wang, C. H. (2012). Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures. *Materials and Design*, *36*, 75–80. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.006.

Análisis dinámico de un inersor en MSC ADAMS

Lot Reza-Arteaga*, Andrés Blanco-Ortega*, Jorge Colín-Ocampo*
Wilberth M. Alcocer-Rosado* y Arturo Abúndez-Pliego*

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490*
(Tel: 777-362-7770; e-mail: andres.blanco@cenidet.edu.mx).

Resumen: En este artículo se analiza el inersor en un sistema masa-resorte-amortiguador de 2 grados de libertad. El inersor es un dispositivo mecánico que fue propuesto para atenuar de manera pasiva las vibraciones. Se presenta el prototipo virtual del inersor con el sistema de 2 grados de libertad y se analiza en el entorno del programa de MSC Adams View®, bajo las condiciones de las dos resonancias del sistema. También, se presentan resultados de simulación, donde se observa que el inersor atenúa las amplitudes de vibración presentando un mejor desempeño en la segunda resonancia, cuando se encuentra acoplado entre las dos masas, además de mantener estable las oscilaciones en ambas masas.

Keywords: Inersor, Sistema masa resorte amortiguador, resonancia.

1. INTRODUCCIÓN

Un inersor (Inerter) es un concepto propuesto recientemente y un dispositivo con la propiedad de que la fuerza aplicada en sus dos terminales es proporcional a la aceleración relativa entre ellos (Smith, 2002). El inersor fue aplicado por primera vez en un auto de carreras conducido por Kimi Raikkonen en la carrera del 2005 Spanish Grand Prix, logrando obtener la victoria para McLaren (Chen *et al.*, 2009). En este vehículo se dio a conocer como amortiguador J (Damper J) para mantener en secreto el desarrollo tecnológico en el cual se probó que el inersor mejoró el rendimiento de las suspensiones del vehículo.

En la Figura 1 y 2 se muestran dos configuraciones de inersores, una con elementos de cremallera, engranes y volantes de inercia, y la otra, con un tornillo de bolas (también conocido como husillo) y la tuerca.

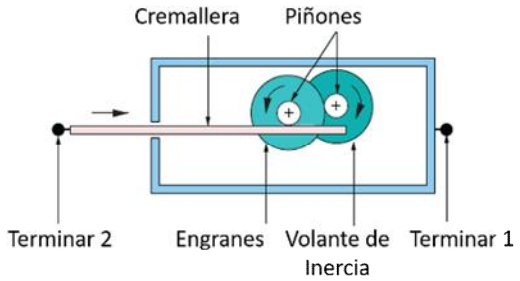


Fig. 1 Inersor en configuración Cremallera-Piñón.

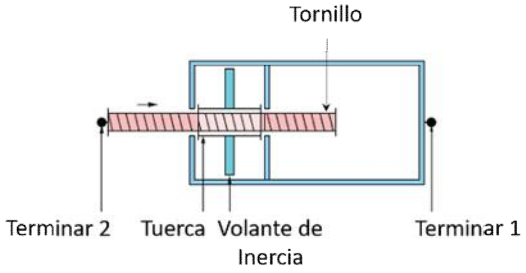


Fig. 2 Inersor en Configuración Tornillo de bolas-Tuerca.

Se han realizado algunas configuraciones del inersor con resortes y amortiguadores para suspensiones en vehículos; en (Chen *et al*., 2012) se presenta un estudio comparativo de cinco configuraciones para aplicaciones de suspensiones. En (Chen *et al*., 2014) investigaron la influencia del inersor en las frecuencias naturales de sistemas de vibración. Demostraron que las frecuencias naturales de un sistema de un solo grado de libertad (SDOF) y un sistema de dos grados de libertad (TDOF), el inersor puede reducir las frecuencias naturales de estos sistemas. Los inersores también se han puesto a prueba en sistemas de suspensión de ferrocarriles, tanto en la suspensión primaria como en la secundaria, dando buenos resultados en soluciones de suspensión activa y semiactiva (Matamoros y Goodaoll, 2014) (Chen *et al*., 2017) (Hu *et al*., 2017). Otras aplicaciones del inersor se encuentran en suspensión de edificios (Fu-Cheng *et al*., 2007) (Giarilis y Petrini, 2017), inersor mecatrónico para suspensiones de vehículos (Fu-Cheng *et al*., 2013), y, en tobillos de robots, dónde se obtuvo un mejor

desempeño en la velocidad de caminata y su estabilidad (Watanabe, 2014).

En sistemas mecánicos vibratorios se presenta un problema conocido como resonancia. La resonancia es un estado de operación en el que una frecuencia de excitación se encuentra cerca de una frecuencia natural del sistema. Para llevar el sistema mecánico a una velocidad de operación generalmente se tiene que pasar por al menos una resonancia, en la cual debido a las amplitudes grandes de vibración se transmiten fuerzas a los componentes, que pueden llegar a dañar el sistema o reducir la vida de dichos componentes.

En este artículo se analiza la respuesta de un sistema masa-resorte-amortiguador (MRA) de dos grados de libertad en sus dos resonancias, considerando un inersor para atenuar las amplitudes de vibración; cuando el sistema está sujeto a una fuerza de excitación con una frecuencia cercana o igual a la frecuencia natural del sistema.

2. ANÁLISIS DINÁMICO

2.1 Descripción del sistema MRA de 2 GDL

En la Figura 3 se muestra el prototipo virtual de la plataforma del sistema masa-resorte-amortiguador. La fuerza de excitación será proporcionada por un servomotor, conectado a la primera masa por un mecanismo cremallera-piñón. Con este sistema se pueden simular.

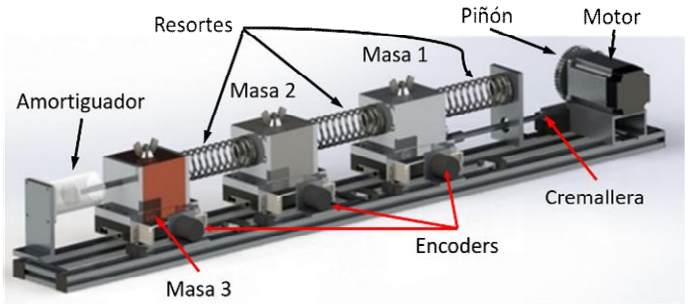


Fig. 3 Prototipo virtual del sistema masa-resorte-amortiguador.

El diagrama esquemático para un sistema MRA de 2 grados de libertad (GDL), se muestra en la Figura 4. Por lo que, se consideran solo dos masas (m_1, m_2), dos resortes (k_1, k_2), amortiguamiento viscoso entre los carros y las guías (c_1, c_2), una fuerza de excitación externa (proporcionada por la cremallera piñón, ver Figura 3). El desplazamiento de cada masa está denotado por x_1 y x_2.

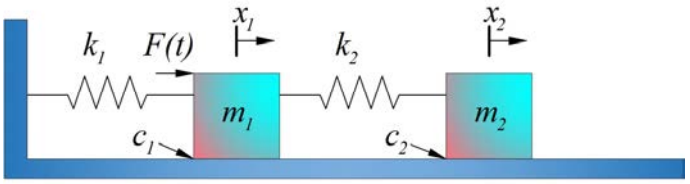


Fig. 4 Sistema masa-resorte-amortiguador de 2 GDL.

2.2 Modelo matemático del sistema de 2 GDL

Aplicando la segunda ley de Newton o el formulismo de Euler-Lagrange, se obtiene el modelo matemático que rige la dinámica del sistema.

$$\begin{aligned} m_1\ddot{x}_1 + k_1x_1 - k_2(x_2 - x_1) + c_1\dot{x}_1 &= F(t) \\ m_2\ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) + c_2\dot{x}_2 &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

Para el modelo matemático (1), sin fuerza de excitación y despreciando el amortiguamiento, se propone la siguiente solución en forma compleja:

$$\begin{aligned} x_1 &= A_1e^{j\omega t} \\ x_2 &= A_2e^{j\omega t} \end{aligned} \tag{2}$$

Derivando dos veces, para sustituir en el modelo matemático, y simplificando, quedan las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} m_1(-\omega^2A_1) + k_1(A_1) - k_2(A_2 - A_1) &= 0 \\ m_2\left(-\omega^2A_2\right) + k_2(A_2 - A_1) &= 0 \end{aligned} \tag{3}$$

Para obtener el polinomio característico, se obtiene el determinante de (3) igualando a cero, dado por:

$$\omega^4m_1m_2 - \left(k_1m_2 + k_2m_1 + k_2m_2\right)\omega^2 + k_1k_2 = 0 \tag{4}$$

Considerando $\lambda = \omega^2$, se obtienen las dos frecuencias naturales del sistema.

2.3 Modelo matemático del sistema de 2 GDL con inersor

El sistema masa-resorte-amortiguador con un inersor acoplado entre la masa 1 y la masa 2, se muestra en la Figura 5. EL inersor está denotado por su inertancia *b*. En este análisis, se considera el momento de inercia del inersor *J* (volante de inercia).

Para el modelado del inersor, se considera el desplazamiento angular del piñón, el cual puede ser representado como:

$$\theta_1 = \frac{1}{r_1}(x_1 - x_2) \tag{5}$$

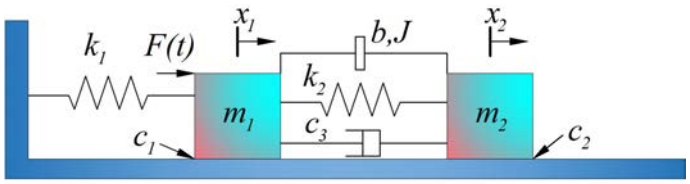


Fig. 5 Sistema masa-resorte-amortiguador de 2 GDL con inersor.

Aplicando la segunda ley de Newton o el formulismo de Euler-Lagrange, se obtiene el modelo matemático que rige la dinámica del sistema con el inersor.

$$\begin{aligned}(m_1+J)\ddot{x}_1 - J\ddot{x}_2 + (k_1+k_2)x_1 - k_2x_2 + c_1\dot{x}_1 + c_3(\dot{x}_1-\dot{x}_2) = F(t)\\ (m_2+J)\ddot{x}_2 - J\ddot{x}_1 - k_2(x_1-x_2) + c_2\dot{x}_2 - c_3(\dot{x}_1-\dot{x}_2) = 0\end{aligned} \quad (5)$$

En la tabla I se muestran los valores utilizados en el prototipo virtual, así como para los cálculos realizados con las ecuaciones y para las simulaciones con el modelo matemático.

Tabla I. Valores de parámetros del sistema MRA

Unidad	Valor
Masa 1 m_1	2.5 kg
Masa 2 m_2	2.5 kg
Rigidez k_1	1300 N/m
Rigidez k_2	1300 N/m
Amortiguamiento c_1	0 Ns/m
Amortiguamiento c_2	0 Ns/m

3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

A continuación, se presentan algunos resultados de simulación para las relaciones obtenidas del análisis dinámico del sistema MRA de 2 GDL, con y sin inersor.

En la Figura 6 se muestra el prototipo virtual del sistema masa-resorte-amortiguador con el inersor acoplado entre la masa 1 y la masa 2. El prototipo virtual se utilizó en el entorno del software MSC Adams® View para realizar las simulaciones.

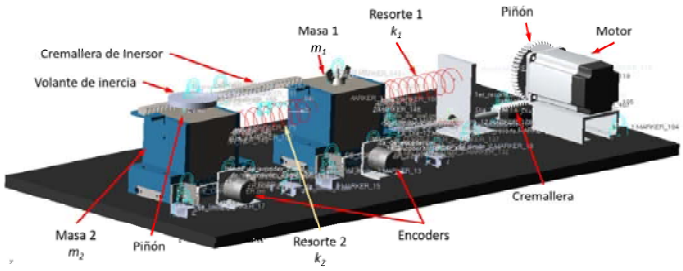


Fig. 6 Prototipo virtual del sistema masa-resorte-amortiguador con inersor.

Considerando los parámetros dados en la tabla 1, correspondientes a los parámetros utilizados en el prototipo virtual, se obtienen las dos frecuencias naturales, al considerar el polinomio característico (4):

$$\omega_1 = 14.093\ ^{rad}/_{s} \quad (4)$$

$$\omega_2 = 36.897\ ^{rad}/_{s} \quad (5)$$

3.1 Respuesta utilizando el modelo matemático

En la Figura 7 se muestra la respuesta dinámica del sistema masa-resorte-amortiguador de 2 GDL, resultado de la simulación de las ecuaciones dinámicas (1), y, considerando los parámetros de simulación dados en la tabla 1.

La fuerza de excitación (*F(t)*) es una función armónica sinusoidal con una frecuencia igual a la primera frecuencia natural ($\omega_1 = 14.1\ ^{rad}/_{s}$) y de amplitud de 2N, ver Figura 8.

Como se observa en la Figura 7, la respuesta de la masa 1 va en la misma dirección de la masa 2, ambas con amplitud creciente conforme el tiempo crece, por lo que se está excitando la primera resonancia, debido a que la fuerza de excitación tiene una frecuencia igual a la primera frecuencia natural del sistema.

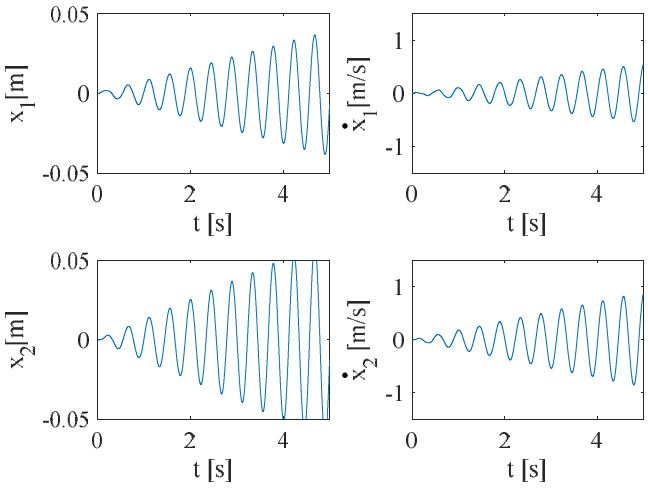


Fig. 7 Respuesta de las dos masas para una fuerza de 2Sin(14.1t).

