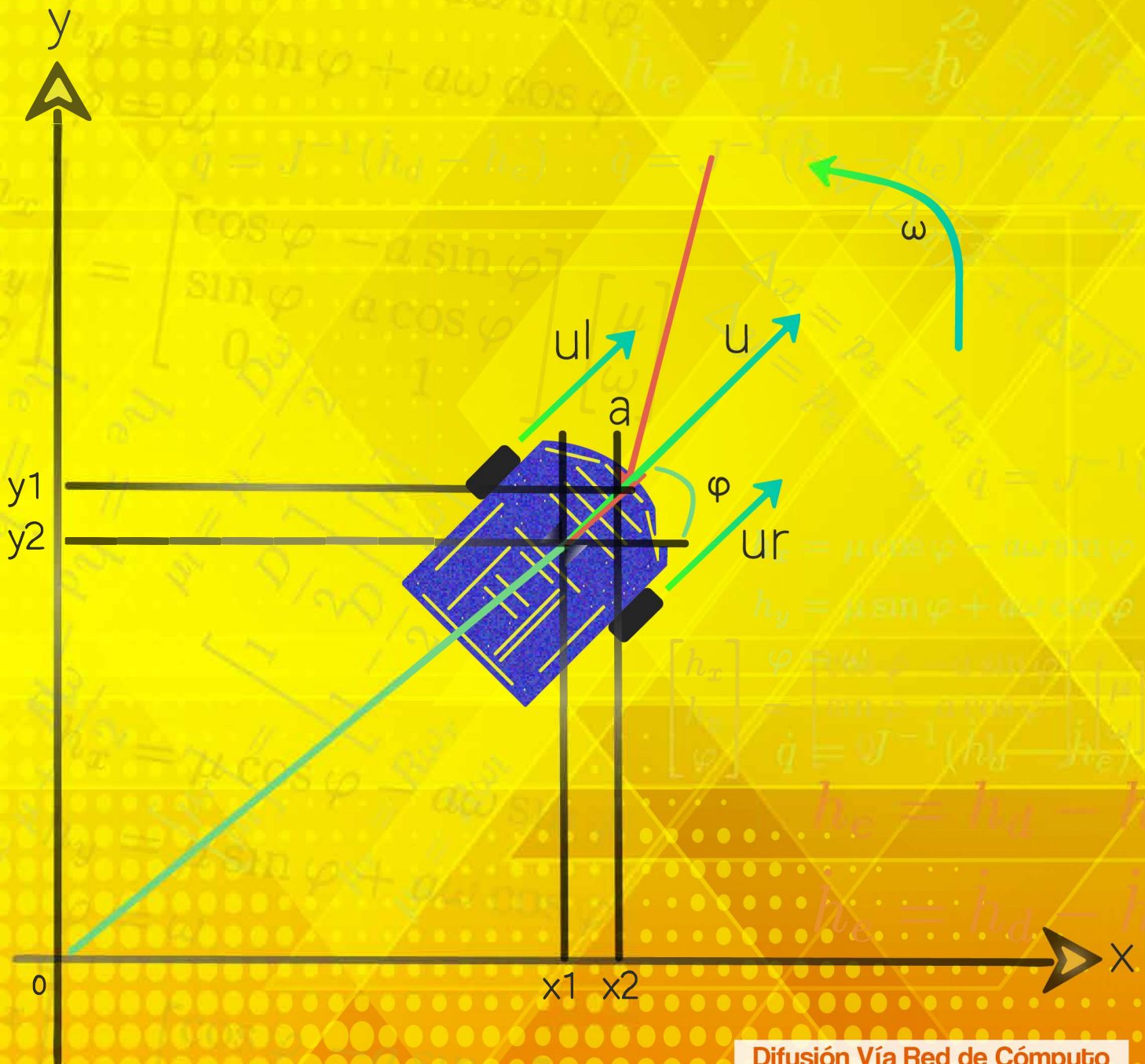


TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Enero - Junio 2021

Vol 4 / 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 4, NÚMERO 1, Enero - Junio 2021.

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 4, Núm. 1, Enero - Junio 2021, 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, 4 de Junio de 2021.

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. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Subdirector Académico del TecNM/CENIDET

Mtra. Rosa Olivia Maquinay Díaz
Subdirectora de Planeación y Vinculación del TecNM/CENIDET

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

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Jefe del Departamento de Desarrollo Académico

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

Dr. Hugo Estrada Esquivel
Jefe del Departamento de Ingeniería Electrónica

Dr. Andrés Blanco Ortega
Jefe del Departamento de Ingeniería Mecánica

Portada: Imagen recabada y tratada de la Figura 9 del artículo de Ingeniería Mecánica: Especificaciones del sistema del artículo diseño de un extrusor de inyección variable para manufactura adictiva.

Editorial

En este número que corresponde al Volumen 4, Número. 1 del periodo Enero-Junio 2021 de la Revista semestral Académica 'Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada', del Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), se presentan 48 artículos que fueron aprobados por un Comité de Arbitraje interno y externo, integrado por prestigiados especialistas en las áreas de Ciencias Computacionales, Ingeniería Electrónica e Ingeniería Mecánica nacionales e internacionales de Universidades, Centros de Investigación y Empresas que desarrollan Investigación como: Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), Tecnológico Nacional de México campus Cuautla, Chihuahua, Orizaba, Tuxtla Gutiérrez, Universidad Autónoma de Baja California, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Instituto Politécnico Nacional, Tecnológico de Monterrey campus Guadalajara, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Universidad de Guadalajara, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Universidad de los Andes, Venezuela y la Universidad de País Vasco, España.

Cabe mencionar que algunas de las temáticas de los artículos presentados en este número están orientadas a la Visión artificial y robótica, al Lenguaje natural, al Aprendizaje automático, a la Bioinformática, a la Ciencia de Datos, a las Vibraciones mecánicas y fatiga de materiales, Confort térmico en edificaciones, Aprovechamiento de energías renovables para procesos industriales, a la Biomecatrónica, a la Cinemática y dinámica de sistemas robóticos, al Modelado, estimación e identificación de sistemas, Diseño de sistemas de control, Aplicación en energías renovables, Generación distribuida y redes eléctricas inteligentes y a la Eficiencia energética, entre otras no limitadas.

Es importante señalar que los artículos publicados en este primer periodo de 2021, fueron expuestos por sus autores a través de las redes sociales del CENIDET, como parte de la 6ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada que se realizó del 21 al 23 de abril de 2021, de manera virtual, ante la contingencia sanitaria a un público abierto, cumpliendo una vez más con el objetivo de promover la investigación y la vocación científica-tecnológico entre estudiantes desde nivel licenciatura a posgrado, principalmente en las áreas de Ciencias Computacionales, Ingeniería Electrónica e Ingeniería Mecánica del Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET).

Finalmente, es importante destacar que en este número participaron en el Comité Técnico el Dr. Arturo Abúndez Pliego, quien también fue como Coordinador General de la 6ª. Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada; el Dr. Andrés Blanco Ortega, el Dr. Jesús Darío Mina, el Dr. Abraham Claudio Sánchez y el Dr. Nimrod González Franco, a quienes se les agradece su total apoyo.

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Editora

JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA

Comité de Arbitraje TecNM/CENIDET

Ciencias Computacionales

Dr. Dante Mújica Vargas
Dra. Alicia Martínez Rebollar
Dra. María Yasmín Hernández Pérez
Dra. Andrea Magadan Salazar
Dra. Olivia Graciela Fragozo Díaz
Dr. Javier Ortiz Hernández
Dr. Hugo Estrada Esquivel
Dr. Nimrod González Franco
Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez
Dr. Joaquín Pérez Ortega
Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles
Dr. Juan Carlos Rojhas Pérez
Dr. René Santoolaya Salgado
Dr. Moisés González García
Dr. Máximo López Sánchez
Dr. Gerardo Reyes Salgado
Dr. Raúl Pinto Elías
Dr. José Ruiz Ascencio

Ingeniería Electrónica

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Dr. Enrique Quintero Marmol Márquez
Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Dr. Jorge Enrique Lavín Delgado
Dr. Luis Gerardo Vela Valdés
Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Dr. Jesús Darío Mina Antonio
Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel
Dr. Jarniel García Morales
Dra. Susana Estefany de León Aldaco
Dr. Abraham Claudio Sánchez

Ingeniería Mecánica

Dr. Arturo Abúndez Pliego
Dr. Carlos Manuel Lara Barrios Dr.
Dariusz Szwedowicz
Dr. Efrain Simá Moo
Dr. Eladio Martínez Rayón
Dr. Jesús Arce Landa
Dr. Jorge Colín Ocampo
Dr. José Jassón Flores Prieto
Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda Dr.
Rafael Campos Amezcua
Dra. Claudia Cortés García
Dra. Sara Lilia Moya Acosta
M.C. Ramiro de Aquino García

Comité de Arbitraje Externo

Ingeniería Electrónica

Dr. Cornelio Morales Morales TecNM/IT Cuautla	Dr. Ricardo Eliu Lozoya Ponce TecNM/IT Chihuahua
Dr. José Pastor Rodríguez Jarquin TecNM/IT Orizaba	Dr. René Osorio Sánchez Universidad de Guadalajara
Dr. José Fermi Guerrero Castellanos Benemérita Universidad Autónoma de Puebla	Dr. Gabriel Calzada Lara Universidad Autónoma de San Luis Potosí
M.C. Samuel Gómez Peñate TecNM/IT Tuxtla Gutiérrez	

Ingeniería Mecánica

Dr. Carlos Alberto Mora Santos Dr. Jorge Bedolla Hernández TecNM/ IT Apizaco	Dr. José Antonio Arellano Cabrera Equipos Médicos Vizcarra
Dr. Enrique Alcudia Zacarías Dra. Miriam Siqueiros Hernández M.C. Benjamín González Vizcarra M.C. Eric Efrén Villanueva Vega M.C. Juan Antonio Paz González M.C. Mauricio Leonel Paz González Universidad Autónoma de Baja California	Dr. José Martínez Trinidad Instituto Politécnico Nacional
	Dr. Miguel Díaz Rodríguez Universidad de los Andes, Venezuela.
Dr. Iván Alejandro Hernández Pérez Dra. Karla María Aguilar Castro Universidad Juárez Autónoma de Tabasco	Dr. Quirino Estrada Barbosa Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Dr. Jesús Porcayo Calderón Dra. Laura Lilia Castro Gómez Universidad Autónoma del Estado de Morelos/CIICAp	Dra. Adriana Herlinda Vilchis González Universidad Autónoma del Estado de México
Dr. Joel Carlos Huegel West Tecnológico de Monterrey campus Guadalajara, Jalisco.	Dra. Aitziber Mancisidor Barinagarrementeria Universidad del País Vasco, España.

JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA

Consejo editorial de la publicación

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Editora

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Coeditor

Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Editores Asociados

Ing. Víctor Josué Ruiz Martínez
Sitio Web

Daniela Abigail Martínez Gama
Diseño de Portada

Daniela Abigail Martínez Gama
Oscar Edwin Chavez Zaragoza
Diseño Editorial

Comité Técnico de los Artículos de la 6ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada

Dr. Arturo Abúndez Pliego
Editor General de los Artículos

Dr. Nimrod Gonzáles Franco
Editor Asociado
Ciencias Computacionales

Dr. Jesús Darío Mina
Dr. Abraham Claudio Sánchez
Editores Asociados
Ingeniería Electrónica

Dr. Andrés Blanco Ortega
Dr. Arturo Abúndez Pliego
Editores Asociados
Ingeniería Mecánica

Dr. Arturo Abúndez Pliego
Administrador de la plataforma
EasyChair



CIENCIAS COMPUTACIONALES

Protocolo de Comunicación entre Herramientas de Análisis de Algoritmos Metaheurísticos y Framework de Optimización	10
Generación de mapas de calor emocionales para analizar el comportamiento de usuarios durante el proceso de evaluación de la experiencia de usuario	16
Ambiente Virtual de Aprendizaje para Aplicar Intervención Educativa Preventiva del Abuso Sexual Infantil	22
Comparación de las tarjetas Arduino y Raspberry pi usando algoritmos metaheurísticos	28
Aplicación móvil de oferta de cursos y temas de estudio para la enseñanza aprendizaje virtual	35
Comparación de detectores faciales para un sistema de videovigilancia de bajo costo	39
Atributos de Calidad para evaluar la usabilidad de las Páginas Web	46
Un modelo de automatización para el consenso aplicado al problema de selección de viajes con un enfoque de intervalos	52
Interfaz de Composición de Consultas a Bases de Datos que Permita Incluir Funciones de Agregación Combinadas con Subconsultas	58
Preparando la condensación del conocimiento arquitectónico en un ambiente ágil localizado	63
Evaluación de conjuntos de datos para reconocimiento de carga cognitiva y estrés	69
Desarrollo experimental para la medición del gasto energético asociado a la actividad física utilizando dispositivos vestibles	73
Desarrollo experimental de un sistema para la detección de caídas en adultos mayores	79



Análisis del uso de sensores LIDAR y RGB-D para la detección de objetos durante el desplazamiento vehicular	85
Implementación de Smart Contract para validación de créditos de actividades complementarias en el TecNM	91
Extensión del modelo de negocio CANVAS para proyectos de internet de las cosas	97
Modelo de etapas para el pre-procesamiento de datos heterogéneos en proyectos de IoT	103



INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Comparación de la corriente de salida del convertidor Buck 1 vs 5 fases	110
Estudio de capacitores conmutados apilados para el manejo de LED utilizando un esquema unipolar en un convertidor Flyback CA-CD	116
Análisis y Evaluación de la Capacitancia de Salida en Rectificadores con Filtro RC Monofásicos	122
Detección y diagnóstico de fallas basado en señales en un sistema de inyección electrónica de combustible	128
Control vectorial para inversor trifásico conectado a red para manejo de energía con funciones de compensación	135
Modelo Dinámico Convexo de una Grúa Mecánica con 3 Grados de Libertad	141
Control de Posición de Robots Manipuladores Mediante un Esquema PD con Ganancias Variables	147
Sistema de Monitoreo y Control para la Regulación de Glucosa en Pacientes con Diabetes Tipo 1	153



Control por Rechazo Activo de Perturbaciones de un Sistema Pendular mediante Simulink y NXP FRDM-K64F	158
Modelado Hidráulico del Sistema Circulatorio para Propósitos Didácticos	164
Estimación de Estados del Sistema Cardiovascular Mediante un Observador de Orden Reducido	179
Control Basado en un Observador de Estado para Sistemas con Señales Inciertas: Aplicado a una Estructura Tipo Edificio	174
Análisis de un Convertidor CD-CD Resonante con Alta Ganancia	180
Control de Trayectorias para un Robot Diferencial*	185
Control por Modelo Interno del Suministro de Oxígeno de una Celda de Combustible Tipo PEM Ballard Nexa 1.2-kW	191
Rectificador sin Puente de Diodos Multinivel con Corrección del Factor de Potencia	197
Estimación de la Capacidad de Generación de Energía Fotovoltaica a Partir de Imágenes Satelitales	203
Generación de Luz en el Espectro Visible Utilizando Lofina Como Medio Fluorescente	208



INGENIERÍA MECÁNICA

Análisis del comportamiento de vapor de agua en una turbina de adhesión de pequeña Potencia	213
Determinación del coeficiente de pérdida de calor en recintos mediante modelado dinámico RC con LORD	219
Sistema de rehabilitación para miembros superiores con cables flexibles	224



Analysis of LTA zeolite using EIS	230
Efecto de la velocidad de avance en torneado CNC en seco y el acabado superficial en la vida a fatiga de una aleación de aluminio 6061-T6P	235
Máquina de rehabilitación de cadera de 3 GDL	246
Estimación de la producción de entropía en materiales compuestos laminados: revisión de la literatura	247
Modelos y enfoques para la estimación de la pseudo ductilidad en laminados híbridos UD vidrio/carbono	253
Análisis experimental y numérico del impacto de la turbulencia en el desempeño de micro turbinas de eje horizontal	259
Simulación numérica de un intercambiador de calor tipo serpentín empotrado en la parte media de una losa de concreto	265
Revisión y evaluación de modelos de daño a la fatiga en materiales metálicos a través de métodos energéticos basados en la entropía	271
Diseño experimental para evaluar un calentador solar híbrido de escala industrial con monitoreo vía remota	278
Propuesta de alimentación energética de una cámara de deshidratación mediante sistemas FVT	283

Protocolo de Comunicación entre Herramientas de Análisis de Algoritmos Metaheurísticos y Framework de Optimización

J. G. Ponce-Nájera*. C. G. Gómez-Santillán*. N. Rangel-Valdez**. M. L. Morales-Rodríguez*. L. Cruz-Reyes*. H. J. Fraire-Huacuja*.

*Instituto Nacional de México – Instituto Tecnológico de Ciudad Madero – División de Estudios de Posgrado e Investigación, 89440, Madero, Tamaulipas (México) (Tel: 833-308-07-49; e-mail: G12071285@cdmadero.tecnm.mx, claudia.gomez@itcm.edu.mx, Lucila.morales@itcm.edu.mx, cruzreyeslaura@gmail.com, hector.fraire2014@gmail.com).

**Instituto Nacional de México – Instituto Tecnológico de Ciudad Madero – Investigador de CONACYT adjunto la División de Estudios de Posgrado e Investigación, 89440, Madero, Tamaulipas (México) (e-mail: nrangelva@conacyt.mx).

Abstract: La comunicación es un proceso esencial para la sociedad, permite a personas, empresas y sistemas expresar y compartir información. En este artículo se propone un protocolo de comunicación entre una herramienta de análisis de desempeño de algoritmos y un framework de optimización. La comunicación entre estas herramientas tiene el objetivo de robustecer el proceso de análisis de desempeño de algoritmos metaheurísticos. Mediante este trabajo se aporta un protocolo de comunicación genérica. Para validar el protocolo de comunicación propuesta se diseñó un experimento que demuestra el buen funcionamiento del proceso de comunicación.

Keywords: Algoritmos metaheurísticos, análisis de desempeño, formato de datos, framework, protocolo de comunicación.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los investigadores (Bartz, 2010; Bastiani, 2015; Castillo, 2011) desean seleccionar algoritmos que solucionen de la mejor manera los problemas reales de la vida cotidiana, no existe un algoritmo que supere a otros algoritmos para todas las instancias a analizar según (Wolper, 1995), por lo que un factor importante en el análisis de desempeño de algoritmos metaheurísticos (Gomez, 2014; Jiang, 2014) son la definición del problema, las instancias y las características del algoritmo.

Existen herramientas que permiten realizar el análisis de desempeño de algoritmos con base en distintos métodos, un ejemplo es VisTHAA por (Castillo, 2011) que es una herramienta de diagnóstico de algoritmos que incluye métodos de análisis de las instancias, los algoritmos de solución y del desempeño a través de la calidad de los resultados.

VisTHAA permite incluir algoritmos de solución para realizar pruebas de análisis, pero debido a que la metodología que permite la inclusión de nuevos algoritmos metaheurísticos de solución a problemas no se encuentra trabajada del todo, al investigador le resultaría complejo el agregar sus algoritmos al repositorio interno de VisTHAA.

Debido a la dificultad que presenta el agregar algoritmos solucionadores, VisTHAA no cuenta con una gran cantidad de algoritmos metaheurísticos de solución, para sortear este problema se propone conectar VisTHAA con un framework de optimización el cual permitirá que VisTHAA pueda acceder a una mayor cantidad de algoritmos de una forma más sencilla.

Los frameworks según (Haro, 2008) son necesarios dado que permiten al desarrollador empezar a trabajar desde una base ya establecida, en la que él puede realizar los cambios que le sean requeridos reduciendo el tiempo de desarrollo de un algoritmo metaheurístico considerablemente (Beukelaer et al., 2015; Bhatt & Leighton, 1984; Cahon et al., 2004).

En este trabajo se diseñó e implementó el protocolo de comunicación entre VisTHAA y el framework de optimización por (Rojas, 2017) llamado M-SDOSS. Para lograr este objetivo se incorpora un módulo de configuración para experimentos computacionales.

Los módulos que se incorporan a VisTHAA cumplen las siguientes funciones, generar la configuración de los experimentos computacionales, recabar la información ingresada de la configuración del experimento computacional, procesar la información para ser enviada a M-SDOSS, ejecutar la configuración del experimento con base en la información enviada, obtener los archivos de resultados

del experimento desde M-SDOSS y llevar a cabo los procesos de análisis de algoritmos.

2. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

Este trabajo forma parte de un grupo de investigación, en el cual se han hecho aportaciones (García, 2019; Sánchez, 2016; Pérez, 2014; Castillo, 2011), y su objetivo es dar continuidad al desarrollo de la herramienta VisTHAA a través del desarrollo del protocolo de comunicación con otras herramientas.

En esta sección se muestra el protocolo propuesto para la comunicación entre VisTHAA y el framework de optimización M-SDOSS. En la Figura 1 se presenta las fases y elementos implicados en el proceso para llevar a cabo la comunicación entre ambas herramientas, que se explicarán a lo largo de la sección.

el “Módulo de asistente para configuración” como se muestra en la Figura 2 etiquetado bajo el número 1, con respecto al siguiente formato:

-Selección de problema a resolver (mono objetivo: mochila o multi objetivo: PSP y DTLZ).

-Selección del logbook (Un archivo de texto plano que contiene la cantidad de instancias que se desea cargar, el patrón de la instancia y la lista de nombres de cada instancia).

-Selección de parámetros del algoritmo solucionador (tamaño de la población y cantidad de generaciones).

-Selección de operadores genéticos y sus parámetros (probabilidad de frecuencia).

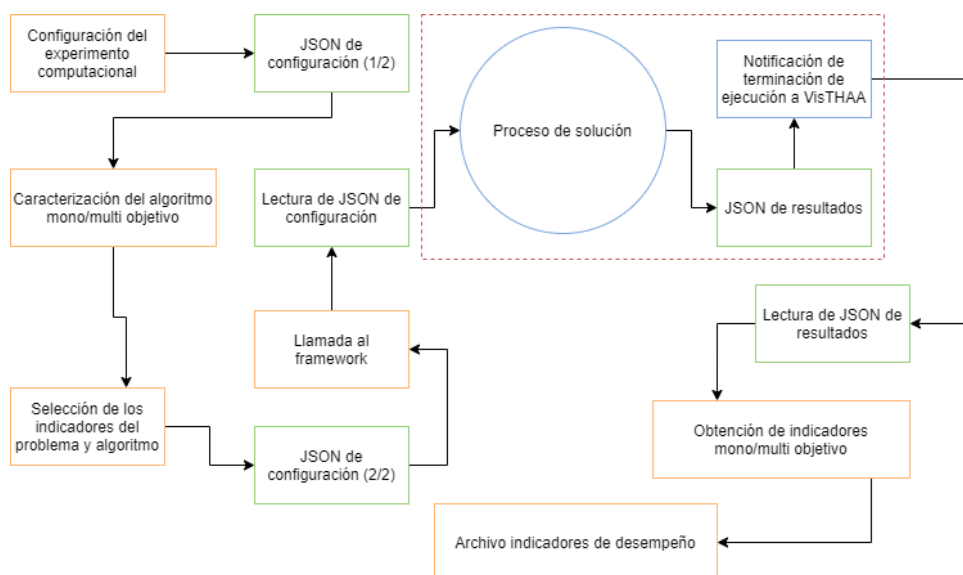


Fig. 1. Protocolo del proceso de comunicación de VisTHAA/M-SDOSS

Los elementos necesarios para llevar a cabo la ejecución del protocolo mostrado en la Figura 1 son: la configuración del experimento computacional, los indicadores de desempeño mono/multi objetivo y la cantidad de ejecuciones del experimento computacional, ejecución de experimento y cálculo de indicadores de desempeño. A continuación, se da una descripción de las fases involucradas en el protocolo del proceso de comunicación.

2.1 Configuración del experimento computacional

Dentro de este apartado se busca apoyar al usuario en la construcción de experimentos computacionales contenido en

Cabe aclarar que se planteó en un principio dejar una selección de algoritmo libre pues el framework lo permite, pero debido a que VisTHAA actualmente tiene asociados los problemas con los algoritmos solucionadores no fue posible agregar una configuración libre y se mantuvo la existente.

Este es el primer paso para generar los objetos: experimento, algoritmo, problema, operador, etc. Estos son usados para generar el archivo de configuración en formato JSON.

2.2 Selección de indicadores de desempeño

Una vez seleccionada la configuración del experimento se requiere la selección de una instancia específica para terminar la generación del JSON de configuración.

Además, es en este punto donde serán seleccionados los indicadores deseados para el análisis dentro de “Módulo de caracterización del desempeño final” (ver Figura 2, etiqueta bajo el número 2), así como la cantidad de ejecuciones que se desea realizar del experimento computacional.

2.3 Ejecución del experimento computacional

Para realizar la ejecución del experimento dentro del framework, VisTHAA genera el archivo JSON de configuración con las especificaciones previstas y realiza la petición de ejecución sobre el framework M-SDOSS (.jar) en forma de aplicación externa, se ejecuta la búsqueda del archivo de configuración en una ruta especificada y luego realiza el experimento computacional con respecto al JSON de configuración como se observa en la Figura 2 bajo la etiqueta con el número 3.

Cabe aclarar que VisTHAA realizará las peticiones de ejecución especificadas por el usuario, esto es la cantidad de veces que se ejecutará el .jar del framework, de tal manera que el resultado por parte de estas ejecuciones será la escritura de los archivos JSON de solución que VisTHAA verificará con respecto a la cantidad de ejecuciones solicitadas.

2.4 Cálculo de indicadores

Comprobado que todas las ejecuciones han sido resueltas, las soluciones son guardadas y enviadas al proceso de análisis el cual es realizado internamente por VisTHAA como se señala en la Figura 2 con la etiqueta 4.

Fig. 2. Diagrama de proceso de comunicación entre VisTHAA/M-SDOSS

En la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos de algunas de las pruebas hechas, que contrastan los valores obtenidos por el algoritmo interno de VisTHAA y el algoritmo de M-SDOSS.

2.5 Parámetro de medida

Se presentan las alternativas para medir el rendimiento/efectividad del proceso de comunicación entre VisTHAA y M-SDOSS.

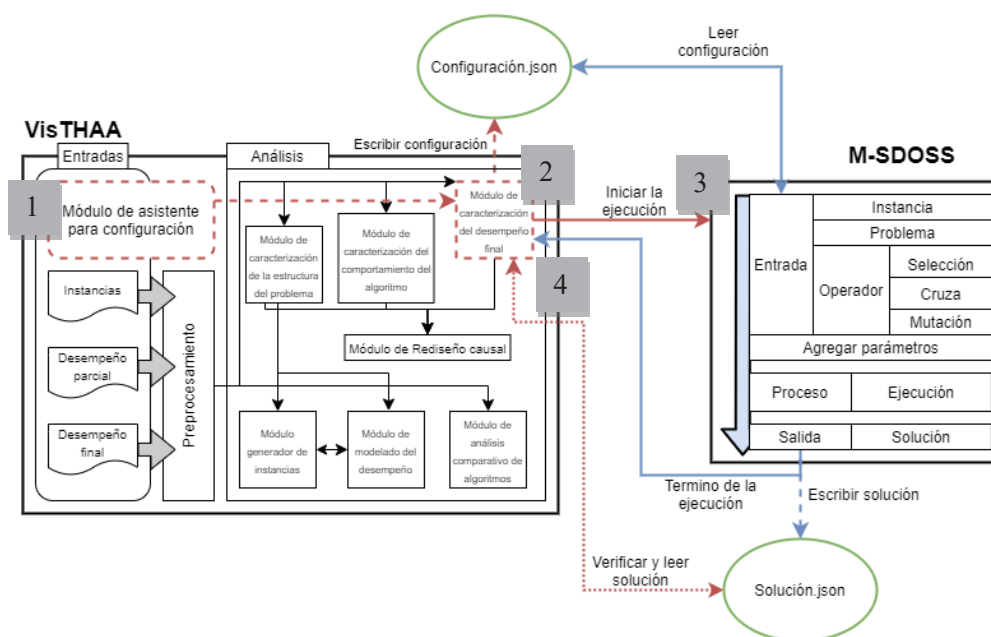
Los parámetros de medida se presentan como capas que están presente en procesos de conexión de red, estas capas se entienden como subprocesos que funcionan de manera similar dentro del proceso de comunicación propuesto para este proyecto.