 ISSN en trámite

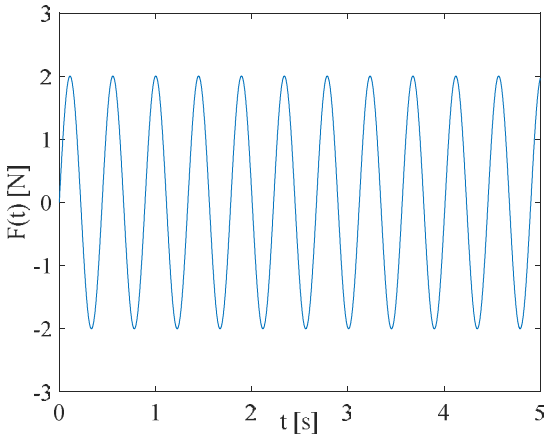


Fig. 8 Fuerza de excitación, F(t)=2Sin(14.1t).

De manera similar, la respuesta para las dos masas, con una fuerza de excitación (*F(t)*) con frecuencia igual a la segunda frecuencia natural ($\omega_2 = 36.9\,^{rad}/_{s}$), se muestra en la Figura 9.

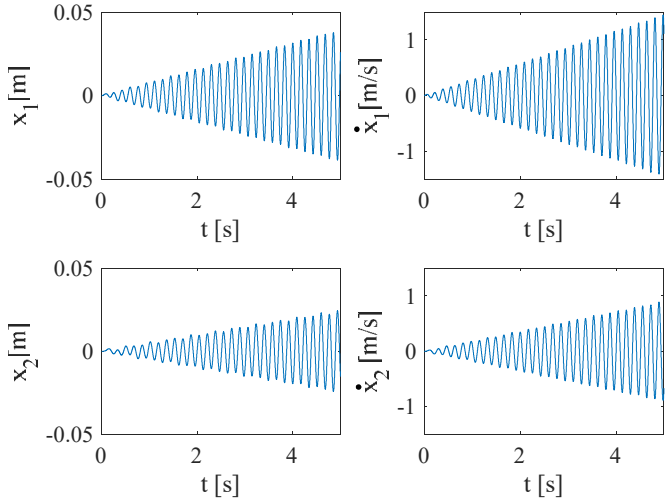


Fig. 9 Respuesta de las dos masas para una fuerza de 2Sin(36.9t).

Nuevamente, se observa como la amplitud de las dos masas crece conforme avanza en tiempo. Sin embargo, estas se desplazan en sentido contrario. La fuerza de excitación para la segunda resonancia se muestra en la Figura 10.

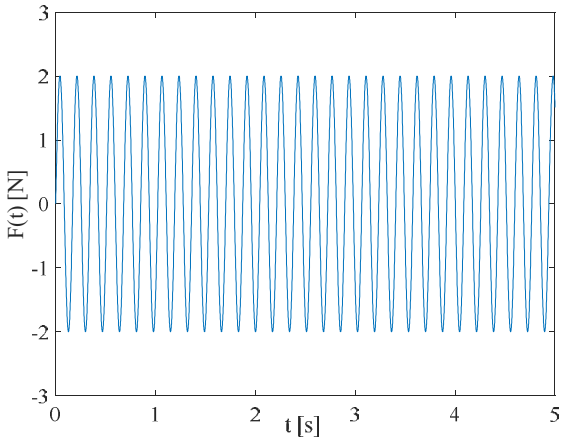


Fig. 10 Fuerza de excitación, F(t)=2Sin(36.9t).

3.2 Respuesta utilizando el prototipo virtual

En la Figura 11, se muestra la respuesta del sistema de 2 GDL, utilizando el prototipo virtual en el ambiente de MSC Adams View®. Nuevamente, comparando las respuestas de la masa 1 (x_1) y de la masa 2 (x_2), se observa que ambas se desplazan en la misma dirección, esto se muestra mediante capturas del movimiento mostradas en la Figura 12.

En la Figura 12, la figura que muestra en la posición media, representa la posición neutral o de equilibrio, cuando se somete a la fuerza de excitación, ambas masas se desplazan a la derecha (figura superior) y a la izquierda (figura inferior). La fuerza de excitación fue la misma utilizada en la respuesta mostrada en la Figura 7, la cual se muestra en la Figura 8. Comparando la respuesta obtenida con el modelo matemático (Figura 7) y la respuesta obtenida con el prototipo virtual, se aprecia que se tiene una respuesta similar.

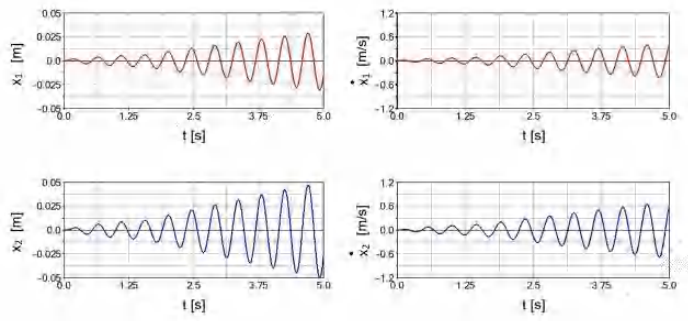


Fig. 11 Respuesta de las dos masas para una fuerza de 2Sin(14.1t).

 ISSN en trámite

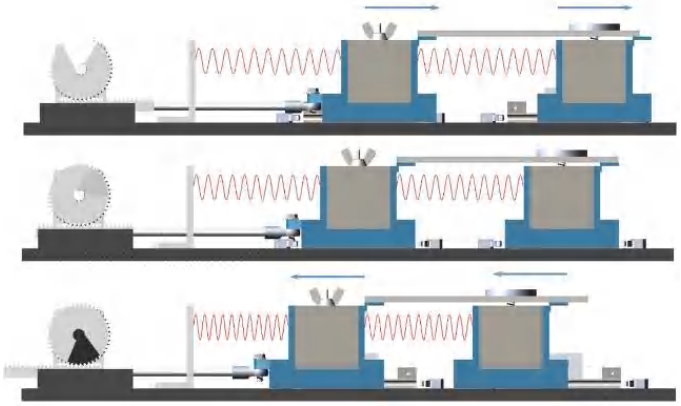


Fig. 12 Prototipo virtual en tres posiciones para una fuerza de 2Sin(14.1t).

De manera similar a la respuesta mostrada en la Figura 9, se realizó la misma simulación con el prototipo virtual, es decir, se aplicó la fuerza de excitación mostrada en la Figura 10.

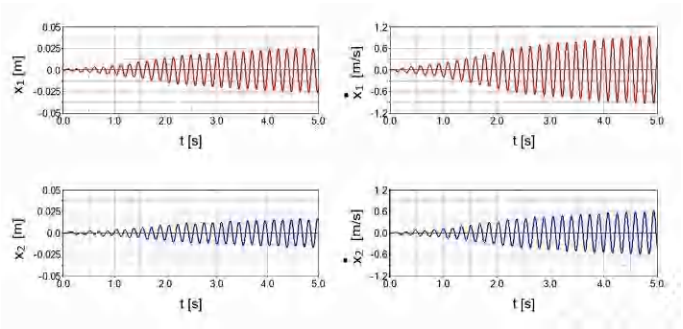


Fig. 13 Respuesta de las dos masas para una fuerza de 2Sin(36.9t).

Se puede observar que se obtiene una respuesta muy similar a la obtenida con el modelo matemático, donde la amplitud en la masa 2 es menor comparada a la amplitud de la masa 1. Se capturaron unas posiciones del prototipo virtual para esta respuesta y se muestra en la Figura 14. Aquí se observa como en esta condición de resonancia, ambas masas se mueven en sentido opuesto. En la figura que se encuentra en la posición media, Figura 14, corresponde a la posición neutral o inicial del sistema. En la figura superior, ambas masas tienen movimientos encontrados, se acerca una a la otra; y en la figura inferior, las masas se mueven alejándose una de la otra.

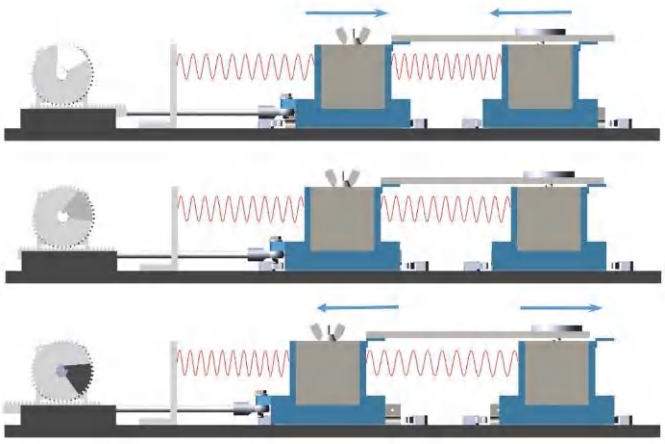


Fig. 14 Prototipo virtual en tres posiciones para una fuerza de 2Sin(36.9t).

Las respuestas mostradas en las Figuras 11 y 13, son sin el inersor. Sin embargo, las Figuras 15 y 16, la respuesta del sistema masa-resorte-amortiguador es con el efecto del inersor. La Figura 15 es con la fuerza de excitación con la primera frecuencia natural ($\omega_1 = 14.1\,^{rad}/_{s}$), y la respuesta mostrada en la Figura 16, es para una fuerza de excitación con la segunda frecuencia natural ($\omega_2 = 36.9\,^{rad}/_{s}$).

Comparando la respuesta de la Figura 15, con la respuesta de la Figura 11 o de la Figura 7, sin inersor, se observa que la amplitud de ambas masas es atenuada en un 50%, en la respuesta de ambas masas.

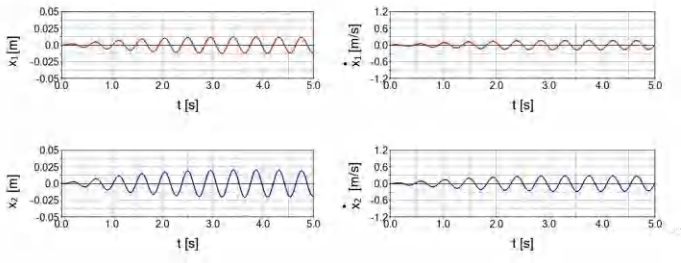


Fig. 15 Respuesta de las dos masas para una fuerza de 2Sin(14.1t) con inersor.

Comparando, también, la respuesta con el inersor mostrada en la Figura 16, con la respuesta sin inersor, Figura 13 y Figura 9, se puede apreciar que, en esta segunda frecuencia natural, el inersor atenúa la amplitud de vibración (atenúa 20 veces la amplitud), logrando mantener estable la oscilación de ambas masas.

 ISSN en trámite

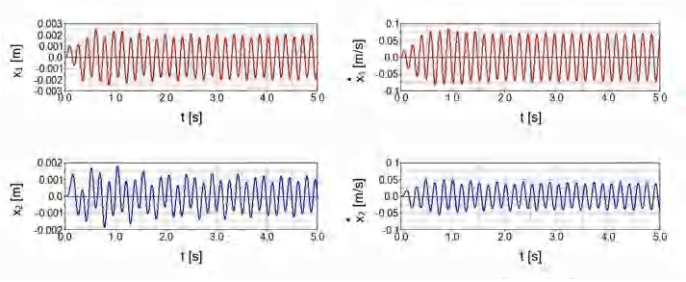


Fig. 16 Respuesta de las dos masas para una fuerza de 2Sin(36.9t) con inersor.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el análisis de un inersor en condiciones de resonancia de un sistema masa-resorte-amortiguador de 2 grados de libertad. Se obtiene el modelo matemático con el inersor y se comparan las respuestas obtenidas con las simulaciones en el entorno de MSC Adams®.

De los resultados de las simulaciones, se muestra que el inersor, cuando está acoplado entre las dos masas, atenúa más la amplitud cuando se encuentra en la segunda frecuencia natural. Además de lograr atenuar la amplitud, logra estabilizar la oscilación de ambas masas.

Por otra parte, el uso de prototipos virtuales es de gran ayuda para visualizar el comportamiento dinámico de sistemas mecánicos, dando una mejor comprensión de la dinámica. También, ayuda a realizar simulaciones con elementos flexibles, así como relaciones de engranes y mecanismos cremallera-piñón.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo brindado por el Tecnológico Nacional de México/CENIDET.

REFERENCIAS

M. Z. Q. Chen, Y. Hu, C. Li, G. Chen, “Application of Semi-Active Inerter in Semi-Active Suspensions Via Force Tracking,” ASME. J. Vib. Acoust. 138(4), pp. 1–11, 2016.

M.Z.Q. Chen, C. Papageorgiou, F. Scheibe, F.C. Wang, M.C. Smith, The missing mechanical circuit element, IEEE Circuits and Systems Magazine 9 (1) (2009) 10–26.

M. Z. Q. Chen, Yinlong Hu, and Baozhu Du, Suspension Performance with One Damper and One Inerter, 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC) (2012) 3535-3539.

M. Z.Q. Chen, Yinlong Hu, LixiHuang, Guanrong Chen, Influence of inerter on natural frequencies of vibration systems, Journal of Sound and Vibration (2014)1874–1887.