Capa de conexión:

Dentro del proceso de comunicación actual esta capa estaría abarcando desde que VisTHAA realiza las peticiones de ejecución al framework hasta la validación del término de las ejecuciones, el proceso está marcado por flechas en la Figura 2.

Capa de visualización:

El proceso de visualización del protocolo de comunicación propuesto se está definido en dos partes, la primera siendo realizada mientras se resuelve cada proceso de ejecución individual, cada una de las peticiones es mostrada en consola. Mientras que la segunda es al término del proceso total de ejecuciones y genera el análisis, es aquí donde se despliega un mensaje avisando que el proceso ha terminado y la ruta



donde se han colocado los resultados, marcado por flechas punteadas en la Figura 2.

3. EXPERIMENTACIÓN

En esta sección se muestran los resultados de la aplicación del protocolo de comunicación propuesto, para obtener los indicadores de desempeño para problemas de la familia DTLZ (1, 2 y 3) solucionado por NSGA-II (Deb, 2000; Deb 2002).

3.1 Ambiente experimental

En esta sección se detallan las características del equipo experimental, las herramientas de software que fueron utilizadas, así como la configuración utilizada para el desarrollo del experimento.

En la Tabla 1 se muestran las características del equipo en donde se realizaron las experimentaciones y los programas utilizados para el desarrollo del asistente de configuración de experimentos computacionales y la conexión dentro de los procesos de caracterización de rendimiento.

Tabla 1 Características del equipo experimental

Hardware	Software
Laptop, intel core i7-7700HQ CPU@2.80GHz, 8Gb de RAM, S.O. Windows 10 Home Professional x64, y Pop!_OS20.10 x64.	- NetBeans 8.1 y 12.0 - IntelliJ 2020.3.2

En la Tabla 2 se describen las características del conjunto de instancias pertenecientes al problema utilizado en el caso de estudio.

Tabla 2 Características del problema para experimentación

Problema	Objetivo	Numero de instancias	Características	
DTLZ 1	Multi	1	Numero de variables	7
			Objetivos	3
DTLZ 2	Multi	1	Numero de variables	12
			Objetivos	3
DTLZ 3	Multi	1	Numero de variables	12
			Objetivos	3

La Tabla 3 especifica la configuración del algoritmo solucionador utilizado en el caso de estudio para verificación de comunicación.

Tabla 3 Configuración del algoritmo solucionador

Algoritmo solucionador	Parámetros	Valores
NSGA-II	Tamaño de la población	100
	Número de generaciones	1000
	Porcentaje de cruce	70%
	Porcentaje de muta	5%

3.2 Desarrollo del experimento

En esta sección se muestra los pasos a realizar para obtener los resultados del proceso de caracterización de desempeño sobre el algoritmo NSGA-II existente en M-SDOSS aplicado a la familia de problemas DTLZ (1,2 y 3).

Se facilita la selección de la configuración de experimentos computacionales a analizar mediante el algoritmo 1, este describe la manera en que se realizar y procesa la información para ser enviada al framework.

Algoritmo 1 Proceso de Archivo de configuración

```

1: Funcion Gen_Archivo_Config()
2: Para i ∈ |atributosSeleccionable| hacer
3:   Si i != conjuntoInstancias entonces
4:     |configSeleccionada| <- configuracion(i)
5:   Sino
6:     |configSeleccionada| <- configuracion(i)
7:   conjuntoInstanciasSeleccionadas <- conjuntoInstancias(ArchivoInstancias)
8: Fin Para
7: Para j ∈ |IndicadoresDesempeño| hacer
9:   Si esElegido(j) entonces
10:    |indicadoresACalcular| <- indicadoresSeleccionados(j)
11: Fin Para
12: numeroCorridas <- cantidadEjecuciones()
13: escribirArchivoConfiguracion()
14: Fin Funcion

```

El algoritmo 1 inicia con la petición y guardado de los diferentes atributos seleccionables para la configuración (problema, algoritmo, instancias) (Líneas 2-8).

Por último, se realiza la selección de los indicadores para el experimento computacional (Líneas 7-12). Ahora se crea el archivo configuración.json (Líneas 13).

En el Algoritmo 2 se describe el proceso interno del módulo Performance mono objetivo/ Connection que fue modificado para permitir la comunicación con M-SDOSS.

Algoritmo 2 Proceso de caracterización de desempeño

Paso 1 Selección

```
1: numInstancia <- Guardar_Instancias(|InstanciaACaracterizar|)
2: |IndicesSeleccionados| <- Seleccion_Indices(|IndicesDeDesempeno|)
```

Paso 2 Cálculo

```
3: Para i=0 hasta numInstancias hacer
4:   Para j ∈ IndicesSeleccionados hacer
5:     Si IndiceDeDesempeno == j entonces
6:       |resultados| <- resultadosIndicador(Calcular(j))
7:     Fin Si
8:   Fin Para
9: Fin Para
```

Paso 3 Salida

```
10: Regresar resultados
```

El Algoritmo 2 inicia con la selección del conjunto de instancia que se desean caracterizar y el conjunto de índices que el investigador desea aplicar al desempeño del algoritmo (Líneas 1,2), después se inicia el proceso con la ejecución del algoritmo por cada una de las instancias seleccionadas obteniendo su desempeño y por último se aplican los índices seleccionados al resultado obtenido del algoritmo (Líneas 3-10).

Una vez terminado el proceso de caracterización multi objetivo, la herramienta VisTHAA guarda los resultados obtenidos de los índices seleccionados a un archivo de texto plano (.txt), el cual servirá como información para su uso en otras opciones de la herramienta.

4. RESULTADOS y CONCLUSIONES

Este experimento se utiliza para demostrar que el proceso de comunicación permite a VisTHAA acceder a problemas definidos dentro del framework y que actualmente no existen dentro de VisTHAA, siendo el caso los DTLZ 1, 2 Y 3.

La Tabla 4 muestran los resultados para los indicadores de desempeño siguientes: Soluciones no dominadas, hipervolumen, propagación, distancia generacional y tiempo de ejecución.

Tabla 4 Resultados de análisis de desempeño por algoritmo NSGA-II para DTLZ de M-SDOSS

Instancia	p1v7o3.txt	p2v12o3.txt	p3v12o3.txt
Non-dominated_Solutions	1	1	1
Hypervolume	9258.77031	9259.44961	9256.75202
Spread	1	1	1
Generational_Distance	0.15701245	0.00949211	4.99170903
Execution_Time	2.604	1.054	0.728

Para los problemas DTLZ fue necesaria la modificación de algunos de los métodos que permiten procesar los resultados debido a que similar a lo comentado con anterioridad en el segmento de resultados de PSP, se presentó el problema de que la distancia generacional debía ser calculada al momento de ejecución, por lo que se tomó la decisión de que efectivamente en caso de ser seleccionado el indicador, sería trabajo del M-SDOSS llevar a cabo este proceso, cuyo resultado es retornado dentro del solución.json, presentándose como una validación indirecta de que el proceso de comunicación se lleva a cabo de manera adecuada.

Con este experimento se comprueba que existe comunicación mediante el protocolo propuesto en su fase multi objetivo, ya que desde VisTHAA fue escrita la configuración del experimento computacional (NSGA-II para resolver DTLZ) y se estableció contacto con el framework, este procesó la configuración, ejecutó los experimentos, escribió los resultados del experimento y los cuales VisTHAA procesó para realizar el cálculo de los indicadores mostrados en la Tabla 4, además de corroborar que una vez definido el objeto de problema o algoritmo del framework, VisTHAA es capaz de generar una configuración que permita su uso a pesar de no estar presente en su repositorio interno.

AGRADECIMIENTO

Agradecimientos de los autores a CONACYT por apoyar los proyectos de (a) Programa Cátedras CONACYT con Número 3058. (b) Proyecto CONACYT con Número A1-S-11012 de la Convocatoria de Investigación Científica Básica 2017-2018 y Proyecto CONACYT con Número 312397 del Programa de Apoyo para Actividades Científicas, Tecnológicas y de Innovación (PAACTI), a efecto de participar en la Convocatoria 2020-1 Apoyo para Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación en Salud ante la Contingencia por CO-VID-19.

(c) J. Ponce quisiera agradecer a CONACYT por el número de soporte 960536.

REFERENCIAS

- BARTZ-BEIELSTEIN, T., CHIARANDINI, M., PAQUETE, L., & PREUSS, M. (2010). *Experimental Methods for the Analysis of Optimization Algorithms*. Berlin, Springer Berlin.
- BASTIANI, S., CRUZ-REYES, L., FERNANDEZ, E., & GOMEZ, C. (2015). Portfolio Optimization from a Set of Preference Ordered Projects Using an Ant Colony Based Multi-Objective Approach. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 8 (sup2), pp. 41-53. <https://doi.org/10.1080/18756891.2015.1129590>.
- BEUKELAER H., DAVENPORT G., MEYER G., & FACK V. (2015). *JAMES: A modern object-oriented Java framework for discrete optimization using local search metaheuristics. *Software Practice and Experience*, 47 (3). [DOI:10.1002/spe.2459]
- BHATT, S. & LEIGHTON, F. (1984). *A framework for solving VLSI graph layout problems. *J. Comput. Sytem Sci.*, 28 (2), pp 300-343.
- CAHON, S., MELAB, N., & TALBI, E. G. (2014). Paradiseo: A framework for the reusable design of parallel and distributed metaheuristics. *Journal of heuristics*, 10 (3), pp 357-380.
- CASTILLO GARCIA, N. (2011). *Evaluación de Estrategias de Mejora del Desempeño de Metaheurísticos Aplicados a BPP Vía Diagnóstico Visual. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Cd. Madero.
- DEB, K., AGRAWAL, S., PRATAP, A., MEYARIVAN, T. (2000). Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II. In: Schoenauer M. et al. (eds) *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI*. PPSN 2000. Lecture Notes in Computer Science, vol 1917. Heidelberg, Springer Berlin. https://doi.org/10.1007/3-540-45356-3_83.
- DEB, K., AGRAWAL, S., PRATAP, A., MEYARIVAN, T. (2002). Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197. doi: 10.1109/4235.996017.
- GALINDO HARO, J. M. (2008). Diseño e implementación de un marco de trabajo (framework) de presentación para aplicaciones JEE. Trabajo de fin de grado. Universidad Oberta de Catalunya.
- GARCIA NIETO, L. R. (2011). Modelado del desempeño de problemas NP-Duros aplicando análisis causal para la herramienta VISTHAA. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Cd. Madero.
- GÓMEZ FUENTES, M. C., CERVANTES OJEDA, J. (2014). Introducción al análisis y al diseño de algoritmos. Ciudad de México, CUAJIMALPA.
- JIANG, S., ONG, Y. S., ZHANG, J. & FENG, L. (2014). Consistencies and contradictions of performance metrics in multiobjective optimization. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 44 (12), pp 2391-2404.

- PÉREZ VILLAFUERTE, M. (2014). *Análisis de Algoritmos Metaheurísticos Vía Diagnóstico Estadístico*. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Cd. Madero.
- ROJAS HERNÁNDEZ, R. (2017). Estudio del impacto de patrones de diseño en la implementación de un framework de optimización para apoyo a la toma de decisiones. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Cd. Madero.
- SÁNCHEZ DE LA PAZ, L. N. (2016). Evaluación de Estrategias de Mejora del Desempeño de Metaheurísticos Aplicados a BPP Vía Diagnóstico Visual. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Cd. Madero.
- WOLPER, P. (1995). Computer aided verification: 7th international conference, CAV '95, Liège, Belgium, July 3-5, 1995; proceedings. Berlin, Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-60045-0>.

Generación de mapas de calor emocionales para analizar el comportamiento de usuarios durante el proceso de evaluación de la experiencia de usuario

Marlen Andrade-Pérez*, Gabriel González-Serna*, Nimrod González-Franco*,
Máximo López-Sánchez*, Olivia Frago-Díaz*

* Departamento de Ciencias Computacionales, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos
México (Tel: +52 777 3637770;
{m20ce056, gabriel.gs, nimrod.gf, maximo.ls, olivia.fd}@cenidet.tecnm.mx)

Resumen: Al fusionar datos fisiológicos y de seguimiento ocular es posible analizar los patrones de comportamiento de usuarios que interactúan con la interfaz de un producto, proceso o servicio; el estudio y análisis de estos patrones permite identificar los estados emocionales que experimenta un usuario cuando interactúa con la interfaz de un producto digital, el contexto del análisis de estos datos es amplio, por ejemplo se puede aplicar en terapias para el manejo de fobias, para el tratamiento de depresión en adultos mayores, en el proceso de evaluación del aprendizaje desde el punto de vista emocional, entre otros. Tomar en cuenta los aspectos emocionales durante el diseño de productos ha demostrado resultados positivos en la aceptación del producto final, sin embargo, el problema radica en la dificultad de identificar con claridad los componentes visuales de la interfaz del producto que inducen cierto tipo de emociones, positivas o negativas, por lo que los estudios más recientes en la literatura están fusionando datos multimodales para cartografiar mapas de calor que representan visualmente estados emocionales. Por lo que en este artículo se analiza y realiza una comparación de aquellos trabajos que generan mapas de calor emocionales.

Palabras clave: UX, mapas de calor fisiológicos, representación visual de emociones, mapas de calor emocionales.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la experiencia de usuario (UX) analiza y evalúa las reacciones del usuario durante la interacción con un producto digital, por ejemplo, fotografías, videos, audios, videojuegos, páginas web, aplicaciones móviles, LMS, entre otras; durante este proceso se capturan señales y datos generados por los usuarios para analizar sus reacciones fisiológicas y de comportamiento, una vez procesados es posible identificar áreas específicas de la interfaz visual del producto digital que inducen emociones positivas o negativas. Esta información se puede aplicar en diversos ámbitos, por ejemplo, evaluación de usabilidad de productos digitales, tratamiento de fobias, tratamiento de la depresión, evaluación de la experiencia de usuario, evaluación de aprendizaje, neuromarketing, entre otras.

Una de las tecnologías que actualmente está aportando métricas de comportamiento relevantes es la captura de datos de seguimiento ocular (eye-tracking), con esto datos, es posible analizar los patrones de comportamiento que presentó un

usuario durante el tiempo que interactuó con un producto digital; la fusión de estos datos con las emociones identificadas mediante datos fisiológicos multimodales, permiten cartografiar sobre la interfaz del producto digital mapas de calor emocionales para identificar la áreas de interés que indican en emociones positivas o negativas durante la interacción con el producto digital (Courtemanche, et al., 2018).

Las señales fisiológicas se utilizan cada vez más en muchas áreas de la Interacción Humano-Computadora (HCI) para inferir conocimientos sobre los estados emocionales que experimentan los usuarios. Por ejemplo, se han utilizado en estudios de videojuegos para medir el aburrimiento y la experiencia del juego (Giakoumis D, 2011).

En este documento se describen los algoritmos para cartografiar mapas de calor emocionales sobre la interfaz del producto digital que existen actualmente.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

De acuerdo con los trabajos identificados en la revisión de la literatura, relacionados con la evaluación de la experiencia de usuario, se encontraron trabajos que representen de manera visual las emociones percibidas por un usuario durante el proceso de interacción con un producto digital (Duchowski, Orero, Price, & Meyer, 2012), (Georges, et al., 2016), (Georges, et al., 2017) y (Courtemanche, et al., 2018).

2.1 Happy or Not: Generating Topic-based Emotional Heatmaps for Culturomics using CyberGIS

Este trabajo describe un análisis para generar mapas de calor emocionales y su arquitectura de sistema habilitadora que transforma ubicaciones y tonos latentes extraídos de documentos masivos basados en texto en representaciones espaciales de emoción positiva y negativa.

Para demostrar la efectividad del enfoque, la edición completa en inglés de Wikipedia se procesa usando una supercomputadora para extraer todas las ubicaciones y el tono asociado con el año 2003. Se crea un mapa de calor emocional de la discusión de Wikipedia sobre el "conflicto armado" de ese año usando los métodos de análisis espacial.

La generación de esos mapas de calor emocionales de grano fino es intensiva desde el punto de vista informático, en particular cuando se tienen en cuenta los múltiples atributos a escalas finas. Por lo tanto, se utiliza una plataforma CyberGIS basada en la ciberinfraestructura nacional de los Estados Unidos para permitir el análisis visual intensivo de cómputo.

Desarrollan una fórmula que consta de 3 elementos para generar un mapa de calor emocional para un tema (e_h). Incorporan elementos que actúan como factores de escala para el tono (t).

En primer lugar, calculan la superficie de densidad del número de todos los artículos (en adelante, densidad de artículos) (r) aplicando la función $d(x)$ a cada celda de una superficie rasterizada basada en el atributo l_r , que actúa como indicador de la importancia de un lugar al ir suponiendo que los lugares importantes se mencionan más a menudo que los lugares sin importancia en el texto del artículo. En segundo lugar, calculan la intensidad del tema (s) como indicador de la importancia de un de un tema seleccionado en relación con otros temas en un lugar determinado. Por último, el tono (t) se estima y se multiplica por los factores de escala para generar un mapa de calor emocional, es decir, la ecuación (1).

$$e_h = r * s * t \quad (1)$$

Se utilizan utilidades basadas en la Geospatial Data Abstraction Library (GDAL) para realizar operaciones de rasterización, producir mapas con rampas de color y proyectar y mosaico los mapas para su visualización en línea (véase <http://gdal.org>).



Figura 1. Mapa de calor emocional del "conflicto armado" para el año 2003. Fuente: Shook, E., Leetaru, K., Cao, G., Padmanabhan, A., & Wang, S. (2012). Happy or Not: Generating Topic-based Emotional Heatmaps for Culturomics using CyberGIS

2.2 UX Heatmaps: Mapping User Experience on Visual Interfaces

Este trabajo presenta una herramienta de mapa de calor UX que tiene por objeto identificar las señales de los usuarios al interactuar con un sistema.

Los diferentes estados emocionales se infieren primero a partir de señales fisiológicas, a continuación, los estados se triangulan con los datos de la mirada y se cartografían para crear mapas térmicos y destacar las zonas en las que se producen con mayor frecuencia.

Describen los cuatro pasos implicados en la creación de mapas térmicos fisiológicos: inferencia, normalización, acumulación y coloración.

- 1) Inferencia: asegurar que la hoja de calor renderizada represente verdaderamente la construcción psicológica de interés (es decir, la carga cognitiva).
- 2) Normalización: En el enfoque propuesto, los resultados de la inferencia fisiológica se normalizan utilizando la puntuación z con la ecuación (2),

$$W'_i = \frac{W_i - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

donde μ y σ son respectivamente la media y la desviación estándar de los valores inferidos para todas las fijaciones de un usuario. Este paso también ayuda a distinguir las áreas "fisiológicamente significativas" de una interfaz de las neutras.

- 3) Acumulación: consiste en la creación de un mapa en blanco con las mismas dimensiones que el estímulo de la imagen ($n \times m$ píxeles). El resultado de la inferencia se utiliza para crear el mencionado mapa de alturas, en lugar de una métrica de seguimiento ocular.

- 4) Coloración: La idea principal es superponer a la imagen del estímulo una capa semitransparente que refleje las variaciones del mapa de altura. En este trabajo, el paso de coloración utiliza un gradiente de luminancia (es decir, un aumento de la luminosidad del color se asocia con un aumento del mapa de altura).

Después, se fusionan los mapas de altura de un conjunto específico de estímulos de imagen que deben ser analizados juntos. Entonces, la función de coloración asocia la altura de los píxeles de cada mapa de calor renderizado a un nivel de gradiente, relativamente a su ubicación en el mapa de altura común.

Por lo tanto, el gradiente completo que representa la construcción de la experiencia del usuario se extiende a través de todas las imágenes y, permite a los usuarios comparar áreas de diferentes interfaces juntas.

Se importan y sincronizan los archivos de datos de varios dispositivos de registro fisiológico y de comportamiento. Una vez creado el proyecto, se requiere la selección de los participantes, seguido de la creación y representación de la hoja de calor.

La opacidad y el color de visualización de cada mapa de calor puede seleccionarse individualmente, antes o después de la visualización, a fin de permitir la comparación de múltiples construcciones emocionales y cognitivas.

Las heatmaps resultantes pueden entonces ser exportadas en formato jpeg. Tres tipos de mapas de calor pueden ser generados en el estado actual de la herramienta: mapas de calor de la mirada, mapas de calor fisiológicos (basados en carga cognitiva), y los mapas de calor de las expresiones faciales (emoción).

Los mapas de calor de las emociones se generan usando el FaceReader 6, que infiere la probabilidad de siete emociones discretas (feliz, triste, enojado, sorprendido, asustado, asqueado y neutral) y la valentía emocional (negativo vs. positivo), basado en los movimientos faciales.



Figura 2. A la izquierda, se ilustran los mapas de calor de valencia negativa (rojo) y valencia positiva (amarillo). A la derecha, los mapas de calor de valencia negativa (rojo) y de carga cognitiva (verde). Fuente: Georges, et al., 2016. UX Heatmaps: Mapping User Experience on Visual Interfaces.

2.3 Physiological heatmaps: a tool for visualizing users' emotional reactions

En este trabajo, proponen un método genérico para la representación e interpretación visual de medidas fisiológicas en la HCI definidos como: mapas de calor fisiológicos. Estos mapas utilizan datos de seguimiento ocular junto con señales fisiológicas para identificar las regiones en las que los usuarios están experimentando diferentes estados emocionales con una mayor frecuencia. Los mapas de calor de la mirada se utilizan en la investigación de seguimiento ocular y en la industria como representaciones intuitivas de datos de mirada agregados. Su principal uso es ayudar a los investigadores y expertos en HCI a responder a la pregunta: "¿En qué parte de la interfaz tiende el usuario a mirar?" y "¿En qué parte de la interfaz el usuario tiende a sentir algo?" Por lo tanto, pueden proporcionar información útil en la interpretación combinada de las señales fisiológicas y el comportamiento de los usuarios, mientras interactúan con una interfaz o un sistema.

Adaptan los tres pasos principales de la construcción del mapa de calor de la mirada (acumulación, normalización y coloración), junto con un paso de sincronización previo, para crear mapas de calor fisiológicos.

- 1) Definición preliminar

Las señales fisiológicas utilizadas en la representación del mapa de calor deben seleccionarse de una manera que represente de manera óptima la construcción psicológica de interés (por ejemplo, emoción, carga cognitiva, atención, flujo, etc.).

2) Sincronización

El seguimiento ocular y los datos fisiológicos se registran mientras un usuario interactúa con una interfaz. Sin embargo, no es posible iniciar todos los dispositivos al mismo tiempo y, como resultado, las grabaciones son asincrónicas y cada flujo de datos tiene su propio marco de tiempo específico.

Existen varios métodos para sincronizar grabaciones fisiológicas y de comportamiento concurrentes, pero hay enfoques de dos dominios: sincronización directa y sincronización indirecta. En el primero, los marcadores de seguimiento ocular se envían en tiempo real a cada pieza del equipo de registro fisiológico (por ejemplo, a un electrocardiograma o un electroencefalograma). Este método requiere codificación para adaptar los dispositivos API y puede resultar laborioso a medida que aumenta el número de dispositivos de grabación simultáneos. Además, puede hacer que sea imposible cambiar los parámetros de seguimiento ocular posteriormente (por ejemplo, el algoritmo de detección de fijación). En la sincronización indirecta, todos los dispositivos se inician de forma independiente y los archivos de datos se exportan y concilian después de la grabación. Este último enfoque se adoptó en esta investigación ya que deja más libertad para la manipulación de datos.

3) Acumulación

El primer paso en la representación de mapas de calor es la creación de un mapa en blanco con las mismas dimensiones que el estímulo de la imagen ($n \times m$ píxeles). A continuación, se define f como una fijación en un lugar (x, y) y p como un píxel en un lugar (i, j) del mapa en blanco. Para cada fijación (f), a todos los píxeles (p) se les atribuye un nivel de intensidad a través de una función de escala (s) y una función de peso (w), tal y como se modela con la ecuación (3).

$$Intensity(p) = s(f, p) * w(f) \quad (3)$$

En un mapa de calor fisiológico la ecuación (3) ahora representa la intensidad de las señales fisiológicas de un usuario durante una fijación. Por lo tanto, la función de peso debe modificarse en consecuencia. Para ello, se asigna un segmento específico de la señal fisiológica del usuario a cada una de sus fijaciones en el estímulo de la imagen. Llamamos a este proceso el paso de extracción. Se implementa utilizando un enfoque basado en características desarrollado inicialmente en los campos de la detección de afectos y el aprendizaje automático.

Es necesario utilizar ventanas de extracción específicas optimizadas en términos de latencia y duración para cada señal fisiológica y para el constructo psicológico de interés.

Las señales fisiológicas deben corregirse para tener en cuenta la línea de base del sujeto.

4) Coloración

La coloración de mapas de calor fisiológicos se basa en el mismo principio que la coloración de mapas de calor de mirada estándar. Sin embargo, en el primero, se puede mapear más de una construcción psicológica al mismo tiempo en un estímulo de imagen con fines de análisis. Por ejemplo, se puede utilizar para comparar regiones de alta carga cognitiva con regiones de valencia emocional negativa. Por lo tanto, sugieren representar construcciones psicológicas con gradientes de luminancia de diferentes colores.

5) Señales fisiológicas

Basado en el Modelo Circumplex se crearon mapas de calor de excitación utilizando tres señales fisiológicas: actividad electrodérmica (EDA), diámetro de la pupila (PD) y electroencefalografía (EEG). Los mapas de calor de Valencia se crearon utilizando el software de análisis de expresiones faciales FaceReader 5.

La capacidad de los mapas de calor fisiológicos para dar una mejor imagen de las reacciones emocionales de los usuarios que los mapas de calor de la mirada se probó en un experimento en el que participaron 44 sujetos. Los resultados muestran que los mapas de calor fisiológicos están más fuertemente correlacionados con las regiones emocionalmente significativas que los mapas de calor de la mirada estándar.

En la figura 3 se observan los mapas de calor de mirada (azul) y de excitación (rojo) que se crearon utilizando los parámetros descritos en el artículo. Se utilizaron los datos de 18 participantes para crear ambos mapas de calor. Las regiones más intensas del mapa de calor de excitación se muestran en la parte izquierda y las regiones más intensas del mapa de calor de mirada se muestran en la parte derecha. La interfaz fue creada manualmente usando Photoshop (Adobe) para que pareciera una red social genérica. Partes de la imagen han sido desdibujadas después del experimento para ocultar elementos visuales con derechos de autor (por ejemplo, el nombre del hotel).



Figura 3. Prominencia emocional. Fuente: Courtemanche, et al., 2018. Physiological heatmaps: a tool for visualizing users' emotional reactions.

2.4 Emotional Maps for User Experience Research in the Wild

En este trabajo proponen un método que triangula los datos del GPS y los datos fisiológicos para crear mapas emocionales, que delinear las zonas geográficas en las que los usuarios experimentaron estados emocionales específicos en entornos exteriores. El método se aplica en forma de un pequeño dispositivo de grabación portátil y un programa informático de visualización de datos. Se realizó un estudio de campo en un parque de diversiones para poner a prueba el enfoque propuesto. Se presentan mapas emocionales en los que se destacan las zonas en que los usuarios experimentaron diversos niveles de excitación.