Fu-Cheng Wang, Cheng-Wei Chen, Min-Kai Liao and Min-Feng Hong. Performance Analyses of Building Suspension Control with Inerters, 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA, USA, Dec. 2007. 12-14.

Fu-Cheng Wang, Hsueh-Ju Chen and Chung-Hung Yu, Performance Benefits of a Full-Car Model with Mechatronic Inerter Networks, SICE Annual Conference 2013. September 14-17, 2013, Nagoya University, Nagoya, Japan.

Y. Hu, M. Z. Q. Chen, and Y. Sun, “Comfort-oriented vehicle suspension design with skyhook inerter configuration,” J. Sound Vib., vol. 405, pp. 34–47, 2017.

A. Giaralis and F. Petrini, “Optimum design of the tuned mass-damper-inerter for serviceability limit state performance in wind-excited tall buildings,” Procedia Eng., vol. 199, pp. 1773–1778, 2017.

A. Z. Matamoros-Sanchez and R. M. Goodaoll, “Applications of the inerter in railway vehicle suspension,” *2014 UKACC Int. Conf. Control. Control 2014 - Proc.*, no. July, pp. 555–560, 2014.

M. Watanabe, T. Hayashi, and M. Yamakitao, “Wobbling mass effects for a walking robot with inerters,” pp. 1073–1078, 2014.

M. C. Smith, Synthesis of mechanical networks: the inerter, IEEE Transactions on Automatic Control 47(10) (2002)1648–1662.

Cinética de secado de Calabaza (*Cucurbita pepo L.*) Deshidratada a 50°C con Velocidad de Aire de 2m/s

O. Javier Salinas*. A. Dominguez Niño, O. García Valladares***, I. Pilatowsky Figueroa*****

***Universidad Tecnológica de Tehuacán, Prolongación de la 1 sur No. 1101, CP 75859, Tehuacán, Puebla, México (Tel: 238-380-3100; e-mail:omarsalinas973@gmail.com).**
****CONACYT Instituto de Energías Renovables-UNAM, Privada de Xochicalco S/N, Azteca, CP 62588 (e-mail: aldoni@ier.unam.mx)**
*****Instituto de Energías Renovables-UNAM, Privada de Xochicalco S/N, Azteca, CP 62588 (e-mail: ogv@ier.unam.mx, ipf@ier.unam.mx)**

Resumen: En este estudio se evaluó el efecto de la temperatura de secado y la velocidad del aire sobre las propiedades fisicoquímicas de hojuelas de calabaza. Los resultados indicaron que el porcentaje de humedad disminuyó de 92.65% a 5.57% respectivamente. La cinética de secado mostró un comportamiento característico en el que el peso inicial 20g disminuyó respecto al tiempo hasta aproximadamente 1.13g. De acuerdo a los resultados, las hojuelas de calabaza deshidratada alcanzaron un peso constante a partir de las 3 horas de secado a una velocidad de 2 m/s.

Keywords: Cucurbita pepo L., secado, cinética, humedad, condiciones controladas.

1. INTRODUCCIÓN

El secado es unos de los métodos de conservación más antiguos conocidos por el hombre para la conservación de los alimentos. Por conveniencia se ha dividido en dos tipos de secado: secado natural, cuando se refiere a la acción de secar mediante la influencia del sol, aunque ello implique el uso de algún tipo de secador solar, y el secado artificial para referirse al secado mediante el uso de energía secundaria (energía eléctrica). (Boucher, 1991).

La calabaza (*Cucurbita pepo L.*) la cual será sometida al análisis de secado en un secador a condiciones controladas; es un producto de siembra anual, el color de las mismas es entre verde claro y oscuro, dependiendo de la variedad y en ocasiones presenta pequeñas manchas blanquecinas (Escobar, 2003). Por otro lado, es importante conocer también sobre la producción de la calabacita, para tener un panorama del impacto a nivel nacional y mundial del producto a secar; en el periodo 2012-2017 (Figura 1). La producción crece a una tasa media anual de 4.7%. En el último año alcanzó su máximo histórico, con un valor de 502 miles de toneladas, debido a un mayor rendimiento.

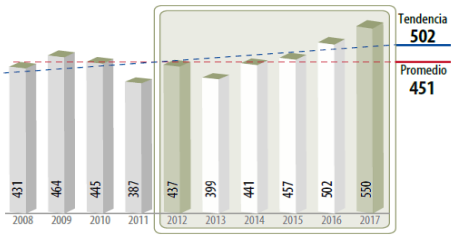


Figura 1 Volumen de la producción nacional 2012-2017 (miles de toneladas)

A nivel mundial en el campo mexicano se cosecha 1 de cada 40 kilogramos del vegetal que se obtienen anualmente (servicio de información agroalimentaria y pesquera (SIAP), 2018). Por lo que México es el 6 productor mundial con 550,410 toneladas de calabacita en 2017.
Los volúmenes de producción a nivel nacional por Estado, son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1 Top 5 en volumen de producción. Principales entidades productoras

Rank	Entidad Federativa	Volumen (toneladas) 2012	2017	Variación (%) 2012-2017
	Total	**278,453**	**366,407**	**31.6**
1	Sonora	100,552	180,585	79.6
2	Puebla	47,253	62,053	31.3
3	Sinaloa	72,199	51,022	-29.3

Quintero-Ramos et al. (1998) Analizó dentro de sus estudios las variables de temperatura (50, 55, 65, 75 y 79°C) en el secado de calabaza, siendo ésta sometida a un pretratamiento; como resultados de este experimento se obtuvo que el pretratamiento ayudó a la calabacita a mantenerse firme durante el secado, el cual duró cerca de 20 horas para llegar a una deshidratación constante. Taiwo O. Olorin et al. (2012) Investigó las cinéticas de secado de rodajas de calabaza blanqueada (hervida) con un grosor de 10, 20 y 30 mm a temperaturas de 60, 70 y 80°C además de tener una velocidad de aire de 1.5m/s, tuvo como respuesta que el grosor de la rodaja de la calabacita influye en la disminución de las constantes de velocidad del secado, el blanqueamiento reduce un poco la humedad y por lo tanto el tiempo de secado es menor (35 minutos). En esta investigación se experimentó un secado de calabacita con 0.3cm de grosor a una temperatura de 50°C y con velocidad de aire de 2m/s, sin haber sido sometida a pruebas de pretratamiento o blanqueadas sino de forma natural para analizar su proceso de deshidratación.

La calabaza cultivada en la región de Altepexi, Puebla, es un cultivo de riego y al igual que otros cultivos, durante la etapa de selección, genera una cantidad de vegetal que no cumple con los requisitos de alta calidad (imperfecciones naturales de las verduras), estos vegetales son separados y con el paso del tiempo se descomponen. Lo cual repercute en un incremento de desperdicio y la pérdida de alimentos a nivel mundial, causando brutales daños medioambientales. (Agencia EFE, s.f.)

En esta investigación se propone aprovechar la cantidad de calabacitas que no fueron seleccionadas, para que sean deshidratadas en un secador a condiciones controladas (50°C de temperatura y 2 m/s de velocidad de aire) para obtener las cinéticas de secado y propiedades fisicoquímicas, para prolongar su vida de anaquel en un periodo de aproximadamente 4 o 6 meses después de su recolección.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El equipo utilizado para secar alimentos en condiciones controladas de temperatura y velocidad de aire, fue diseñado, construido y evaluado en el instituto de energías renovables-UNAM, este secador consta de: una cámara de secado, un ventilador centrífugo, un banco de resistencias eléctricas y un tablero de control como se muestra en la Figura 2.

La cámara de secado está hecha de acrílico transparente y dentro de ella se encuentra una bandeja con un área de 0.35m² en la cual son colocadas las mallas con las muestras. El aire puede circular por la parte superior y/o inferior de la bandeja de secado y circula de manera longitudinal por esta misma hacia el exterior. El aire es impulsado, mediante un motor de 1/20 hp con ventilador centrifugo con capacidad máxima de flujo volumétrico de 570 m^3h^{-1}, la alimentación es de la red eléctrica de 220 V, el ventilador toma aire del ambiente, lo hace circular por el banco de resistencias eléctricas (calentamiento de aire) y posteriormente a la cámara de secado. La velocidad de aire es controlada mediante un trasformador de corriente variable (Variac) conectado al moto-ventilador. El sistema de calentamiento consta de 3 resistencias aletadas de 1500 W cada una (4.5 KW de potencia neta). Cada resistencia puede funcionar de manera independiente y la temperatura es controlada mediante un PID (Proportional-integral-Derivative controller) el cual usa como sensor de temperatura un termopar PT1000 que se encuentra en el difusor de aire entre la cámara de secado y el banco de resistencias.

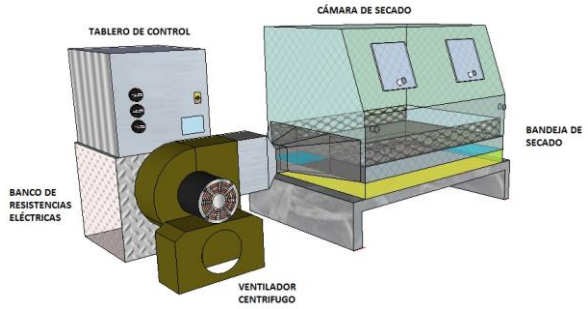


Figura 2 Esquema de secador eléctrico con control de temperatura y velocidad de aire (CC).

3. METODOLOGÍA

Se encendieron las resistencias y se colocó la temperatura a la que se iba a secar (en este caso de 50°C) ya que se considera que las bajas temperaturas de secado permiten la evaporación de una gran cantidad de agua del producto además de buscar el menor daño térmico sobre el alimento a deshidratar, posteriormente se encendió el ventilador y con ayuda de un anemómetro se controló la velocidad de aire (2m/s).

Mientras el secador eléctrico alcanzaba la temperatura deseada, se lavaron las pruebas (calabaza) y fueron cortadas en rodajas de 0.3cm de grosor. Inmediatamente se pesaron las mallas donde se colocaron las pruebas (6 mallas), luego se pesaron 6 muestras de 20g de calabaza y se colocaron en cada una de las mallas anteriormente mencionadas y se finaliza esta parte cuando se ponen las muestras de manera horizontal y de forma paralela al aire de secado en la bandeja que se introduce en el interior del secador (Figura 3).



Figura 3 Hojuelas de calabaza cruda

Cuando las muestras ya se encontraban dentro del secador, se identificó la hora en que se inició la prueba y a partir de ello se tomaba el peso de las muestras cada 20 minutos durante las

 ISSN en trámite

primeras 2 horas y después se tomaba el peso de estas a cada hora.
Por otra parte, se analizó y se adquirieron valores de humedad y actividad de agua de las muestras las cuales se determinaron al inicio y al final de la cinética de secado con la ayuda de los siguientes equipos: termobalanza (OHAUS MB45) y medidor de actividad de agua (rotronicAw-DIO).
Para finalizar este experimento, se capturaron los valores adquiridos en todo este proceso en una base de datos creada en Excel, de esta manera se logró obtener las cinéticas y velocidad del secado, además de obtener sus humedades y actividad de agua finales para compararlos con los iniciales y analizar el comportamiento del secado, y por último se guardaron las muestras en bolsas de plástico que fueron llevadas a una empacadora al vacío (TORREY EVD-20) para ser almacenados.
En la Figura 4 se pueden apreciar las hojuelas de calabaza al término de la prueba de secado



Figura 4 Hojuelas de calabaza deshidratada

4. RESULTADOS

Los análisis experimentales se realizaron a una temperatura y velocidad constante (50°C y 2m/s) durante un periodo de 6 horas, también se analizaron la cantidad de humedad, velocidad de secado y pérdida de peso por malla (6 mallas con 20g de calabaza).
En la Figura 5 se muestra el comportamiento de humedad de la muestra M1 la cual disminuye con respecto al tiempo, el contenido de humedad se estabiliza entre un rango de 100 y 180 minutos con un valor de humedad de alrededor de 0.042 gH_2O/gss.
Se observa que durante los primeros 20 minutos perdió aproximadamente 6.54 gH_2O/gss, pasados otros 20 minutos perdió 3.76 gH_2O/gss, pasado los 60 minutos la perdida fue de 2.5 gH_2O/gss, a los 80 minutos 1.05 gH_2O/gss, a los 100 minutos 0.18 gH_2O/gss y a los 120 minutos fue de 0.01 gH_2O/gss, de este último en adelante comenzó a ser constante. De acuerdo a los resultados, la calabacita pierde casi el total de su humedad a los 120 minutos, con una temperatura de 50°C y velocidad de aire de 2m/s.

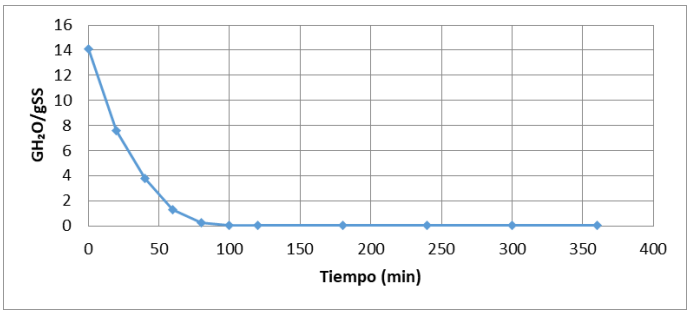


Figura 5 Relación entre el contenido de humedad (gH_2O/gss) con respecto al tiempo (minutos) de la muestra M1 manteniendo constante la temperatura (50°C) y velocidad (2m/s).