2.4.1 Medidas fisiológicas

Para validar la eficacia del método propuesto se eligió como estado fisiológico de interés el Arousal (excitación), que contrasta estados de baja (por ejemplo, la calma) y alta (por ejemplo, la sorpresa) intensidad. Por tanto, dos criterios principales guiaron la selección de las señales fisiológicas para este estudio de campo:

- 1) La relevancia psicofisiológica con la intensidad de la emoción, y
- 2) La preparación para el despliegue en la naturaleza (robustez de los artefactos de movimiento e intrusividad).

Seleccionaron dos señales que son indicadores de la respuesta del sistema nervioso autónomo a un estado emocional intenso; las señales de actividad electrodérmica (EDA) y de electrocardiografía (ECG).

La EDA está compuesta por dos componentes diferentes: el nivel de conductancia cutánea tónica (SCL) y la respuesta de conductancia cutánea fásica (SCR). Se sabe que esta última refleja las respuestas a corto plazo del sistema nervioso autónomo y es un indicador fiable de la excitación emocional.

2.4.2 Generación de mapas de calor

La generación de mapas de calor consta de tres pasos principales: acumulación, normalización y coloración. En el paso de acumulación, se crea primero una matriz vacía que tiene las dimensiones correspondientes a uno de los espacios de datos originales. La matriz de acumulación tiene el tamaño de la imagen en la que se representa el mapa térmico, y el espacio original consiste en las coordenadas GPS reales de los participantes.

La imagen vista del satélite de alta resolución del parque de atracciones, se extrajo de Google Maps (<http://www.mappuzzle.se>) con una resolución de 2956 x 2585 píxeles, que corresponde a una superficie real de 635m x 559m. Calcularon la correspondencia entre las coordenadas esféricas y

las planas utilizando una proyección pseudo-Mercator (<https://tinyurl.com/yycr85lv>).

En el caso de los mapas de calor fisiológicos, el objetivo de la etapa de normalización es tener en cuenta las variaciones entre sujetos. Como las señales fisiológicas están sujetas a importantes variaciones interpersonales, los valores deben corregirse para tener en cuenta la línea de base del sujeto. Los valores de la FC y de la EDA fásica se normalizan utilizando la puntuación z con la ecuación (4),

$$V' = (V - \mu) / s \quad (4)$$

Donde V es el valor de la señal en bruto, V' es el valor normalizado, μ y s son, respectivamente, la media y la desviación estándar del participante en todo el periodo registrado para cada señal. Por lo tanto, para un punto de datos en las coordenadas (x, y) , el valor de la celda de la matriz se incrementa en $V'EDA + V'HR$. Con múltiples participantes, la matriz de acumulación es la suma de la puntuación z de cada participante en esta coordenada. Como los artefactos de movimiento no siempre se produjeron al mismo tiempo en las dos señales, si faltaba una de las medidas para ese punto de datos, utilizaban sólo la otra.

La figura 4 muestra que los participantes que visitaron el parque de atracciones durante los días de poco tráfico (10.800 visitantes en promedio) experimentaron niveles de excitación más altos en todo el sitio.

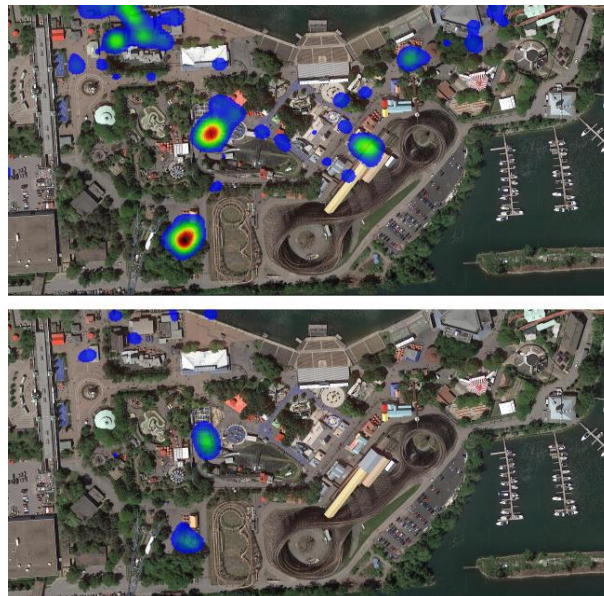


Figura 4. Arriba, la excitación experimentada durante los días de poco tráfico. Abajo, la excitación experimentada durante los días de mucho tráfico. Fuente: Georges, Courtemanche, Fredette y Doyon-Poulin, 2020. Emotional Maps for User Experience Research in the Wild.

A continuación, se presenta una tabla comparativa (tabla 1), la cual muestra los trabajos que generan mapas de calor, mapas de rutas, áreas de interés, si se hace en tiempo real, el reconocimiento de emociones y la generación de mapas de calor emocionales.

Tabla 1. Comparación de trabajos sobre generación de mapas de calor emocionales.

Trabajo	Visualización de datos				Reconocimiento de emociones	Generación de mapas de calor emocionales
	Mapas de calor	Mapas de rutas	Áreas de interés	Tiempo real		
Happy or Not: Generating Topic-based Emotional Heatmaps for Culturomics using CyberGIS (2012)	Si	No	No	No	No	Si
UX Heatmaps: Mapping User Experience on Visual Interfaces (2016)	Si	Si	No	No	Si	Si
Physiological heatmaps: a tool for visualizing users' emotional reactions (2018)	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Emotional Maps for User Experience Research in the Wild (2020)	Si	Si	No	No	Si	Si

3. CONCLUSIONES

La evaluación de la experiencia de usuario (UX) involucra el análisis de datos multimodales relacionados con el comportamiento, las emociones y la respuesta cognitiva del usuario durante el proceso de evaluación de un producto digital.

Los métodos de evaluación tradicionales como los cuestionarios y las entrevistas se basan en datos comunicados por los propios usuarios que a menudo están expuestos a ser modificados a conveniencia o ser erróneos al no recordar lo que se sintió en el momento de utilizar una interfaz de usuario (Georges, et al., 2016).

La principal motivación de esta investigación es analizar los mapas de calor emocionales para encontrar la relación entre las

emociones en el sentido de cómo esta cartografía permite detectar las zonas donde el usuario enfoca la mirada correlacionando la emoción que predomina en el instante que está mirando alguna región o área de la interfaz de usuario.

REFERENCIAS

- Chang, E.-J., Rahimi, A., Benini, L., & Wu, A.-Y. (2019). Hyperdimensional Computing-based Multimodality Emotion Recognition with Physiological Signals. *2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS)*. doi:10.1109/AICAS.2019.8771622
- Courtemanche, F., Léger, P.-M., Dufresne, A., Fredette, M., Labonté-LeMoine, É., & Sénécal, S. (2018). Physiological heatmaps: a tool for visualizing users' emotional reactions. *Multimed Tools Appl*, 1547–11574. doi:10.1007/s11042-017-5091-1
- Georges, V., Courtemanche, F., Fredette, M., & Doyon-Poulin, P. (2020, Abril). Emotional Maps for User Experience Research in the Wild. *Conference paper*, 8. doi:10.1145/3334480.3383042
- Georges, V., Courtemanche, F., Sénécal, S., Baccino, T., Fredette, M., & Léger, P.-M. (2016). UX Heatmaps: Mapping User Experience on Visual Interfaces. 11. doi:10.1145/2858036.2858271
- Giakoumis D, T. D. (2011). Automatic recognition of boredom in video. *IEEE Trans Affect Comput* 2(3):119–133.
- Hussain, J., Ali Khan, W., Hur, T., Muhammad Bilal, H., Bang, J., Ul Hassan, A., . . . Lee, S. (2018). A Multimodal Deep Log-Based User Experience (UX). *sensors*, 31. doi:10.3390/s18051622
- ISO. (2010). *¿Qué es la experiencia de usuario?*. iso.org: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-210:ed-1:v1:en
- Shook, E., Leetaru, K., Cao, G., Padmanabhan, A., & Wang, S. (2012). Happy or Not: Generating topic-based Emotional Heatmaps for Culturomics using CyberGIS. *2012 IEEE 8th International Conference on E-Science*. doi:10.1109/eScience.2012.6404440

Ambiente Virtual de Aprendizaje para Aplicar Intervención Educativa Preventiva del Abuso Sexual Infantil

Jorge Velázquez-Cano*, Gabriel González-Serna*, Leonor Rivera-Rivera, Marina***, Marina Séris Martínez***, Olivia Fragozo-Díaz*, Máximo López-Sánchez*

Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos. México. (e-mail: jorge.velazquez19ca@cenidet.edu.mx; gabriel.gs, olivia.fd, maximo.ls@cenidet.tecnm.mx) Instituto Nacional de Salud Pública* Cuernavaca, Morelos. México.*

Abstract: Este proyecto busca aprovechar las cualidades de los Ambientes Virtuales de Aprendizaje Inmersivo (AVAI) para realizar intervenciones educativas preventivas del Abuso Sexual Infantil (ASI) en niños y niñas de nivel primaria en México de entre 6 y 12 años, también se estudia cómo reaccionan ante una situación ASI y cómo distinguirlo de situaciones de afecto normal y deseado. Usando dispositivos inmersivos como el HTC vive, Oculus Quest 2 en combinación con personajes y animaciones 3D se pone en práctica un modelo propuesto de diseño de AVAIs que considera las características del usuario objetivo, así como las herramientas de interacción disponibles y su relación con las tareas y elementos interactivos para su implementación en el entorno virtual. Se presenta el procedimiento general para las intervenciones haciendo uso del ASI en su versión no inmersiva junto con los instrumentos de medición utilizados.

Keywords: Realidad Virtual, AVAI, ASI, Abuso Sexual Infantil, HMD, Realidad Virtual Inmersiva.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta el proyecto para la intervención educativa preventiva del Abuso Sexual Infantil (ASI) en niños y niñas de nivel primaria en México de entre 6 y 12 años, así como también estudiar de los efectos de diferentes tecnologías de interacción humano computadora (IHC) en la experiencia de usuario. El TecNM/CENIDET en colaboración con el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), desarrollaron un prototipo para aplicar intervención educativa preventiva del Abuso Sexual Infantil (ASI), utilizando tecnologías disruptivas como la Realidad Virtual Inmersiva (RVI), se diseñaron escenarios virtuales interactivos que ejemplifican situaciones de abuso sexual. Estos escenarios se complementan con tecnologías que permiten a los niños y niñas interactuar en las diferentes situaciones contextuales a las que son expuestos, con el fin de evaluar la reacción de las y los niños frente a escenarios ficticios relacionados con el ASI.

2. REALIDAD VIRTUAL Y AMBIENTES VIRTUALES DE APRENDIZAJE

La realidad virtual (RV) es un conjunto de características tecnológicas y conceptuales, desde el punto de vista conceptual (Helsel, 1992) lo describe como un proceso que permite al usuario convertirse en un participante de un espacio abstracto donde tanto el observador como la máquina no existen. La RV es una representación sintética de un escenario, ambiente o

mundo que puede pretender recrear algo real o ser una creación ficticia original. En ambos casos el ambiente tiene sus propias reglas sobre lo que es posible realizar dentro del mismo, así como los medios a través de los cuales el usuario puede interactuar con el entorno. Con respecto a las características tecnológicas, están incluidos elementos de software y hardware que hacen posible la RV en sus múltiples variantes. Las variantes más básicas son la realidad virtual no inmersiva (RVNI) y la realidad virtual inmersiva (RVI) (Makransky & Lilleholt, 2018). La RVI tiene la capacidad de excluir señales sensoriales provenientes del mundo real y remplazarlas con las provenientes de la representación sintética, usando dispositivos tecnológicos avanzados y dedicados a intervenir un sentido en particular (e.g. el *Head Mounted Display* o Visor, interviene el sentido de la vista). La RVNI por su parte, no tiene la capacidad suficiente para excluir o intervenir señales sensoriales provenientes del mundo real y se le conoce también como realidad virtual de escritorio (i.e. *desktop VR*). Este concepto se puede extender a laptops, teléfonos celulares y tablets que muestran los contenidos en sus propias pantallas sin ningún aditamento.

Las otras variantes de ambientes de RV se enfocan en los contenidos y una de ellas es el Ambiente Virtual de Aprendizaje (AVA) conocido en inglés como *Virtual Learning Environment* (VLE). En la literatura no es clara la taxonomía de estas variantes (Bouras et al, 2002; Mikropoulos y Natsis, 2010; Reisoğlu et al, 2017) y resulta difícil separar puntualmente un

Learning Management System (LMS), un *Educational Virtual Environment* (EVE), un VLE e incluso un *Immersive Virtual Learning Environment* (IVLE). Tampoco es claro si algunas categorías son subcategorías de otra. El propio término *Virtual Environment* (VE) es usado en múltiples contextos y muchas veces alejados de la RV. Si bien hay trabajos que abordan esta taxonomía (Makhkamova et al., 2020) y la de la RV (Mann, S. et al., 2018) no existe aún un consenso definitivo respecto a los términos específicos y las características que los componen.

Para Mikropoulos y Natsis (2010), un EVE y un VLE son equivalentes y define a ambos como ambientes virtuales basados en cierto modelo pedagógico, incorporan uno más objetivos didácticos y proveen a los usuarios con experiencias que de otra manera no podrían tener en el mundo físico (i.e. mundo real). Así, un IVLE se distingue por la incorporación de tecnologías de RV.

Distintos tipos de dispositivos permiten múltiples posibilidades de interacción, generando además una construcción psicológica subjetiva llamada sentido de presencia (Slater y Wilburn, 1997), comúnmente descrito como “la sensación de estar ahí” y experimentar los objetos y entornos virtuales como si fueran reales (Lee K. M., 2004). En adelante se referirá al IVLE por su traducción al español: Ambiente Virtual de Aprendizaje Inmersivo (AVAI).

2. AVAI Y ABUSO SEXUAL INFANTIL

Las tecnologías de RV han demostrado tener potencial en el tratamiento, diagnóstico y evaluación de riesgo de abusadores de niños con grandes expectativas en la corrección de dicha conducta y tendencias (Fromberger et al., 2018). Se han utilizado también para analizar el comportamiento de agresores sexuales y estudiar su respuesta física al estar expuestos a representaciones virtuales de adultos y niños (Renaud et al., 2013).

Como herramienta de capacitación, la RV se ha usado para entrenar a terapeutas investigadores en las técnicas de interrogación adecuadas para obtener, de un infante, información importante y relevante que permita determinar si ha sufrido de abuso sexual o no (Haginoya et al., 2020). El ambiente virtual muestra la representación de un niño que responde las preguntas del investigador. Dependiendo de cómo se formulen éstas últimas, el sistema proporciona una respuesta con información útil o una irrelevante.

El enfoque pediátrico de la RV está dirigido principalmente como un auxiliar para el tratamiento del dolor (Won et al., 2017). Sin embargo, el uso de herramientas de RV enfocado a capacitación de niños y niñas en temas de prevención de abuso sexual, hasta el conocimiento del autor, es un tema novedoso en el área.

El AVAI tiene dos objetivos, el primero, es capacitar a los niños en la identificación de situaciones de riesgo y actitudes sospechosas de otras personas que pudieran llevarlos a poner en

peligro su integridad física y mental (i.e. situación de posible abuso sexual). La capacitación se lleva a cabo proporcionando al niño información relacionada con su cuerpo y sus derechos, permitiéndole después tomar decisiones y retroalimentando las mismas. El segundo objetivo es probar diferentes tecnologías de interacción humano-computadora (IHC) en el entorno virtual, estudiar sus efectos en el sentido de presencia, estados cognitivos y estados emocionales, y así evaluar la calidad de la experiencia de usuario durante el proceso de capacitación interactiva con el propósito de determinar si una IHC es mejor que otra durante las interacciones del AVAI.

3. DISEÑO DEL AVAI

El entorno virtual se diseñó siguiendo el modelo de la figura 1. En él, los objetivos didácticos constituyen la base del AVAI y todos los elementos posteriores están alineados a ellos. Los objetivos didácticos deben ser diseñados por expertos del área (Alizadehsalehi et al., 2019) quienes pueden decidir sobre los contenidos y la información que se mostrará en el AVAI. El diseño del ambiente considera al usuario objetivo y el rango de edad de éste para determinar cuál es la mejor manera de representar los contenidos definidos por los expertos. Tanto el diseño del ambiente como de las tareas y elementos interactivos se diseñaron siguiendo las recomendaciones de (Clark y Mayer, 2016) en su teoría cognitiva de aprendizaje multimedia. Un aspecto por destacar de este modelo es que considera las tecnologías de interacción (e.g. ratón, teclado, visor, controles hápticos) como un elemento que influye en el diseño de las tareas y elementos interactivos, procurando que las tecnologías sean adecuadas al proceso y no generen una disociación entre las acciones esperadas por la tarea y las acciones que son posibles de realizar con la tecnología seleccionada. Esta disociación ha sido reportada como un posible factor negativo para la obtención de resultados satisfactorios con el uso de AVAIs (Schroeder et al., 2017).

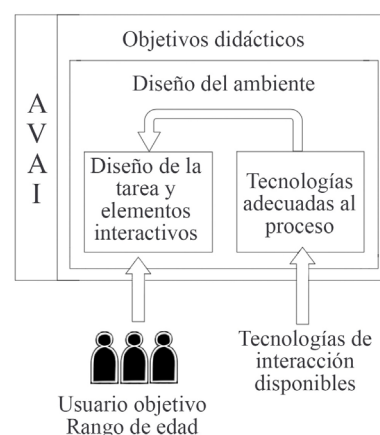


Fig. 1. Modelo utilizado para el diseño del AVAI ASI.

Los objetivos didácticos junto con el material e información necesaria para lograrlos fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) en forma de un guion que describe los momentos de interacción, la información que se transmite, así como el propósito de cada uno. Al conjunto de estos tres elementos se denominó escena.

El diseño del ambiente comenzó con determinar el entorno virtual a representar. Este fue definido como una casa con características básicas (e.g. recamaras, cocina, sala, comedor) y con los elementos típicos encontrados dentro (e.g. mesas, sillas, camas). Siguiendo las recomendaciones de Mayer, la casa no contendría elementos que pudieran convertirse en distractores, por lo que se evitó la colocación de decoración muy detallada o imágenes específicas (e.g. se sugiere visualmente la existencia de pinturas o fotos decorando la sala, pero se omite la información que detalle el contenido de éstas). En general se usa una apariencia neutra, sin ningún estilo decorativo identificable que pudiera llevar al usuario a un sobre análisis

El grupo etario objetivo comprende de los 5 a los 12 años, por lo que se determinó utilizar un diseño con estilo de caricatura. Este permite que los usuarios reciban la información de forma más amigable sin que pierda credibilidad o importancia por venir de un personaje ficticio (Claxton y Ponto, 2013). Con el fin de permitir la integración de IHC inmersivas, se diseñó un prototipo de baja fidelidad (figura 2) enfocado en la versión de RVI pero que permitiera su transferibilidad a un sistema no inmersivo, prestando especial atención a las interacciones dentro del entorno.

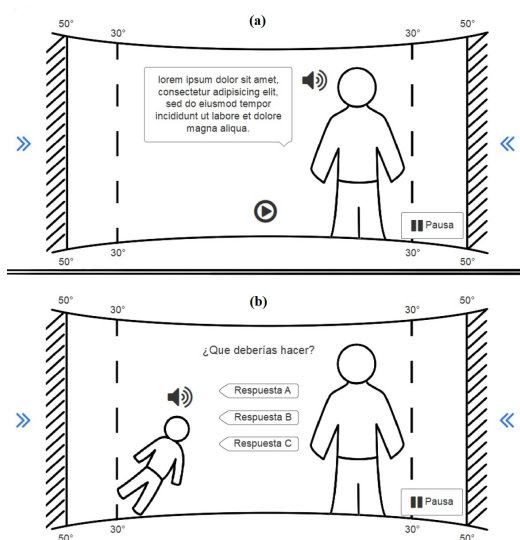


Fig. 2. Prototipo de baja fidelidad del AVAI.

El prototipo muestra cómo el usuario es colocado contextualmente en las escenas (figura 2.a) y escucha información de parte de avatares (i.e. representaciones virtuales

de los personajes). Interviene también un personaje mediador al cual serían dirigidos los diálogos y acciones de los otros avatares. El objetivo del personaje mediador es mantener al usuario como un observador y alejado de percibir en primera persona las intenciones y acciones del personaje acosador, pero sin dejar de ser responsable de las decisiones que deben tomarse en las interacciones (figura 2.b). Esta separación es importante pues las experiencias en primera persona pueden generar en el usuario una percepción alta de estar en peligro o resultar lastimado (Slater, 2010) así como generar un estado de alerta o emociones de vulnerabilidad, miedo, nerviosismo y tensión (Gonzales-Lienres et al, 2020). Si bien otros estudios pudieran encontrar interés en este tipo de reacciones, para los objetivos de este proyecto representaban efectos poco deseados.

Para el diseño de las tareas y elementos interactivos, se seleccionaron dos escenas para estructurar una versión preliminar que permitiera cubrir los objetivos y su desarrollo pudiera realizarse con los recursos disponibles. Su estructura se muestra en la figura 3. Las interacciones se diseñaron considerando que se usarían diferentes IHC por lo que para su adecuación se determinó desarrollar 3 versiones. La primera versión sería no inmersiva y las interacciones se llevarían a cabo de manera típica con un ratón. Las versiones dos y tres (inmersiva A e inmersiva B respectivamente) estarían modificadas para hacer uso de dispositivos inmersivos. Es importante resaltar que el contenido didáctico de las tres versiones es idéntico.

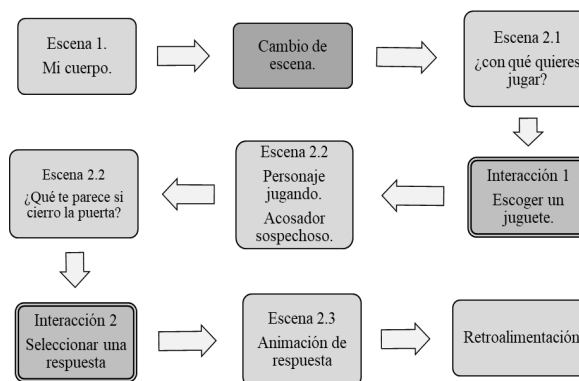


Fig. 3. Estructura de las escenas, los momentos de interacción (doble margen) y la acción a realizar en cada uno.

4. HERRAMIENTAS E IMPLEMENTACIÓN DE IHC

HTC vive. Este visor inmersivo es el equipo sobre el que se iniciaron las pruebas y al que estuvo enfocado en un principio el desarrollo del AVAI. Si bien fue seleccionado por su disponibilidad inmediata entre el hardware de la institución, también lo fue por su compatibilidad con Unity y la posibilidad de usar rastreadores 3D de HTC para la inclusión de hápticos pasivos (Lindeman et al., 1999). Sus limitantes son que requiere equipo de cómputo con especificaciones de hardware

especiales para su funcionamiento óptimo, el alto precio resultante de esto y la poca movilidad consecuente.

Oculus Quest 2. Es el equipo objetivo para las pruebas definitivas del AVAI ASI y en los procesos de capacitación de los niños y niñas. Es un equipo *stand alone*, y no requiere de equipo de cómputo adicional ni sensores externos. Además, incorpora tecnologías de *hand tracking* haciendo posible implementar interfaces naturales. Las capacidades de la pantalla son mejores que las del *HTC vive* lo que ayuda a tener un mejor sentido de presencia y mayor compromiso (Buttussi y Chittaro, 2018).

Blender. Se seleccionó para los procesos de modelado 3D y animación de los personajes ya que es una suite gratuita y *open source* para la creación de contenido 3D.

Unity. Como plataforma de desarrollo 3D en tiempo real, fue utilizada para la integración de todos los componentes de la aplicación y crear el AVA en sus múltiples versiones gracias a su versatilidad, robustez y compatibilidad con múltiples dispositivos.

VRTK. Es una colección de scripts, funciones y mecanismos prefabricados orientados al desarrollo de aplicaciones de realidad virtual en Unity. Es compatible con el HTC vive y el Oculus.

Para integrar las IHC primero se determinaron los tipos de interacción en el que serían utilizadas: presionar botones y escoger un juguete. Para la versión no inmersiva la única vía de interacción son botones en la pantalla (*screen space*), accediendo a ellos mediante el uso del ratón. Para las versiones inmersivas, las acciones de presionar botones involucran un objeto en el espacio tridimensional (i.e. *world space*) con forma de botón, el cual hay que presionar haciendo los movimientos físicos necesarios para lograrlo (e.g. estirar el brazo y tocarlo); la acción de escoger un juguete se lleva a cabo presentando los objetos tridimensionales al usuario, este debe tomar uno, ya sea con un botón del control háptico o mediante el gesto manual si es una interfaz natural, y posteriormente depositarlo en el espacio designado. El uso de dispositivos para una interfaz natural permite también incorporar objetos reales al ambiente virtual mediante rastreadores 3D, por lo que la acción de seleccionar un juguete es literalmente tomar uno del mundo real y ver reflejada esta acción en el mundo virtual. La figura 4 muestra como una interfaz no inmersiva puede trasladarse a una inmersiva.

En la versión no inmersiva, la cámara se encarga de llevar al usuario a los puntos de interés y solo puede observar lo que ocurre dentro del campo de visión de ésta. En las versiones inmersivas todo movimiento de cámara fue desactivado para que el usuario tuviera el control sobre lo que quiere observar y en qué momento. El AVAI no permite una navegación libre para evitar que el entorno mismo se convierta en un distractor (e.g. que el usuario quiera explorar el resto de la casa).

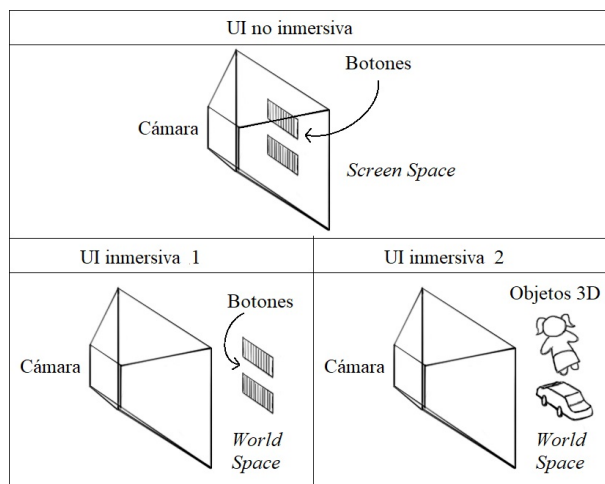


Fig. 4. Una interfaz en un entorno no inmersivo usa el espacio de pantalla o *screen space*, mientras que un inmersivo usa el espacio tridimensional o *world space* del entorno virtual. La cámara representa el punto de vista del usuario.

4. PROCEDIMIENTO PARA LAS INTERVENCIONES CON EL AVAI.

Debido a la contingencia por COVID-19 presente al momento de la redacción de este artículo, se determinó que las intervenciones se llevarían a cabo de manera remota a través de sesiones en Google meet y/o la aplicación Zoom. Esta situación limitó a solo usar la versión no inmersiva, por no requerir dispositivos adicionales a un equipo de cómputo de escritorio o portátil.

En relación con los objetivos se incluyeron como instrumentos de medición, el Cuestionario de Depresión Infantil y Adolescente CDI, el Independent Television Commission Sense of Presence Inventory ITC_SOPI (Lessiter et al., 2001), el Self-Assesment Manikin SAM (Bradley y Lang, 1994), el Inventario de Motivación Intrínseca IMI (Ryan y Deci, 2000) y la Escala de Afecto Positivo y Afecto Negativo PANAS (Watson y Tellegen, 1988). Se utilizaron versiones en español.