En la Figura 6 se muestra la velocidad de secado de la muestra M1 la cual determina la humedad del sólido por unidad de tiempo, fue obtenida del experimento realizado en el secador a condiciones controladas a una T 50°C donde se muestra que a partir de 7.57 gH_2O/gss alcanza su punto estable de humedad.

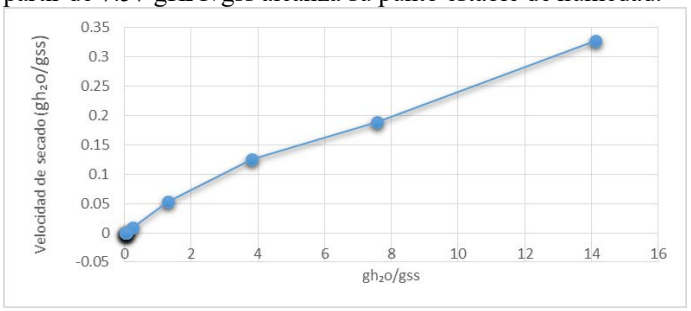


Figura 6 Velocidad de secado de la muestra M1.

En la Tabla 2, se muestra el análisis en el cual se consideraron 6 mallas y se observa que el rango de peso inicial es de 20g y después de 6 horas las mallas se encuentran en un peso final con un rango de 1.13g y 1.22g, es decir, que se perdió aproximadamente entre el 94.35% y 93.9% de la masa de la muestra de 20g.

Tabla 2 Peso real de las muestras (g)

Hora	M1	M2	M3	M4	M5	M6
10:00	20	20	20	20	20	20
10:20	14.04	15.76	16.32	15.09	15.03	15.56
10:40	9.54	11.16	11.72	10.29	10.63	11.76
11:00	5.14	6.66	7.22	5.59	6.23	7.16
11:20	2.14	2.86	3.32	2.19	2.63	3.36
11:40	1.24	1.26	1.42	1.39	1.23	1.46
12:00	1.14	1.16	1.22	1.19	1.13	1.36
01:00	1.14	1.16	1.12	1.19	1.13	1.36
02:00	1.14	1.16	1.22	1.19	1.13	1.16
03:00	1.14	1.16	1.22	1.09	1.13	1.16
04:00	1.14	1.16	1.22	1.19	1.13	1.16

Como se observa en la Tabla 2, el comportamiento de la pérdida de peso durante el secado es muy parecido y de esta

manera se puede decir que el efecto del aire (a velocidad de 2 m/s) permitió obtener muestras deshidratadas a peso constante durante las primeras dos horas de secado. Por lo que a partir de ese tiempo podría darse por finalizado el proceso de secado de la calabaza; así mismo, se recomienda hacer un estudio para evaluar el efecto de diferentes velocidades de secado sobre las propiedades fisicoquímicas de la calabaza.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis de secado, los resultados más sobresalientes fueron:

- En el análisis de la cinética de secado se observa que el contenido de humedad se estabiliza entre un rango de 100 y 180 minutos con un valor de humedad de alrededor de 0.042 gH_2O/gss.
- Se alcanza su punto estable de humedad a partir de 7.57 gH_2O/gss en el secador a condiciones controladas a temperatura de 50°C.
- En el análisis de medición de pesos del producto se observó el tiempo de estabilización del secado el cual fue durante las primeras 2 horas obteniendo valores en un rango de 1.14g-1.19g.
- De acuerdo a los resultados obtenidos es posible secar aproximadamente 2.4kg de calabacita al mes (capacidad del prototipo), bajo las siguientes condiciones: temperatura de 50°C y una velocidad de 2m/s. lo anterior aumenta la vida útil de nuestro producto y disminuye los impactos negativos al medio ambiente.
- El objetivo de este proyecto fue evaluar la cinética de secado de la calabaza a una temperatura de 50 °C y 2m/s. Sin embargo, se tiene planeado a futuro realizar un estudio sobre la energía requerida y costo de producción del proceso de secado de calabaza a diferentes temperaturas y velocidades de secado.

REFERENCIAS

AGENCIA EFE. (s.f.). *EFE*. Obtenido de EFE: https://www.efe.com/efe/america/mexico/imperfecciones-en-frutas-y-verduras-contribuyen-a-desperdicio-de-alimentos/50000545-3616387

Boucher, F. (1991). Bib. Orton IICA / CATIE ,T*ecnología alimentaria y agroindustrial rural.* Bogotá (Colombia): IICA Biblioteca Venezuela.

Escobar, H. (2003). *Análisis de costos para hortalizas ecológicas.* Bogotá: Fundación Universidad Jorge Tadeo Lozano .

SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERA (SIAP). (2018). *Atlas Agroalimentario 2012-2018.* Ciudad de México.

Aspectos básicos para el diseño mecánico de un exoesqueleto de extremidades inferiores para aumento de fuerza

A. J. Martínez-Mata*, A. Blanco-Ortega*, C. H. Guzmán-Valdivia, C. Cortes-García*, J. A. Arellano-Cabrera*****

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490
(Tel: 777- 362-7770 e-mail: arturo.martinez18me@cenidet.edu.mx,
e-mail: andres.blanco@cenidet.edu.mx)
**Universidad Autónoma de Aguascalientes , Departamento de Ingeniería Mecánica
***Equipos Médicos Vizcarra

Resumen: En este artículo se presenta una revisión del estado del arte para dar las pautas o aspectos básicos que se deben considerar en el diseño mecánico de un exoesqueleto de extremidades inferiores, como son los aspectos de antropometría, cálculos de diseño, sensores, entre otros. Se presenta una propuesta de un exoesqueleto, con aplicación para transportar una carga en la espalda del usuario.

Palabras Clave: Estructura robótica, asistencia para caminar, exoesqueleto

1. INTRODUCCIÓN

Un exoesqueleto mecánico o exoesqueleto robótico es un armazón metálico externo que ayuda a su portador a moverse y realizar cierto tipo de actividades, como lo es el cargar peso. Estos dispositivos pueden acoplarse a las *extremidades superiores* (Figura 1); *extremidades inferiores* (Figura 2) o bien existen topologías de exoesqueletos que combinan ambas extremidades (también se les conoce como topologías completas), porque asisten tanto en las piernas, cómo también en los brazos.

Los exoesqueletos para el aumento del rendimiento humano pertenecen a una clase especial de sistemas robóticos portátiles desarrollados para aumentar las capacidades de la fuerza humana en diversos ambientes (Lee *et al*., 2014). La principal característica de este tipo de dispositivos es que el operador humano "usa" el robot y controla los movimientos del robot moviendo sus extremidades de forma natural.

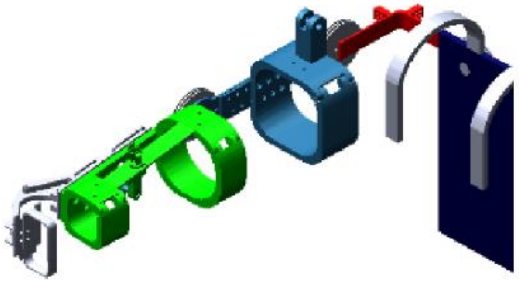


Figura 1. Exoesqueleto de extremidad superior (Vázquez-Sánchez *et al.*, 2019)

Los exoesqueletos de extremidades inferiores se pueden clasificar en tres grandes rubros, que son:

a) exoesqueletos de asistencia,

b) exoesqueletos de rehabilitación y

c) exoesqueletos de aumento de fuerza.



Figura 2.- Exoesqueleto de extremidad superior (Lara-Barrios *et al.*, 2015)

En primer lugar, los exoesqueletos de asistencia están enfocados a asistir la marcha de personas que han perdido la capacidad de caminar debido , lamentablemente , a alguna lesión en la médula espinal; *Mindwalker* (Wang *et al.*, 2015), *ReWalk™* (Zeilig *et al.*, 2012).

En segundo lugar, los exoesqueletos de rehabilitación son dispositivos para pacientes que más adelante, puedan vivir sin

ayuda del dispositivo para moverse. Son empleados para recuperar la movilidad de los músculos, el tratamiento consiste en "ayudar cuando es necesario", se espera que el paciente recupere su capacidad normal y se retira gradualmente la ayuda que brinda el dispositivo. La portabilidad no es considerada comúnmente, de hecho, el sistema se puede fijar a una cinta de correr bajo la supervisión de un médico. *Lokomat* (Frey *et al.*, 2006), ALEX II (Stegall *et al.*, 2013) .

Por último, los exoesqueletos de aumento de fuerza están diseñados, principalmente, para proporcionar al usuario sano dos ventajas: a) incrementar la fuerza más de lo normal o b) disminuir el esfuerzo físico al realizar una actividad. Un ejemplo es el primer exoesqueleto totalmente autónomo BLEEX (Zoss, Kazerooni and Chu, 2005)

Por otra parte, existen distintas actividades donde el ser humano transporta objetos, ya sea en la parte posterior o anterior. Por ejemplo: los bomberos transportan tanques de oxígeno, lo que reduce su movilidad y aumenta su fatiga (Park *et al.*, 2011). Los militares transportan mochilas de gran peso (Chartesis, 2000). Sin embargo, si el peso de la mochila no está bien distribuido o, que el usuario cargue un peso mayor al permitido (más del 20% del peso corporal), esto puede ocasionar lesiones al usuario (Han *et al.*, 2012).

Por otra parte, algunas de las métricas que se deben considerar al momento de diseñar un exoesqueleto, son:

a) variabilidad entre personas,

b) las interfaces de conexión hombre-máquina,

c) rangos de movilidad,

d) confort,

e) esfuerzos aplicados a la estructura.

En este artículo se presentan algunos factores importantes a considerar en el diseño un exoesqueleto de extremidades inferiores para el transporte de carga, la diferencia de otros estudios es que sólo se considera el peso del exoesqueleto, en vez del usuario, lo que reduce significativamente los esfuerzos aplicados a la estructura.

2. ASPECTOS DE BIOMECÁNICOS

Los factores mecánicos de diseño de exoesqueletos de extremidades inferiores, de acuerdo con (Cenciarini and Dollar, 2011) son: grados de libertad (GDL), rangos de movimiento angular de las articulaciones, torque requerido en las articulaciones y velocidad angular.

2.1 Grados de libertad y componentes básicos del exoesqueleto

En la realización de un exoesqueleto es importante definir los grados de libertad (GDL). Los grados de libertad de un exoesqueleto de extremidades inferiores están ubicados en las articulaciones, ver Figura 3, y están localizados en: cadera, rodilla y tobillo.

La cadera es una articulación de tipo esférica. Sin embargo, una articulación artificial suele emplear tres movimientos: abducción/aducción (a/a), flexión/extensión (f/e), rotación externa/interna (ri/re). Ver Figura 4.

La articulación de la rodilla, no es una articulación de bisagra pura, sino que se mueve en un conjunto de translaciones y rotaciones, consta de seis grados de movimiento, ver Figura 5.. Tres rotaciones (f/e, ri/re, a/a) y tres translaciones (anterior/posterior, medial/lateral, compresión/distención). Sin embargo, por simplicidad es común emplear una articulación de bisagra para la rodilla.

Por último, la articulación del tobillo, que consta de tres movimientos: flexión dorsal/ plantar flexión (fd/pf), supinación/pronación (s/p), aducción/abducción (a/a). Ver Figura 6.

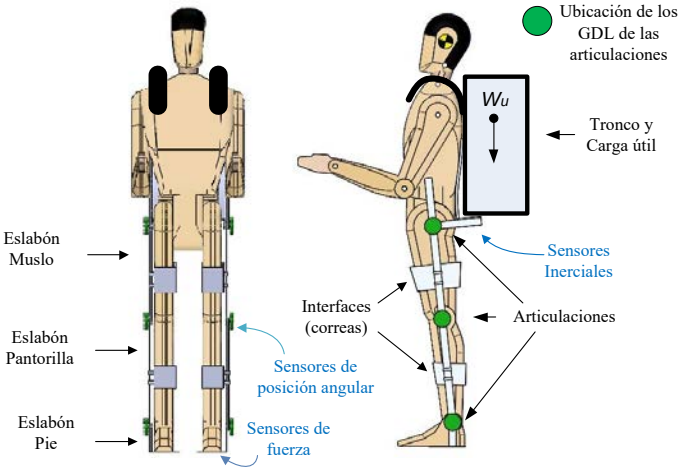


Figura 3. Esquema general de un exoesqueleto de extremidades inferiores, W_u es la carga adicional que transportara el usuario.