Del instrumento PANAS se utilizó una versión reducida y se diseñó una versión del SAM con emoticonos (i.e. *emojis*) para facilitar su comprensión por los infantes. Todos los instrumentos se integraron en formularios de google y separaron en dos secciones: una incorpora los instrumentos a contestar antes de la intervención con el entorno virtual y otra que ha de contestarse posterior al uso de éste. El INSP incorporó además un cuestionario *Ad hoc* sobre los temas tratados en el AVAI para evaluar el conocimiento de los niños antes y después de las intervenciones y determinar si el entorno virtual contribuye con éxito en el aprendizaje del tema de prevención del abuso.

En coordinación con el INSP se contactó a escuelas primarias ubicadas en los estados de Morelos y San Luis Potosí, exponiéndoles los propósitos del proyecto, sus características y solicitando la participación de sus grupos de alumnos. El interés por la relevancia e importancia del tema hizo eco también en los padres de familia que se mostraron dispuestos a participar.

El procedimiento general comprende los pasos siguientes:

- (1) Se proporciona un enlace de descarga de la aplicación. Se instruye que no debe ejecutarse antes del momento de la prueba.
- (2) Se informa sobre las características del estudio y se proporciona un vínculo a los formularios donde deben indicar que dan su consentimiento.
- (3) El formulario recolecta primero información demográfica y luego avanza a los instrumentos pre-intervención.
- (4) Se instruye en la ejecución del AVA ASI y proceden con el uso del entorno virtual.
- (5) Se les proporciona el vínculo a los formularios que deben contestar post-intervención.

5. DISCUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

Con la creciente oferta de dispositivos de RVI como Samsung VR, HTC vive, Oculus y otros, se empieza a conformar un catálogo de productos para diferentes presupuestos y con prestaciones para múltiples niveles de desarrollo, ya sea una simple visualización o un avanzado sistema de capacitación industrial. Esto a su vez incrementa el número de usuarios y las ramas de investigación sobre su uso y sus efectos, con el propósito de obtener los mejores beneficios de estas tecnologías.

Para el AVAI ASI una parte importante de este beneficio es que los niños sepan identificar cuándo se encuentran en una situación de riesgo y diferenciar entre el afecto deseado y el no deseado. Resulta ineludible enfrentarse con efectos que pudieran considerarse como adversos al tratarse de un tema tan delicado como el abuso sexual infantil, pero que son propios de las tecnologías inmersivas. Por esta razón, los contenidos didácticos siempre deben estar diseñados y avalados por expertos, en este caso por el equipo del INSP con quien se desarrolla en conjunto el AVAI ASI. Se debe, además, diseñar entornos que incorporen las tecnologías inmersivas de manera tal que sean aminorados los efectos no deseados. En este proyecto se optó por colocar al usuario como observador y la participación de personajes mediadores.

Por otro lado, estas reacciones naturales ante una situación simulada podrían usarse para determinar si el niño se ha encontrado previamente en una situación similar o si ha sufrido abuso sexual. Algo particularmente útil para casos donde el

niño no quiere hablarlo o su edad le impide entender la situación, pero puede relatarla en similitud con lo que ve en el AVAI. Para tal fin aun es necesaria más investigación sobre la validez de los resultados debido a las implicaciones legales y de salud que pudieran presentarse. Un protocolo de seguimiento es más que necesario para los casos que pudieran ser evaluados como positivos a abuso sexual infantil. Así pues, el AVAI se convierte en parte de todo un proceso de prevención e identificación.

Este trabajo es relevante también, para mejorar la eficacia del diseño de AVA, en particular cuando se pretende incorporar IHC y mecanismos de interacción inmersivos. Ya sea con el fin de comparar contenidos inmersivos vs no inmersivos o determinar los factores que modelan y modulan efectos como la presencia y su influencia en los procesos cognitivo-emocionales. El modelo presentado en la figura 1, se antepone al típico encontrado en otros estudios (figura 5) que sigue un enfoque puramente tecnológico donde las IHC inmersivas y los AVAI que las usan no siempre están diseñados de forma favorable para la actividad o donde las características de los usuarios objetivo no son consideradas durante el diseño del entorno.

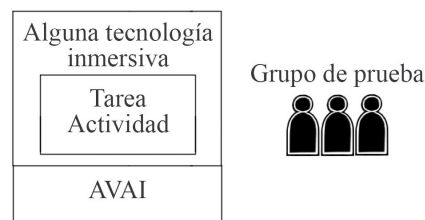


Fig. 5. Modelo de evaluación de herramientas de RV y sus efectos típicamente encontrado en la literatura.

El trabajo futuro del proyecto ASI es realizar pruebas piloto para identificar áreas de mejora en el AVAI y en el procedimiento de intervención. Posteriormente, avanzar con la participación de más individuos e instituciones educativas. Al momento de la redacción del presente, las contingencias por COVID-19 no hacen posible las intervenciones presenciales o el uso de equipo físico compartido, (i.e. visores inmersivos, sensores de respuesta galvánica en piel o electroencefalogramas) por requerir contacto directo con los sujetos de prueba. Las pruebas con la versión inmersiva habrán de posponerse hasta que la contingencia por COVID-19 lo permita. Hasta ese momento se podrán formular análisis sobre los efectos entre las versiones del entorno virtual mencionadas anteriormente, las IHC utilizadas en cada uno y determinar si una sobrepasa de las otras.

REFERENCIAS

- Alizadehsalehi, S., Hadavi, A., & Huang, J. C. (2019). Virtual reality for design and construction education environment. En M. D. F. Ling, R. M. Leicht, & R. L. Solnosky (Eds.),

- AEI 2019: Integrated Building Solutions - The National Agenda - Proceedings of the Architectural Engineering National Conference 2019, 193-203. (AEI 2019: Integrated Building Solutions - The National Agenda - Proceedings of the Architectural Engineering National Conference 2019). American Society of Civil Engineers (ASCE). doi:10.1061/9780784482261.02
- Alsina-Jurnet, I., Gutierrez-Maldonado, J., & Rangel-Gmez, M.-V. (2011). The role of presence in the level of anxiety experienced in clinical virtual environments. *Computers in Human Behavior*, 27(1), 504–512. Current Research Topics in Cognitive Load Theory.
- Bouras C., Psaltoulis D., Psaroudis C., & Tsiatsos T. (2002) An educational community using collaborative virtual environments. En Fong J., Cheung C.T., Leong H.V., Li Q. (eds) *Advances in Web-Based Learning. ICWL 2002. Lecture Notes in Computer Science*, vol 2436. (pp. 180-191) Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/3-540-45689-9_15
- Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25(1), 49–59. doi:10.1016/0005-7916(94)90063-9
- Buttussi, F., & Chittaro, L. (2018). Effects of different types of virtual reality display on presence and learning in a safety training scenario. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(2), 1063–1076. doi:10.1109/tvcg.2017.2653117
- Claxton, L. J., & Ponto, K. C. (2013). Understanding the properties of interactive televised characters. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 34(2), 57–62. doi:10.1016/j.appdev.2012.11.007
- Clark, R. C., & Mayer, R. E. (2016) *e-Learning and the science of instruction*. Wiley & Sons, Inc., Estados Unidos.
- Fromberger, P., Jordan, K., & Miller, J. L. (2018). Virtual reality applications for diagnosis, risk assessment and therapy of child abusers. *Behavioral Sciences & the Law*, 36(2), 235–244. doi:10.1002/bsl.2332
- Gonzalez-Liencres, C., Zapata, L. E., Iruretagoyena, G., Seinfeld, S., Perez-Mendez, L., Arroyo-Palacios, J., Borland, D., Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2020). Being the victim of intimate partner violence in virtual reality: first- versus third-person perspective. *Frontiers in psychology*, 11, 820. doi:10.3389/fpsyg.2020.00820
- Haginoya, S., Yamamoto, S., Pompedda, F., Naka, M., Antfolk, J., & Santtila, P. (2020). Online simulation training of child sexual abuse interviews with feedback improves interview quality in Japanese university students. *Frontiers in psychology*, 11, 998. doi:10.3389/fpsyg.2020.00998
- Lessiter, J., Freeman, J., Keogh, E., and Davidoff, J. (2001). A cross-media presence questionnaire: The itc-sense of presence inventory. *Presence*, 10(3):282–297.
- Lindeman, R. W., Sibert, J. L., & Hahn, J. K. (1999). Hand-held windows: towards effective 2D interaction in immersive virtual environments. *Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316)*. doi:10.1109/vr.1999.756952
- Makhkamova, A., Exner, J.-P., Greff, T., & Werth, D. (2020). Towards a taxonomy of virtual reality usage in education: a systematic review. En: Jung T., tom Dieck M., Rauschnabel P. (eds) *Augmented Reality and Virtual Reality*, 283–296. Progress in IS. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-37869-1_23
- Makransky, G., y Lilleholt, L. (2018). A structural equation modeling investigation of the emotional value of immersive virtual reality in education. *Educational Technology Research and Development*, 66, 1141 doi:10.1007/s11423-018-9581-2
- Mann, S., Furness, T., Yuan, Y., Iorio, J., & Wang, Z. (2018). All reality: virtual, augmented, mixed (X), mediated (X, Y), and multimediated reality. ArXiv, abs/1804.08386.
- Mikropoulos T.A., y Natsis A. (2010) Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research (1999–2009). *Computers & Education*, 56, 769-780. doi:10.1016/j.compedu.2010.10.020
- Reisoğlu, I., Topu, B., Yılmaz, R., Karakuş Yılmaz, T., & Göktaş, Y. (2017). 3D virtual learning environments in education: a meta-review. *Asia Pacific Education Review*, 18(1), 81-100. doi:10.1007/s12564-016-9467-0
- Renaud, P., Chartier, S., Rouleau, J.-L., Proulx, J., Goyette, M., Trottier, D., Fedoroff, P., Bradford, J.-P., Dassylva, B., & Bouchard, S. (2013). Using immersive virtual reality and ecological psychology to probe into child molesters' phenomenology. *Journal of Sexual Aggression*, 19(1), 102–120. doi:10.1080/13552600.2011.617014
- Ryan, R. M. and Deci, E. L. (2000). Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions. *Contemporary Educational Psychology*, 25(1):54–67. Doi: doi.org/10.1006/ceps.1999.1020
- Schroeder B. L., Bailey S. K. T., Johnson C. I., & Gonzalez-Holland E. (2017) Presence and usability do not directly predict procedural recall in virtual reality training. En: Stephanidis C. (eds) *HCI International 2017 - Posters' Extended Abstracts*. HCI 2017. Communications in Computer and Information Science, vol 714. Springer, Cham doi:10.1007/978-3-319-58753-0_9
- Slater M., Spanlang B., Sanchez-Vives M. V., & Blanke O. (2010) First person experience of body transfer in virtual reality. *PLoS ONE* 5(5): e10564. doi:10.1371/journal.pone.0010564
- Watson, D., Clark, L. A., & Tellegen, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: The PANAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54(6), 1063–1070. doi:10.1037/0022-3514.54.6.1063
- Won, A. S., Bailey, J., Bailenson, J., Tataru, C., Yoon, I. A., & Golianu, B. (2017). Immersive virtual reality for pediatric pain. *Children (Basel, Switzerland)*, 4(7), 52. doi:10.3390/children4070052

Comparación de las tarjetas Arduino y Raspberry pi usando algoritmos metaheurísticos.

Valerio-Espinosa Yazef* Gómez-Santillan Claudia G.**
Rangel-Valdez Nelson** Cruz-Reyes Laura**
Morales-Rodriguez Ma. Lucila**
Fraire-Huacuja Héctor Joaquín**

** Estudiante del CONACYT, adscrito al Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. 1o. de Mayo s/No esq. Sor Juana Inés de la Cruz, Cd. Madero, Tamaulipas, 89440, México. (e-mail: yazef.2509@gmail.com).*

*** Investigador del CONACYT, adscrito al Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. 1o. de Mayo s/No esq. Sor Juana Inés de la Cruz, Cd. Madero, Tamaulipas, 89440, México.*

Resumen: EL objetivo de este artículo es proponer una metodología que permite una comparación al utilizar dos tarjetas de desarrollo, Arduino y Raspberry pi usando algoritmos metaheurísticos lo cuales son un algoritmo genético y un algoritmo colonia de hormigas que resuelven el problema TSP-RA, que es descrito como el problema TSP pero implementado en Raspberry Pi y Arduino. Este experimento se debe a que las dos tarjetas utilizadas tienen características diferentes, como la memoria reducida o la cantidad de elementos que puede admitir. El algoritmo propuesto se implementa en la tarjeta de desarrollo para solucionar este problema, en el caso de dos experimentos, el primer experimento no usa el sensor, y el segundo experimento usa el sensor con las características que se pueden medir. Resulta que debido a que la placa Arduino no puede resolver algunas instancias, generalmente ocupa mucha memoria.

Palabras clave: Arduino, Raspberry Pi, Algoritmo colonia de hormigas, Algoritmo genético.

1. INTRODUCCIÓN

Con el avance tecnológico se ha buscado brindar un apoyo en las actividades diarias de los seres humanos, tales como llamar por teléfono, realizar videollamadas con distintas personas al rededor del mundo, activar aplicaciones para despertarse temprano, etc, dando como resultado el consumo de grandes cantidades de recursos de software y hardware. Debido a esto se ha incrementado la necesidad de crear nuevos dispositivos que sean sencillos de entender y de adquirir, que puedan ser capaces de adaptarse fácilmente a las necesidades de las personas.

Las tarjetas de desarrollo son herramientas destacadas para la programación e innovación de dispositivos dedicados a una tarea específica en conjunto con otros elementos, como son sensores, actuadores e incluso otras tarjetas de desarrollo. Debido a esto existe una gran variedad de tipos y modelos empleadas para diferentes problemas, las cuales poseen diversas características como la portabilidad, el bajo costo dentro del mercado y el uso multiplataforma.

Sin embargo presentan características asociadas con la limitación de recursos, como es la capacidad de memo-

ria y la velocidad con la que procesan los datos, por lo que es necesario hacer un estudio que permita identificar el comportamiento de diferentes modelos de tarjetas de desarrollo cuando son empleadas bajo un mismo problema a resolver Benavides (2008); Gómez (2016).