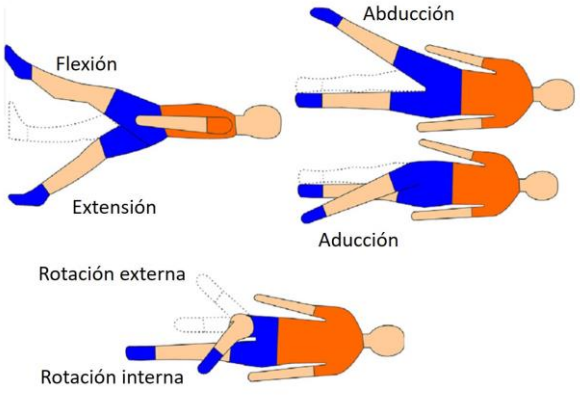


Figura 4. Movimientos básicos de la cadera

 ISSN en trámite

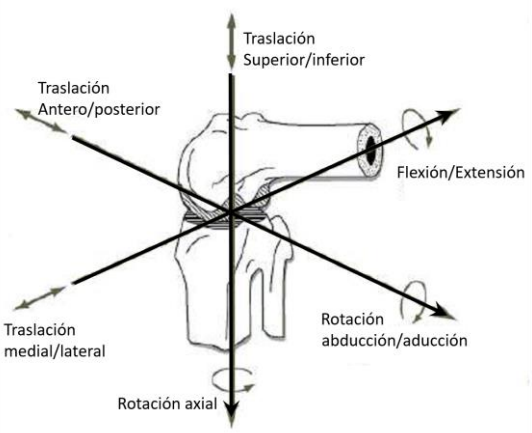


Figura 5. Movimientos básicos de la rodilla

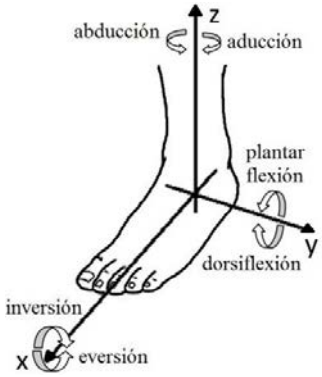


Figura 6. Movimientos básicos del tobillo

En la Figura 7 se muestran algunos sensores empleados para la adquisición de señales para el control de exoesqueletos. Estos sensores se colocan en los pies, para medir las fuerzas de reacción del exoesqueleto y del humano; en las uniones de revoluta para medir las posiciones y aceleraciones angulares; en los segmentos o eslabones para medir las posiciones inerciales y con los sensores tipo EMG medir la magnitud de las señales eléctricas producidas por los músculos, para utilizarlas como señales de control o predecir la intención de movimiento.

2.2 Antropometría humana

En el diseño de un exoesqueleto, es de suma importancia identificar el usuario, para dimensionar cada uno de los eslabones o elementos que conformarán el exoesqueleto. En este sentido, el modelo de Drillis y Cotini se utiliza para lograr la caracterización del cuerpo humano (Contini, Drillis and Bluestein, 1963), ver Figura 8. El trabajo de D&C es una buena aproximación para la obtención de la longitud, peso e inercia del cuerpo humano en función del peso total del paciente y de la altura. Asimismo, se consideraron las dimensiones antropométricas de hombres de la población de América latina de 18 a 60 años (Avila-Chaurand, Prado and González, 2007), en este caso se consideró una altura de 166.8 cm y 90 kg (Figura 9), ver Tabla I.

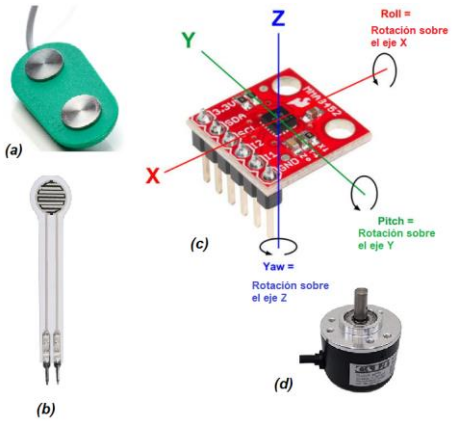


Figura 7. Ejemplos de sensores empleados en el diseño de exoesqueletos (a) Sensor de señales mioeléctricas, (b) Sensor de fuerza, (c) Acelerómetro, (d) Encoder

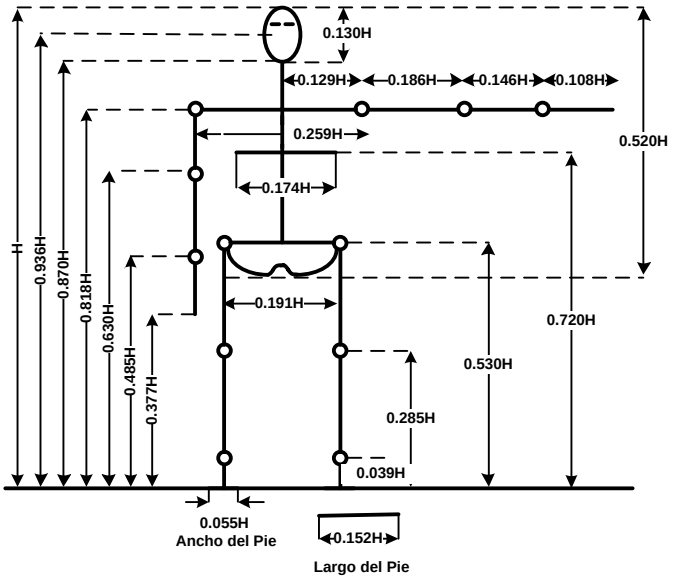


Figura 8. Esquema general de un humano (Contini, Drillis and Bluestein, 1963)

Tabla 1. Dimensiones antropométricas (166.8 cm, 90 kg)

Segmento	Masa (Kg)	Fracción del cuerpo	Longitud del segmento (cm)	Distancia del centro de gravedad (cm)	
				Proximal	Distal
Mano	0.54	0.108H	18	8.85	9.15
Antebrazo	1.44	0.145H	24.19	13.79	10.4
Brazo	2.52	0.188H	31.36	14.74	16.62
Cabeza y cuello	7.29	0.182H	30.36	12.20	18.16
Tronco	44.73	0.34H	56.71	28.36	28.35
Muslo	9	0.245H	40.87	23.17	17.7
Tibia	4.19	0.246H	41.03	23.26	17.8
Pie	1.35	0.152H	25.35	12.68	12.67
Cadera	--	0.191H	31.86	15.93	15.93

 ISSN en trámite

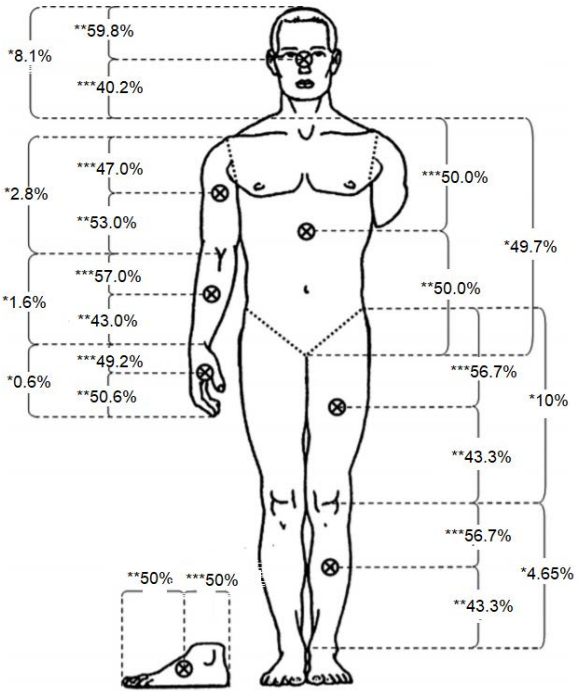


Figura 9. Modelo Humano. (*, Proporción de la masa del segmento, se expresa como un porcentaje de la *masa total corporal*; **, porcentaje de longitud del segmento desde el extremo *proximal*; ***, porcentaje de longitud del segmento desde el extremo *distal*. (Winter, 2009).

3. DISEÑO DEL EXOESQUELETO

Una vez obtenidas las dimensiones, aproximadas, de los eslabones se procede al diseño del exoesqueleto, donde se consideraron los siguientes aspectos:

a) Aplicación del exoesqueleto
b) Diseño de las articulaciones y dimensiones de los miembros estructurales (cinemática y selección del material)
c) Análisis dinámico
d) Análisis de esfuerzos

3.1 Aplicación del exoesqueleto

En este caso la aplicación del exoesqueleto es para personas saludables que requieren transportar objetos a la espalda. El límite máximo de peso permitido, para este estudio, son 20 Kg. (Figura 3). La velocidad de marcha permitirá qué, durante la fase de apoyo, ya sea en un pie o en dos, el peso se distribuya hacia la estructura y eventualmente a tierra. En la fase de oscilación el peso se transferirá a tierra con un solo apoyo. En esta fase donde se recibe el mayor esfuerzo por parte de la carga externa.

3.2 Diseño de las articulaciones y dimensiones de los miembros estructurales (cinemática y selección del material)

El sistema propuesto tiene 4 GDL por pierna: cadera (f/e, a/a), rodilla (f/e) y tobillo (f/e), como se ilustra en la Figura 10. Aunque en los análisis cinemáticos se toma en cuenta solo el plano sagital, es importante analizar otros planos, en este caso se consideró brindar movilidad a la abducción/aducción, en la cadera, dada la necesidad de balancearse durante la marcha.

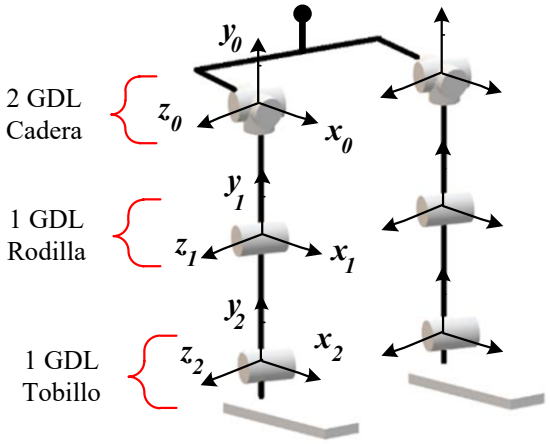


Figura 10. Grados de libertad seleccionados.

Existen algunos estudios relacionados al análisis cinemático y dinámico, por ejemplo (Yali and Xingsong, 2008), (Hamsan, 2012). Sin embargo, en este caso el análisis cinemático y dinámico se simplificó a dos grados de libertad, para una pierna considerando el plano sagital, ver Figura 11. Considerando a L_1 y L_2, el muslo y la tibia, respectivamente; L_{c1} y L_{c2} son las distancias proximales al centro de masa de los eslabones muslo y tibia, respectivamente; q_1 y q_2 corresponden a las posiciones angulares de los eslabones. Por parte, τ_1 y τ_2 corresponden a los torques requeridos para los movimientos de flexión/extensión. Este análisis fue adaptado, de acuerdo a esta aplicación.

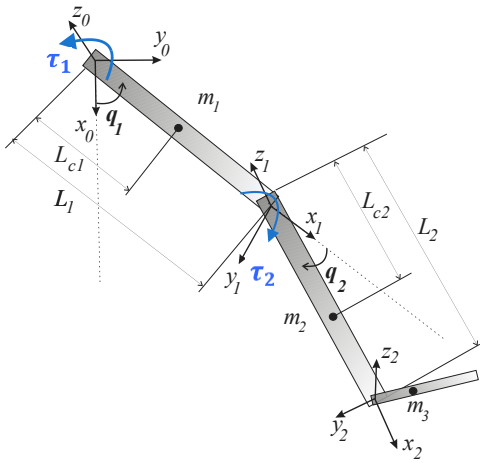


Figura 11. Parámetros de simulación para la pierna derecha durante la subfase de oscilación.

 ISSN en trámite

Análisis cinemático directo

Uno de los pasos más importantes, para el movimiento del exoesqueleto, es el conocer la cinemática del exoesqueleto. Para identificar la cinemática se emplea la técnica de Denavit y Hartenberg (D-H). Ecuación (1).

Tabla 2. Parámetros de Denavit-Harterberg

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	0	L_1	0º
2	θ_2	0	L_2	0º

$$T = \begin{bmatrix} C(\theta_1+\theta_2) & -S(\theta_1+\theta_2) & 0 & L_1C(\theta_1)+L_2C(\theta_1+\theta_2) \\ S(\theta_1+\theta_2) & C(\theta_1+\theta_2) & 0 & L_1S(\theta_1)+L_2S(\theta_1+\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

En cuanto a la biomecánica, se han realizado pruebas para caracterizar el movimiento. Estas curvas de movimiento se han utilizado para definir el perfil de trayectoria que debe seguir cada eslabón. En la Figura 12 se puede observar el perfil de las trayectorias del muslo y tibia, durante un ciclo de marcha. El recuadro de color verde representa al porcentaje de marcha, iniciando con el golpe de talón en el suelo.

Rangos de movimiento de los eslabones

Para determinar el rango de movimiento, se consideró el movimiento que realiza una persona cotidianamente y se comparó con el análisis cinemático (Tabla 3).

Tabla 3. Rango de movimiento en las articulaciones

Articulación	Rango de flexión	Rango de extensión
Cadera	120º	-20º
Rodilla	100º	0º
Tobillo	20º	-15

Dimensión de los elementos estructurales

Dada la diversidad de la población se seleccionaron dimensiones que fuesen ajustables acorde al percentil de la población latinoamericana (Tabla 4). De esta forma el exoesqueleto se adapta a diferentes estaturas y pesos corporales.

Tabla 4. Dimensiones

Miembro	Dimensión (mm)	
Cadera	Ancho	400-520
Muslo	Largo	360-440
Tibia	Largo	350-510
Tobillo	Altura	105

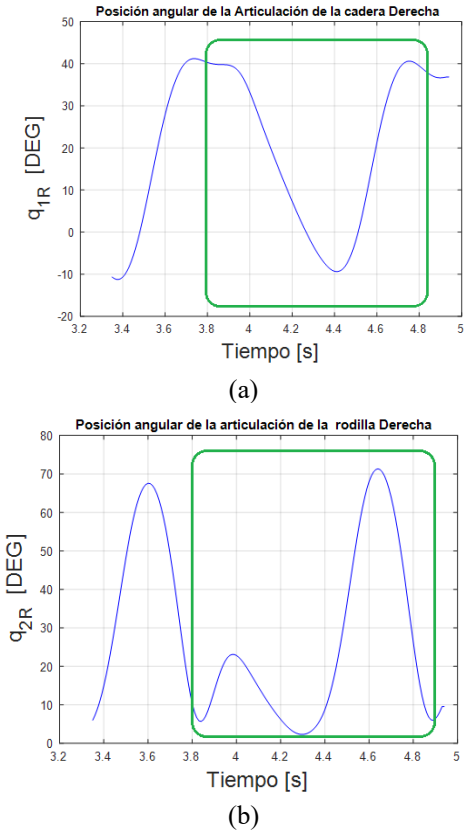


Figura 12. Posiciones angulares de los eslabones, (a) muslo derecho, (b) tibia derecha.

Selección del material

Para la selección del material se utilizó una metodología propuesta por (Volkan, 2007). Donde hace un comparativo del acero, aluminio y hierro fundido. Después del comparativo menciona que la densidad es una unidad de la masa por unidad de volumen. El acero tiene la densidad, más elevada, mientras que el aluminio tiene una densidad más baja. Por lo tanto, el aluminio es el material más empleado en robótica. Esto se debe a sus propiedades que fuerte y ligero. Esta consideración es importante porque se debe diseñar el exoesqueleto lo más ligero posible y con materiales provistos en el mercado. Por consiguiente, se seleccionó el Aluminio y el perfil de Aluminio.

Tabla 5. Propiedades mecánicas del aluminio 6061

Material	Resistencia a la fluencia S_y	Resistencia última S_u	Módulo de elasticidad E	Resistencia al cortante τ_y
Aluminio 6061-T6	240 Mpa	260 Mpa	70 000 Mpa	140 Mpa

Tabla 6. Propiedades mecánicas del perfil de aluminio 20x20

Material	Resistencia a la fluencia S_y	Fuerza de tensión S_u	Superficie	Módulo de elasticidad (E) [N/mm²]	Momento de Inercia (I)
Perfil Bosch 20x20	200 Mpa	250 Mpa	166 mm²	70 000	0.71 cm⁴

3.3 Análisis dinámico

Empleando la metodología de Euler-Lagrange y considerando 2 GDL en plano sagital. La representación de una pierna en la fase de oscilación de la Figura 11 se determina la ecuación del torque (2). La ecuación (2) fue expuesta por (Maldonado-Del-Toro *et al.*, 2011), para un robot rígido con dos grados de libertad.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q,\ddot{q})\dot{q} + g(q) \qquad (2)$$

$$\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}M_{11}(q) & M_{12}(q)\\ M_{21}(q) & M_{22}(q)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{q}_1\\ \ddot{q}_2\end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix}C_{11}(q,\dot{q}) & C_{12}(q,\dot{q})\\ C_{21}(q,\dot{q}) & C_{22}(q,\dot{q})\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}g_1(q)\\ g_2(q)\end{bmatrix} \qquad (3)$$

Los parámetros para el análisis dinámico se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de la simulación dinámica

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
m_1	Masa 1	0.88	Kg
m_2	Masa 2+ Masa 3	1	Kg
L_1	Longitud 1	450 mm	mm
L_2	Longitud 1	490 mm	mm
L_{c1}	Longitud CM 1	250 mm	mm
L_{c2}	Longitud CM 2	420 mm	mm
I_1	Momento de Inercia 1	0.014	Kg m²
I_2	Momento de Inercia 2	0.030	Kg m²

4. PROTOTIPO VIRTUAL

4.1 Diseño en CAD

En la Figura 13 se muestra el diseño de un exoesqueleto para extremidades inferiores, el cual fue propuesto para que el usuario pueda trasladar una carga en la parte trasera (espalda).

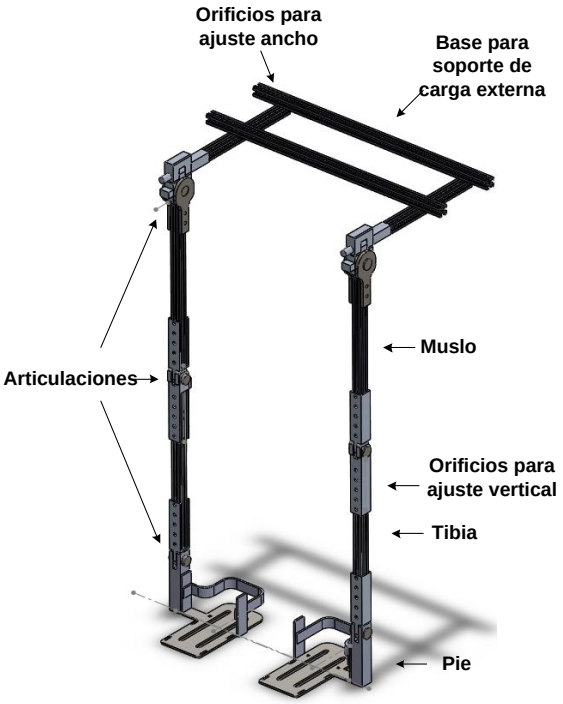


Figura 13. Prototipo virtual de exoesqueleto para extremidades inferiores

5. CONCLUSIONES

En este artículo se presentan algunos aspectos que pueden ser considerados al diseñar un exoesqueleto de extremidades inferiores. Las longitudes de los eslabones se ajustan a la mayoría de la población en América Latina. En el diseño se consideró emplear materiales de disponibles en el mercado. Los análisis arrojaron buenos resultados para continuar la fase de diseño: diseño de las correas y sistema de activación para las articulaciones.

REFERENCIAS

Avila-Chaurand, R., Prado, L. R. and González, E. L. (2007) *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana*. Edited by Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México.

Cenciarini, M. and Dollar, A. M. (2011) 'Biomechanical Considerations in the Design of Lower Limb Exoskeletons', in *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICORR.2011.5975366.

Chartesis, J. (2000) 'Load stress; carrier strain: implications for military and recreational backpacking', *Journal of the Ergonomics Society of South Africa*, 12(1), pp. 25–47.

Contini, R., Drillis, R. and Bluestein, M. (1963) 'Determination

of Body Segment Parameters', *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 5(5), pp. 493–504. doi: 10.1177/001872086300500508.

Frey, M. *et al.* (2006) 'A Novel Mechatronic Body Weight Support System', *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 14(3), pp. 311–321. doi: 10.1109/TNSRE.2006.881556.

Hamsan, R.-B. (2012) 'Exoskeleton for Human Energy Augmentation The Shadow Suit concept Lower extremity development of The Shadow-Suit', in *2012 Southeast Asian Network of Ergonomics Societies Conference (SEANES)*. IEEE, pp. 1–5. doi: 10.1109/SEANES.2012.6299573.

Han, Y. *et al.* (2012) 'The biomechanics effects of back and front pack load carriage for human locomotion', in *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2012*, pp. 1621–1626. doi: 10.1109/ICMA.2012.6284379.

Lara-Barrios, C. M. *et al.* (2015) 'Sit-to-Stand Simulation for Torque Estimation on Lower Limb Joints', in *International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering*, pp. 116–121. doi: 10.1109/ICMEAE.2015.33.

Maldonado-Del-Toro, H. M. *et al.* (2011) 'Modelado y simulación de un robot rígido de dos grados de libertad', *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol.5,* 5(Marchl 2011), pp. 322–327.

Park, K. *et al.* (2011) 'Assessing gait changes in firefighters due to fatigue and protective clothing', *Safety Science*. Elsevier Ltd, 49(5), pp. 719–726. doi: 10.1016/j.ssci.2011.01.012.

Stegall, P. *et al.* (2013) 'Rehabilitation Exoskeleton Design : Exploring the Effect of the Anterior Lunge Degree of Freedom', *IEEE Transactions on Robotics*. IEEE, 29(4), pp. 838–846. doi: 10.1109/TRO.2013.2256309.

Vazquez-Sánchez, L. *et al.* (2019) 'Control PID para un exoesqueleto de 3 gdl, para rehabilitación de personas que han sido afectadas por un accidente cerebro-vascular.', in CENIDET (ed.) *3era. Jornada de Ciencia y Tecnológia Aplicada*. Cuernavaca, Morelos.

Volkan, G. (2007) *Wearable Exoskeleton Robot Design*.

Wang, S. *et al.* (2015) 'Design and Control of the MINDWALKER Exoskeleton', *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. IEEE, 23(2), pp. 277–286. doi: 10.1109/TNSRE.2014.2365697.

Winter, D. A. (2009) *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Fourth Ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Yali, H. and Xingsong, W. (2008) 'Kinematics Analisys of Lower Extremity Exoskeleton', in IEEE (ed.) *Chinese Control and Decision Conference*. Yantai, Shandong, China, pp. 2837–2842. doi: 10.1109/CCDC.2008.4597843.

Zeilig, G. *et al.* (2012) 'Safety and tolerance of the ReWalk™ exoskeleton suit for ambulation by people with complete spinal cord injury: A pilot study', *Journal of Spinal Cord Medicine*, 35(2), pp. 96–101. doi: 10.1179/2045772312Y.0000000003.

Zoss, A., Kazerooni, H. and Chu, A. (2005) 'On the Mechanical Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)', in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4353–4360. doi: 10.1109/IROS.2005.1545453.

Diseño e Implementación de un Robot de Asistencia y Servicio para Aplicaciones de Jardinería

Evan Rodrigo Salazar Romero, Brian Javier Zariñana, Uriel Granados Salazar, Axel Alejandro Contreras Alonso, Erick Enrique Bahena Flores, Oswaldo Salazar Andrade, Aldo Manuel Sánchez Vargas, Jonathan Villanueva Tavira, Héctor Miguel Buenabad Arias
Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos
División Académica de Mecánica Industrial
Laboratorio de Internet de las Cosas
Emiliano Zapata, Morelos, México

Resumen - En el siguiente artículo se documenta la fase de desarrollo de un robot de servicio el cual su función es el podado del césped en zonas delimitadas, como un patio/jardín, evadiendo obstáculos desde 4 diferentes posiciones y con un sistema de corte multinivel. Todo esto mediante un sistema de sensores SHARP controlados por un Arduino MEGA. Los puntos de desarrollo abarcados en el siguiente documento son: programación, diseño y construcción del chasis, carcaza y ruedas, así como el diseño del sistema de corte.

1. INTRODUCCIÓN

El término" Robots *de Servicio*" apareció a finales de los años 80 como una necesidad de desarrollar máquinas y sistemas capaces de trabajar en entornos diferentes a los fabriles. Los Robots de Servicio tenían que poder trabajar en entornos no estructurados, en condiciones ambientales cambiantes y con una estrecha interacción con los humanos. En 1995 fue creado por la *IEEE Robotics and Automation Society,* el *Technical Committee on Service Robots*, dicho comité definió en el año 2000 las áreas de aplicación de los Robots de Servicios, que se pueden dividir en dos grandes grupos: 1) sectores productivos no manufactureros tales como edificación, agricultura, naval, minería, medicina, etc. y 2) sectores de servicios propiamente dichos: asistencia personal, limpieza, vigilancia, educación, entretenimiento, etc. (Aracil, 2008)

Durante los últimos años, los robots de servicio han ido evolucionando en base a las necesidades de los seres humanos, con la intención de ser de utilidad para cualquier persona han sido más u más las aplicaciones de los mismos. Podemos encontrar robots de rehabilitación física y motriz para pacientes, robots de carga para trabajos pesados o incluso domésticos, que van sus tareas desde lavar trastes hasta el aseo completo del hogar.

Todas estas aplicaciones varían considerablemente en las escalas de precisión y capacidad cognitiva. Para equipar a los robots ubicuos con estos avances, presentamos tecnología de inteligencia (InT) para robots. (Mohammed, 2015)

1.1 Competitividad en México

El desarrollo de la robótica en México permitirá el abaratamiento de esta tecnología, hará más eficiente los procesos en diversos sectores productivos, mejorará su calidad y por tanto incrementará la competitividad del país. Por otro lado, los robots de servicio ayudarán a impulsar las políticas públicas, como se plantea más adelante, lo cual contribuirá a formar una sociedad con mayor equidad. (E.F. Morales, 2019)

En todo el país han estado surgiendo competencias de innovación por parte del sector privado o de universidades, con el objetivo de mostrar proyectos a posibles inversionistas para su desarrollo y salida al mercado. Muchos de los proyectos en este tipo de competencias son de robots de servicio, los cuales de ser lanzados al mercado supondrá ampliación en el creciente y cada vez más demandante mercado de este tipo de robots, lo cual conllevará en el abaratamiento de los mismos.

1.2 Desafíos para la robótica de asistencia social y doméstica

La forma de realización física del robot, su presencia y apariencia física, y su contexto compartido con el usuario, son fundamentales para crear una relación de compromiso prolongada con el usuario. Sostenemos que un robot adaptable, confiable y fácil de usar que puede proporcionar un protocolo de terapia personalizado atractivo y motivador para los participantes en la escuela, la clínica y, en última instancia, los entornos domésticos, puede establecer una relación humano-robot muy compleja y completa. Para que esto sea posible, dichos robots deben estar dotados de habilidades y capacidades de interacción orientadas al ser humano, exhibir un contexto y un comportamiento social apropiado para el usuario, y centrar la atención y la comunicación en el usuario para ayudarlo a alcanzar objetivos específicos. (Adriana Tapus, 2017)

A pesar de que la tecnología robótica de asistencia social aún se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo, la próxima década promete sistemas que se utilizarán en hospitales,

escuelas y hogares en programas terapéuticos que controlan, alientan y ayudan a sus usuarios. Este es un momento importante en el desarrollo del campo, cuando la comunidad técnica de la junta y las poblaciones beneficiarias deben trabajar juntas para dar forma al campo hacia su impacto previsto en la mejora de la calidad de vida humana. (Adriana Tapus, 2017)

1.3 Automatización asistida aplicada a los robots de servicio

La estructura de la población en las naciones industriales está cambiando. Habrá menos personas para atender a un número creciente de personas mayores. Este problema es la motivación para numerosos estudios también en robótica y automatización. En lugar de mudarse a instituciones de atención, es más deseable y a menudo económicamente viable vivir en casa el mayor tiempo posible. (Panu Harmo, 2015)

La automatización del hogar es más que un sistema de aire acondicionado automatizado. La automatización del hogar incluye alguna forma de red doméstica e inteligencia o lógica distribuida alrededor de la red o centralizada en una unidad de control específica. (Panu Harmo, 2015)

2. PROYECTOS SIMILARES

Diseño e implementación de un robot móvil de jardinería con sistema de seguimiento facial integrado. Autores: Chung-Liang Chang, Jian-Fong Chen, Jia-Heng Jhu

Resumen

Este documento propone un robot de jardinería capaz de seguir visualmente y evitar obstáculos.

El sistema propuesto diseña una interfaz hombre-máquina en el extremo remoto para facilitar la vigilancia y el control emergente de la ubicación del robot. Este sistema se implementa en un prototipo de robot de jardinería, que puede compartir la tarea de los agricultores y proporcionar el transporte de mercancías. (Chung-Liang Chang, 2013)

Robot de jardinería basado en Android con modelo difuso de conjuntos variables. Autor: Pikulkaew Tangtisanon

Resumen

El objetivo de este documento es construir un robot de jardinería basado en Android que pueda ser controlado por un teléfono inteligente con sistema operativo Android a larga distancia. Además, el robot se puede usar para verificar la humedad del suelo y enviar la información a un servidor en la nube. La información del servidor se utilizará en el algoritmo difuso para determinar el plan de plantación para el usuario. (Tangtisanon, 2017)

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ROBOT ASISTENTE CORTADOR DE CESPED

En este apartado abordaremos la parte técnica del proyecto dividiéndola en tres fases, la parte electrónica, la parte de diseño y la parte mecánica del robot respectivamente.

3.1 Visión artificial.

El censado del robot de servicio es llevado a través de sensores infrarrojos tipo de “SHARP” analógicos que a través de su visión puede determinar la distancia de un objeto, con base a lo anterior el movimiento del robot es determinado por los sensores, es decir, si los sensores detectan un objeto el robot podrá tomar una decisión de acuerdo al escenario en el que se encuentre a través de inteligencia artificial programada como hacer giros, esquivar obstáculos, detenerse, entre otras instrucciones.

3.2 Diagrama de bloques sistema de control.

El robot es capaz de ejecutar decisiones adecuadas al escenario en el que se encuentre durante su funcionamiento, es decir, el sistema mecánico está directamente conectado a la visión artificial y de la misma manera, la visión artificial puede determinar la mejor decisión, movimiento o instrucción que el robot pueda realizar durante su ejecución de funcionamiento. Si alguno falla es posible encontrar fallas de funcionamiento ya que es un sistema de control en cascada, la parte fundamental de la toma de decisiones es realizada en los actuadores. El robot a través de la visión puede determinar el funcionamiento de los motores y su movimiento. (Figura 1)

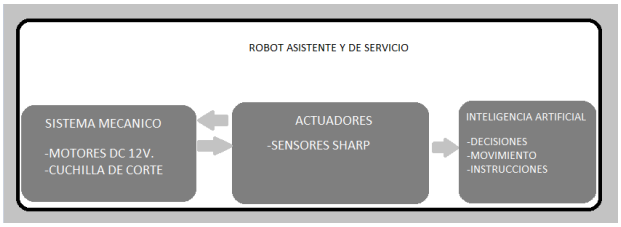


Fig. 1. Diagrama de Bloques sistema de control.

El movimiento de los motores es controlado por un dispositivo puente H L298n que permite cambiar el flujo de voltaje a través de los motores de DC haciendo que el rotor realice un giro en sentido horario o antihorario. De este modo el robot es capaz de realizar giros en su eje, cambiar de dirección e inmovilizarse.

3.3 Programación empleada.

La programación es realizada bajo la tarjeta de programación Arduino, esta permite tener el control de la visión artificial SHARP, también de poder colocar las instrucciones de programación a los motores de corriente directa.

 ISSN en trámite

La programación está distribuida por secciones:

La primera sección es la inclusión de librerías de control, utilizadas para hacer uso de la visión SHARP. Con ella se puede tener una interpretación de lo que el sensor esta obteniendo en un valor analógico de entre 0 a 1023 bits y realizar una conversión por medio de una fórmula matemática para determinar el valor en centímetros (la fórmula es dada por el fabricante). Además, se puede seleccionar en el modelo de sensor la distancia a la que el sensor este fabricado ("model1 430") 430 hace mención a el valor mínimo el primer digito 4 cm y 30 cm como segundo digito, estos son fabricados de diferentes características y en este caso especifico es usado el 430.

La segunda sección es la selección de pines digitales del modulo de puente H. Con ellos se puede lograr cambiar el flujo de corriente de acuerdo al escenario en el que el robot, de esta manera controlar el giro del rotor mediante programación. (Véase anexo A)

La segunda sección de la programación es la selección de entradas y salidas digitales de la tarjeta de programación. En este caso especifico todas son salidas ya que de los puertos 8 al 10 se tiene una salida de voltaje específica realizando un intercala miento de ellos, o todos juntos en el mismo tiempo de ejecución para determinar el movimiento del rotor. En esta misma sección es interpretada la señal analógica a centímetros mencionada anteriormente. (Véase anexo B)

La tercera sección del código es la impresión por medio del buffer para visualizar los datos traducidos de la visión artificial que proporcionan los sensores SHARP (Cuatro interpretaciones diferentes para cada uno de ellos). (Véase Anexo C)

La sección final (4) es la programación de las instrucciones que son determinadas por condicionales "*If*" (En programación estos condicionales ayudan a determinar acciones dentro del código). Esto determina en qué momento el flujo de voltaje viajará en sentido horario del rotor o en su defecto en sentido antihorario del rotor. Las instrucciones son diseñadas a partir de posibles escenarios en los que el robot durante su funcionamiento pueda llegar a tener (involucrando la mayoría de ellos) en este caso fueron agregados once posibles escenarios en donde los objetos juegan un papel importante en conjunto con la visión artificial. (Véase anexo D)

Se realizan las comparaciones de todas las posibles condiciones de movimiento y se determina la ejecución de dirección del robot previamente mencionado, controlados por condicionales "*If, Else if y Else"* (sentido de rotor).

Las conexiones para dicho control son las siguientes. (Figura 3)

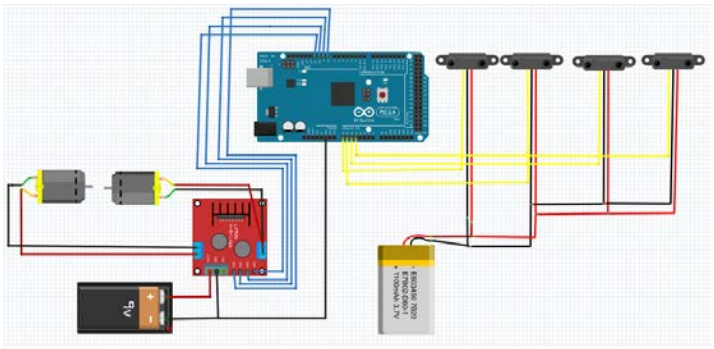


Fig. 2. Circuito eléctrico control de movimiento.

La batería elegida para alimentar a los motores y al microcontrolador Arduino, es una batería de polímero de iones de litio, comúnmente conocida como LiPo, de 8000mAh a 12V, lo cual entregará suficiente corriente para alimentar el sistema de propulsión del autómata al nivel de voltaje deseado.

Fase de diseño

Se desarrolló un pequeño prototipo en madera, que sirvió de inspiración para el diseño final del robot. Dicho prototipo se adaptó a la necesidad de tener una detección de obstáculos en distintas direcciones, por lo cual se optó por dotar de 5 lados al robot. Sobre estos 5 lados se realizó la programación ya mencionada anteriormente en este documento. El diseño final del autómata se realizó en software CAD como se muestra en la siguiente figura. (Figura 4)

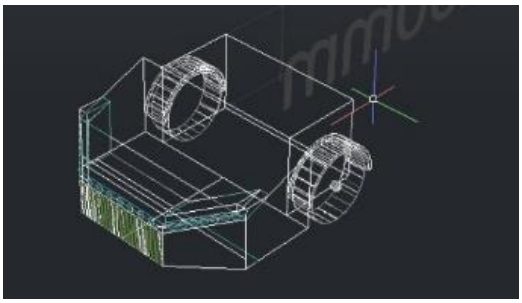


Fig. 3. Diseño CAD del robot.

Las dimensiones utilizadas para el sistema de corte han sido diseñadas con base al diámetro aproximado de corte de la cuchilla. Con las medidas ya definidas se diseñó un modelo CAD del chasis con el espacio necesario para la cuchilla, el cual también cuenta con los 5 lados que caracterizan al robot. Dicho modelo se muestra a continuación. (Figura 5)

 ISSN en trámite

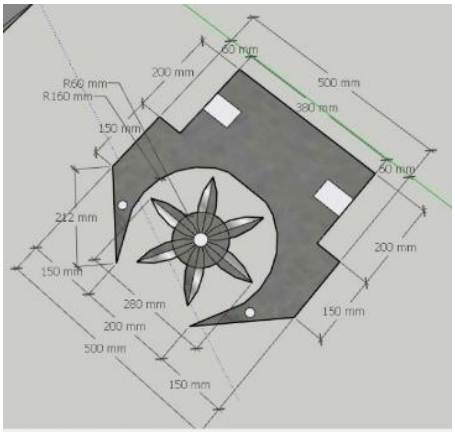


Fig. 4. Diseño de corte y chasis.

Para la construcción del diseño, se optó por utilizar fibra de vidrio como material para la carcasa del robot. A continuación, se puede apreciar el molde en el cual se realizó la carcasa.


Fig. 5. Molde de madera de la carcasa del robot.

Una de las ventajas del material utilizado es la resistencia a altas temperaturas que evitan que, en caso de un cortocircuito o incendio de alguno de los componentes del robot, este no se extienda a lo largo de la carcasa. Además de su resistencia al fuego, el grosor que posee la carcasa le otorga una capacidad de carga óptima, pues soporta pesos de más de 50kg encima de ella sin agrietarse o quebrarse. (Figura 6)


Fig. 6. Carcasa terminada del robot.

Para el diseño final del chasis del robot, se definieron las medidas similares a las de la carcasa, pero con una abertura circular donde se montará la cuchilla que se encargará de podar el pasto. El diseño se realizó en el software de diseño CAD *DS SolidWorks.* (Figura 7)

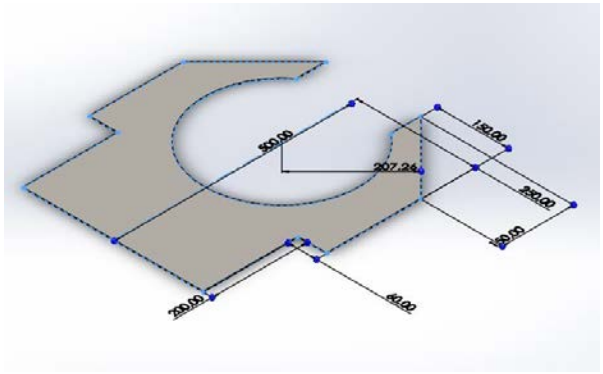
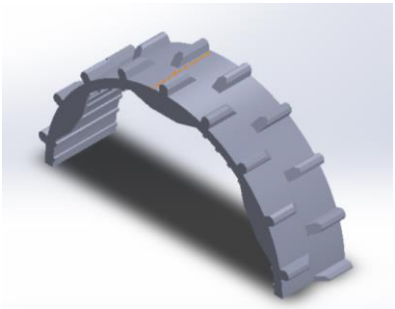


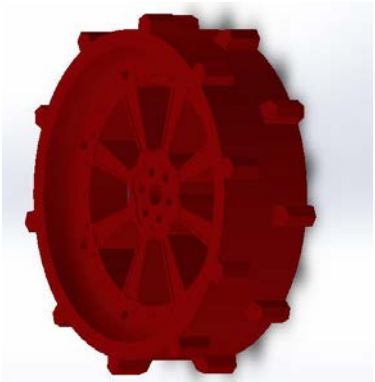
Fig. 7. Diseño del chasis del robot en SolidWorks.

Desarrollo mecánico.

Para el diseño de las ruedas, se tomó de inspiración modelos de autómatas todoterreno, los cuales tenían un diseño dentado en sus pistas de ruedas como se muestra a continuación: (Figura 8)


Fig. 8. Diseño dentado en pistas de rueda.

En el diseño final de la rueda, dimensiones definidas en 18cm de diámetro por 5cm de grosor. (Figura 9)


Fig. 9. Diseño final rueda en SolidWorks.

 ISSN en trámite

La construcción de la rueda se realizó en impresión 3D con material PLA (ácido poliláctico), estas cuentan con un espacio especial en la parte trasera de la rueda para un refuerzo con acero en caso de ser necesario. El tiempo necesario para imprimir cada rueda fue de 25hrs. El producto final se puede ver en la figura 10.

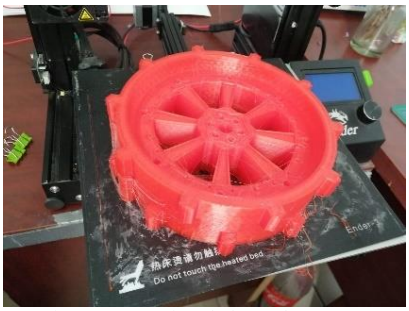
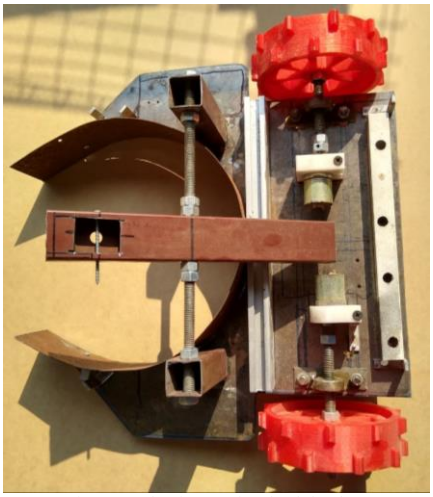


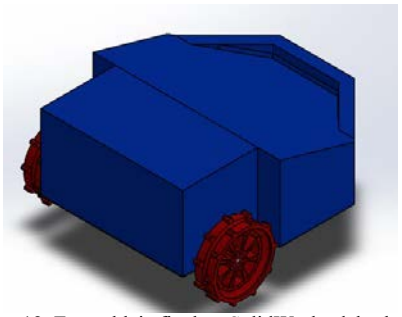
Fig. 10. Impresión de la rueda en PLA.

Sobre el mismo chasis, se montaron los motores del robot, los cuales son motores de 12V a 2A y las ruedas. También se instalaron unos pilares que sirven tanto de estructura para la carcasa como de guías sobre las cuales descansa el sistema de la cuchilla. El montaje final se puede ver en la siguiente figura: (Figura 11)

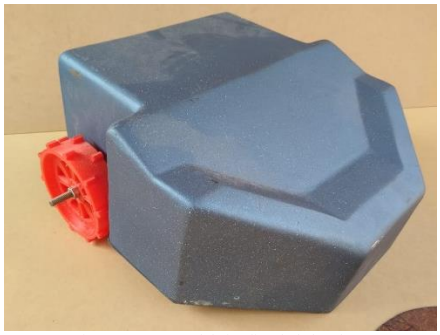

Fig. 11. Chasis terminado del robot.

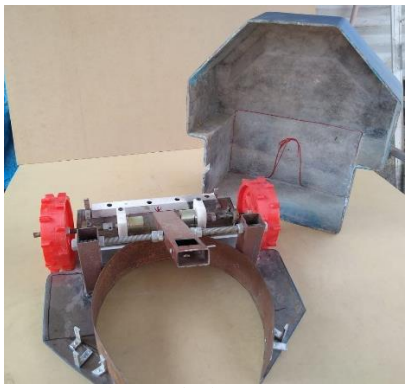
Sobre este mismo chasis también irán montadas las baterías que alimentarán los distintos sistemas del robot. El material del chasis es acero laminado de 1.5mm de espesor.

Para complementar se realizó un ensamble en SolidWorks de las partes del robot, para comprobar las medidas del robot y analizar por medio del programa puntos de fisura o de flexión.


Fig. 12. Ensamblaje final en SolidWorks del robot.

A continuación, se muestran imágenes del ensamblaje de los componentes mecánicos del robot. (Figuras 13 y 14)


Fig. 13. Ensamblaje final del robot.


Fig. 14. Chasis y carcasa.

Para la cuchilla que se encargará del corte se realizó un prototipo en SolidWorks de un carrete que contendrá un hilo de nylon de 2.5mm de diámetro, usado en las desbrozadoras convencionales, el cual está más que comprobado que puede cortar el pasto sin ningún tipo de complicación siempre que se posea un buen motor. (Ver figura 15)

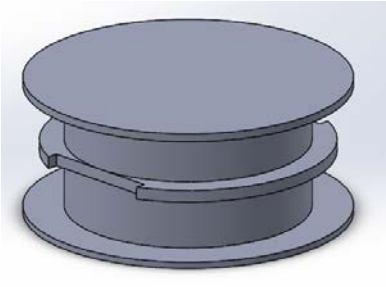


Fig. 15. Carrete para hilo de nylon.

De igual modo se realizó un prototipo de una cubierta para el mismo carrete. (Ver figura 16)

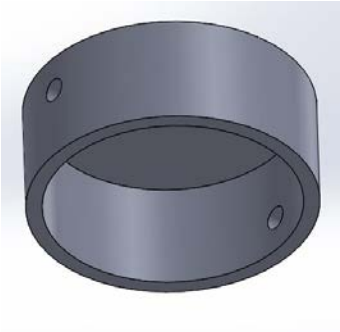


Fig. 16. Cubierta del carrete.

También se realizó un ensamblaje de ambas piezas para comprobar su perfecto encaje como se puede ver a continuación. Cabe destacar que el ensamble se configuró con vista de transparencia para apreciar ambas piezas. (Figura 17)

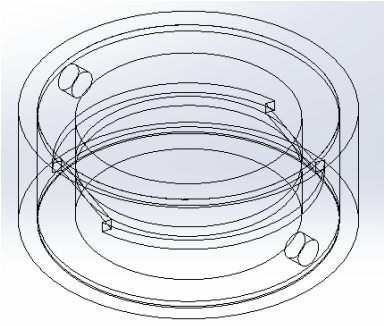


Fig. 17. Ensamble en SolidWorks del cabezal de la cuchilla tipo desbrozadora.

4. CONCLUSIONES

Este proyecto aún está en fase de desarrollo, se espera que sea un prototipo totalmente funcional, óptimo y autónomo en la realización del podado del césped en una vivienda, evadiendo obstáculos y con un control adaptable en el tamaño de podado. No obstante, se trabajará arduamente en el desarrollo y mejoramiento de éste para un funcionamiento más eficaz. Hubo una gran cantidad de obstáculos desde el inicio, pero se considera que de la concepción de los primeros bosquejos a la elaboración final de los componentes fue relativamente rápido. La falta de fondos entre otras situaciones externas fueron alentando el desarrollo de este proyecto pero se encuentra consideramos adelantado; con la dedicación necesaria cumplirá todas las expectativas e incluso queda abierto a posibles mejoras en su propósito de funcionamiento, pues su plataforma puede ser bastante flexible a otro tipo de aplicaciones.

REFERENCIAS

Robotic Industries Association. (27 de Enero de 2020). Robotics Online. Obtenido de Robotics Online: https://www.robotics.org/service-robots/what-are-professional-service-robots

Erwin Prassler, K. K. (2008). Cleaning Robots. En O. Khatib, Springer Handbook of Robotics (págs. 1153-1155). Berlin: Springer.

Rafael Aracil, C. B. (2008). Robots de Servicio. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 9-11.

Adriana Tapus, M. J. (2017). Socially Assistive Robotics, The Grand Challenges in Helping Humans Through Social Interaction. IEEE Robotics & Automation Magazine, 35-41.

Panu Harmo, T. T. (2015). Needs and Solutions - Home Automation and Service Robots for the Elderly and Disabled. Finlandia: Helsinki University of Technology.

E.F. Morales, L. S. (2019). Los Robots del Futuro y su Importancia para. INAOE, 3-4.

IEEE Robotics & Automation. (2011). Domestic Service Robot. IEEE Robotics & Automation Magazine, 18-20.

Mohammed, S. (2015). Intelligent Assistive Robots. Seoul, Korea, Republic of (South Korea): Springer, Cham.

Chung-Liang Chang, J.-F. C.-H. (07 de Marzo de 2013). Design and implementation of a gardening mobile robot with embedded face-tracking system. Obtenido de IEEE Xplore Digital Library: https://ieeexplore.ieee.org/document/6473487/authors#authors

Tangtisanon, P. (7 de Noviembre de 2017). Android-based gardening robot with fuzzy variable set model. Obtenido de IEEE Xplore Digital Library: https://ieeexplore.ieee.org/document/8096340/authors#authors

Saltaren, R. (2017). Róbotica Aplicada, Análisis y Diseño de robots paralelos y seriales con Matlab. Madrid: DEXTRA Editorial S.L.

ISSN en trámite

5. ANEXOS

Anexo A.

```
#include <SharpIR.h>

#define IR1 A0 // define signal pin
#define IR2 A1 // define signal pin
#define IR3 A2 // define signal pin
#define IR4 A3 // define signal pin
int led1=6;
int led2=7;

#define model1 430 // for GP2Y0A21YK0F  used 1080
#define model2 430 // for GP2Y0A21YK0F  used 1080
#define model3 430 // for GP2Y0A21YK0F  used 1080
#define model4 430 // for GP2Y0A21YK0F  used 1080


// Sharp IR code for Robojax.com
// ir: the pin where your sensor is attached
/*
2 to 15 cm GP2Y0A51SK0F  use 215
4 to 30 cm GP2Y0A41SK0F / GP2Y0AF30 series  use 430
10 to 80 cm GP2Y0A21YK0F  use 1080
10 to 150 cm GP2Y0A60SZLF use 10150
20 to 150 cm GP2Y0A02YK0F use 20150
100 to 550 cm GP2Y0A710K0F  use 100550
*/
SharpIR SharpIR1(IR1, model1);
SharpIR SharpIR2(IR2, model2);
SharpIR SharpIR3(IR3, model3);
SharpIR SharpIR4(IR4, model4);

int in1 = 8;
int in2 = 9;
int in3 = 10;
int in4 = 11;
```

Anexo B

```
void setup() {
    // Multiple Sharp IR Distance meter code for Robojax.com
 Serial.begin(9600);
 //Serial.println("Robojax Sharp IR  ");
 pinMode(in1, OUTPUT); //Pines de salida puente H
 pinMode(in2, OUTPUT);
 pinMode(in3, OUTPUT);
 pinMode(in4, OUTPUT);

 pinMode(led1,OUTPUT);
 pinMode(led2,OUTPUT);
 // extra pin for 5V if needed
 //pinMode(2,OUTPUT);// define pin 2 as output
 //digitalWrite(2, HIGH);// set pin 2 HIGH so it always have 5V
 //pinMode(3,OUTPUT);// define pin 2 as output
 //digitalWrite(3, HIGH);// set pin 2 HIGH so it always have 5V
  // Robojax.com 20181201
}

void loop() {

    // Sharp IR code for Robojax.com 20181201
    delay(500);

  unsigned long startTime=millis();  // takes the time before the loop on the library begins

  int dis1=SharpIR1.distance();  // this returns the distance for sensor 1
  int dis2=SharpIR2.distance();  // this returns the distance for sensor 2
  int dis3=SharpIR3.distance();  // this returns the distance for sensor 3
  int dis4=SharpIR4.distance();  // this returns the distance for sensor 4
```

Anexo C

```
Serial.print("Distance (1): ");
Serial.print(dis1);
Serial.println("cm");

Serial.print("Distance (2): ");
Serial.print(dis2);
Serial.println("cm");

Serial.print("Distance (3): ");
Serial.print(dis3);
Serial.println("cm");

Serial.print("Distance (4): ");
Serial.print(dis4);
Serial.println("cm");
```

Anexo D

```
  if(dis1<=7 && dis2<=7 && dis3<=7 && dis4<=7){
      digitalWrite(led1, LOW);
      digitalWrite(led2, LOW);
      digitalWrite(in1, LOW);
      digitalWrite(in2, LOW);
      digitalWrite(in3, LOW);
      digitalWrite(in4, LOW);

  }else if(dis4<=7 && dis1<=7) {
      digitalWrite(led1, HIGH);
      digitalWrite(led2, HIGH);
      digitalWrite(in1, LOW);
      digitalWrite(in2, HIGH);
      digitalWrite(in3, LOW);
      digitalWrite(in4, HIGH);


  }else if(dis3<=7 && dis2<=7 && dis1<=7) {
      digitalWrite(led1, LOW);
      digitalWrite(led2, HIGH);
      digitalWrite(in1, LOW);
      digitalWrite(in2, HIGH);
      digitalWrite(in3, HIGH);
      digitalWrite(in4, LOW);

  }else if (dis4<=7){
      digitalWrite(led1, HIGH);
      digitalWrite(led2, LOW);
      digitalWrite(in1, HIGH);
      digitalWrite(in2, LOW);
      digitalWrite(in3, LOW);
      digitalWrite(in4, HIGH);

 }else if(dis3<=7 && dis4<=7){
     digitalWrite(led1, HIGH);
     digitalWrite(led2, LOW);
     digitalWrite(in1, HIGH);
     digitalWrite(in2, LOW);
     digitalWrite(in3, LOW);
     digitalWrite(in4, HIGH);

 }else if(dis2<=7 && dis3<=7){
     digitalWrite(led1, LOW);
     digitalWrite(led2, LOW);
     digitalWrite(in1, HIGH);
     digitalWrite(in2, LOW);
     digitalWrite(in3, HIGH);
     digitalWrite(in4, LOW);

 }else if(dis2<=7 && dis1<=7) {
     digitalWrite(led1, LOW);
     digitalWrite(led2, HIGH);
     digitalWrite(in1, LOW);
     digitalWrite(in2, HIGH);
     digitalWrite(in3, HIGH);
     digitalWrite(in4, LOW);

 }else if(dis1<=7) {
     digitalWrite(led1, LOW);
     digitalWrite(led2, HIGH);
     digitalWrite(in1, LOW);
     digitalWrite(in2, HIGH);
     digitalWrite(in3, HIGH);
     digitalWrite(in4, LOW);
```

 ISSN en trámite

```
}else if(dis4<=7 && dis3<=7 && dis2<=7) {
    digitalWrite(led1, HIGH);
    digitalWrite(led2, LOW);
    digitalWrite(in1, HIGH);
    digitalWrite(in2, LOW);
    digitalWrite(in3, LOW);
    digitalWrite(in4, HIGH);

}else{
    digitalWrite(led1, HIGH);
    digitalWrite(led2, HIGH);

    digitalWrite(in1, LOW);
    digitalWrite(in2, HIGH);
    digitalWrite(in3, LOW);
    digitalWrite(in4, HIGH);
}
}
```