En este artículo se definirán como tarjetas de desarrollo a aquellas arquitecturas que trabajan con un microcontrolador o microprocesador, como son Arduino y Raspberry pi, las cuales son usadas para la construcción de dispositivos inteligentes con los que se pueden interactuar y controlar procesos del mundo real.

En este artículo se busca caracterizar el desempeño de algoritmos metaheurísticos poblacionales que solucionen un problema de optimización implementados en dos tarjetas de desarrollo, Arduino y Raspberry pi, para llevar a cabo un análisis comparativo que nos permita describir y evaluar el desempeño de las tarjetas de desarrollo a través de los resultados obtenidos.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En este trabajo se tomará como base el problema el problema del agente viajero (TSP) Dantzig (1954) el cual será adaptado a uno más específico para poder trabajar con las tarjetas de desarrollo llamado TSP-RA Bibiana et al. (2011), este es adaptado con los elementos descritos en la Tabla 1, donde se muestra los elementos que se utilizan un dispositivo móvil como el agente viajero. El dispositivo móvil estará en una habitación con objetos separados entre sí, lo cuales se toman como nodos. La distancia entre cada nodo es el camino que puede tomar el dispositivo móvil.

El dispositivo debe encontrar la ruta mínima que visite una única vez a todos los nodos, para esto se propone implementar algoritmos para la solución del problema del TSP, los cuales estarán desarrollados en las dos tarjetas de desarrollo. Por lo cual, el planteamiento del problema denominado TSP-RA se establece de la siguiente manera.

Table 1. Tabla de variables del problema TSP-RA

Adaptación al problema establecido	Variables
Dispositivo móvil	t
Nodos	n
Caminos	d
Función objetivo	$z(d)$
Sensor 1	$s1$
Sensor 2	$s2$

Existe un conjunto de n nodos, $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$, y un conjunto de caminos, $D = \{1, 2, 3, \dots, d\}$, uniendo cada una de los nodos, así el camino $d_{i,j} \in D$ es la distancia para ir del nodo i al nodo j Olivera (2004). El dispositivo móvil debe realizar un tour comenzando en un nodo de origen y luego visitar todos lo de más nodos una sola vez. El problema consiste en hallar el recorrido de distancia mínima evitando subrecorridos, la expresión matemática del problema se establece de la siguiente manera.

$$\min z(t) = \sum_{(i,j) \in N} c_{i,j} d_{i,j} \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{i:(i,j) \in D} d_{i,j} = 1 \quad \forall j \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in D} d_{i,j} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in D} d_{i,j} \geq 1 \quad \forall S \subset N \quad (4)$$

$$\sum_{(i,j) \in D} s1_{i,j} \geq 1 \quad (5)$$

$$\sum_{(i,j) \in D} s2_{i,j} \geq 1 \quad (6)$$

$$d_{i,j} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in N \quad (7)$$

Donde las ecuaciones (2), (3) y (4) siguen teniendo la misma función que en el problema de TSP, adicionalmente las ecuaciones (5) y (6) corresponden a que los sensores deben ser utilizados más de una vez.

El objetivo al resolver este problema es encontrar un conjunto de factores críticos que permitan caracterizar el desempeño de algoritmos que solucionen este problema, implementados en dos tarjetas de desarrollo para llevar a cabo un análisis comparativo que nos permita describir y evaluar el desempeño de las tarjetas a través de los resultados obtenidos.

3. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

En la figura 4.1 se muestra el diagrama de la metodología que se propone para la solución del problema, la cual consta de tres etapas; entrada de datos donde se introducen a través de instancias y sensores, aplicación de los algoritmos en las tarjetas de desarrollo y análisis de resultados.

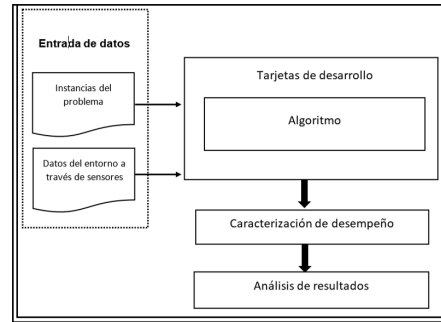


Fig. 1. Metodología de solución

3.1 Arduino

Empezando con la tarjeta Arduino, en la figura 2 se muestra el esquema general de la estructura de los componentes, se puede observar que la mayoría de los componentes son conectados a las entradas digitales, en cuanto al controlador de motores se conecta a los pines analógicos, unido a este se encuentran cuatro motores mororredutores, los cuales permiten el movimiento del dispositivo móvil.

Como se puede observar, debido a la reducida cantidad de memoria de Arduino, no se puede generar archivos para guardar los resultados obtenidos, por tanto, se incorporó un módulo de Bluetooth HC-05 para poder hacer una comunicación con una laptop en donde poder observar los datos.

Para poder adquirir los datos primero se configuró el Bluetooth HC-05, luego se implementó un programa en el IDE de Arduino para realizar la verificación de los datos y finalmente un programa para poder guardar estos datos y poder verlos en un archivo en Excel.

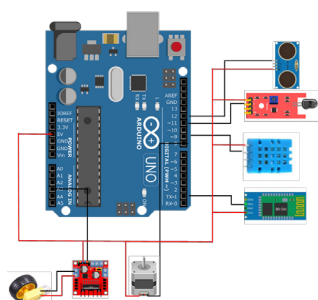


Fig. 2. Módulo de conexión arduino

3.2 Raspberry Pi

Para la tarjeta Raspberry Pi, en la figura 3 se muestra el esquema general de la estructura de los componentes, se puede observar que la mayoría de los componentes son conectados en los pines GPIO a las entradas digitales, en cuanto al controlador de motores se instalaron las librerías relacionadas de la literatura, esto debido que tiene un funcionamiento diferente para Raspberry PI, permitiendo el movimiento del dispositivo móvil.

A diferencia con Arduino, en primer lugar no es necesario utilizar el módulo Bluetooth HC-05, esto debido a que esta tarjeta cuenta con espacio suficiente en memoria para generar archivos que permiten almacenar los datos obtenidos por el algoritmo, además que tiene incluido un módulo de Bluetooth integrado en el módulo Wi-Fi. Por lo cual para revisar los datos obtenidos solo fue necesario conectar un monitor para poder visualizarlos.

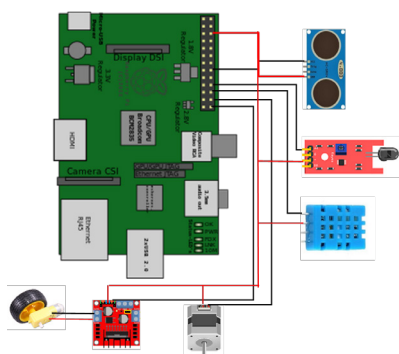


Fig. 3. Módulo de conexión raspberry pi

4. ALGORITMOS DE SOLUCIÓN

Las metaheurísticas se distinguen por realizar un proceso de búsqueda para encontrar soluciones de calidad aceptable, que van modificando las soluciones intermedias guiados por la conveniencia de su función objetivo. Estos algoritmos se basan en la búsqueda de entornos y utilizan estrategias aleatorias inteligentes para evitar que caigan en el óptimo local y mejorar las soluciones obtenidas. Para este trabajo de implementaron dos metaheurísticas muy utilizadas en la comunidad científica, un algoritmo

genético y un algoritmo colonia de hormigas.

4.1 Algoritmo genético

Empezando con el algoritmo genético el cual se muestra en la figura 4 empieza con la inicialización de los sensores, a diferencia de los algoritmos empleados en Arduino, aquí no es necesario validar la conexión con la computadora, por lo cual ese paso se omite, después se genera la población inicial, y se calcula el fitness de esta.

Una vez obtenida la población inicial, se inicia el proceso principal del algoritmo genético, primero se pregunta cuántos nodos van hacer uso de los sensores, después se empieza con la selección, la cruce y mutación, se calculan los fitness de los nuevos elementos y se agregan los mejores evaluados, después se vuelve a empezar con el proceso.

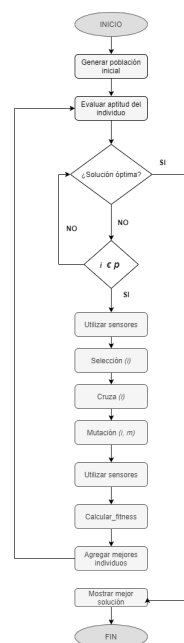


Fig. 4. Diagrama de algoritmo AG

4.2 Algoritmo colonia de hormigas

Para el algoritmo colonia de hormigas, se muestra a continuación su pseudocódigo. Primero explicando las reglas de aprendizaje establecidas para el algoritmo.

Reglas de aprendizaje para el algoritmo colonia de hormigas

Se describe las dos reglas de aprendizaje clásicas, originalmente propuestas por Dorigo Stützle et al. (1999); Dorigo and Di Caro (1999) en el algoritmo ACS. La primera regla es llamada de transición de estado; con esta regla el siguiente nodo a ser visitado es seleccionado. La regla de transición usa dos estrategias: explotación y exploración.

Ecuación 8.

$$s = p_{r,u,t} = \frac{x + x_r}{\sum_{\forall p \in p_i} x + x_r} \quad (8)$$

Donde r es el nodo actual donde se localiza la hormiga x , x_r es el conjunto de nodos visitados por la hormiga x , p_i es la lista de nodos disponibles.

La segunda regla es llamada de actualización; con esta regla la hormiga actualiza los nodos en la ruta viajada. La regla de actualización usa dos estrategias: actualización local y global de la feromona. Estas estrategias son usadas para retroalimentar el sistema sobre rutas exitosas.

Las reglas de actualización de la colonia de hormigas están compuestas de actualización local y global. En consecuencia la regla de actualización modificada en este trabajo es dada en las Ecuaciones 9 y 10. La regla de actualización local de algoritmo esta formulada por:

$$\tau_{r,s,t} = (1 - p) * \tau_{r,s,t} + p * \tau_0 \quad (9)$$

donde r es el nodo actual en el cual la hormiga x esta localizada, s es el nodo vecino actual al cual la hormiga se va a mover, t es el recurso buscado, τ es la tabla de feromonas usadas por la hormiga para hacer la actualización local, τ_0 es el valor de inicialización de la tabla de feromonas y p es el factor de evaporación local de la feromona.

Cada vez que una hormiga decide moverse hacia un nodo mediante la regla de selección, algo de feromona es depositado en cada nodo que ha sido visitado para establecer una ruta hacia los nodos mas frecuentemente visitados. Es calculada cada vez que un recurso es encontrado y es aplicada en cada uno de los nodos que pertenecen a la ruta a través de la cual se descubrieron los recursos

$$\tau_{r,s,t} = (1 - \alpha) * \tau_{r,s,t} \quad \forall r, s, t \in k \quad (10)$$

donde α es el factor de evaporación global de la feromona. La cantidad de feromona depositada depende de la calidad de la solución obtenida, la cantidad de recursos encontrados y la importancia del tiempo de vida de la hormiga.

El pseudocódigo mostrado en la figura 5 primero inicializa la inicialización de los sensores, despues se crean las hormigas que se utilizaran para resolver el problema. Despues se inicia el ciclo principal del algoritmo, empezando por generar los movimiento posibles de las hormigas, despues se evaluan los moviminetos creados y si estos son validos se le agregan a la posiscion de la hormiga en cuestión. Una vez obtenido los movimientos posibles se manda a llamar a la funcion donde se analizara en que nodo se utilizarán los sensores, despues se agregan el deposito de feromonas. Por ultimo se actualizan las soluciones y se reinicia el proceso.

5. EXPERIMENTACIÓN

Las características de la máquina son las siguientes: marca DELL con un procesador Intel Core i5-9500M CPU con

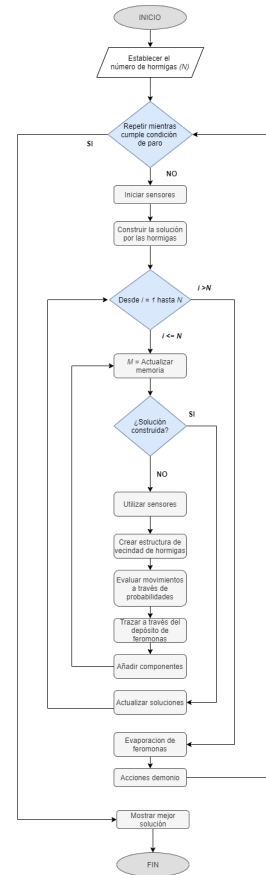


Fig. 5. Diagrama de algoritmo ACO

3.00GHz, memoria RAM de 20 GB y Sistema Operativo Windows 10.

Las características de las tarjetas de desarrollo son:

- **Arduino:** modelo UNO con un microcontrolador ATmega328 con 16Mhz con memoria FLASH 32Kb.
- **Raspberry Pi:** modelo 3B+ con un procesador Broadcom BC M2837B0 DE 64Bits con memoria RAM de 1GB y sistema operativo Raspbian.

Configuración de los algoritmos.

Los algoritmos que fueron implementados para esta experimentación fueron algoritmo genético y algoritmo colonia de hormigas, ambos fueron desarrollados en lenguaje C. Las configuraciones de los algoritmos se dan en la Tabla 2.

Descripción de las instancias utilizadas:

En la tabla 3 se muestran las instancias utilizadas en la experimentación. Donde se indica el nombre de la instancia, una breve descripción, la cantidad de nodos y el valor óptimo. Las instancias fueron tomadas de la biblioteca

Table 2. Configuración de parámetros

Parámetros	AG	ACO
Corridas	30	30
Población	100	25
Generaciones	100	100
Porcentaje cruza	80%	-
Porcentaje mutación	5%	-
α	-	0.1
β	-	2.3
q_0	-	0.9

TSPLIB.

Table 3. Instancias utilizadas

Nombre	No de nodos	Valor optimo
burma14	14	3323
ulysses16	16	6859
berlin52	52	7542
gr202	202	40160
a280	280	2579
rat575	575	6773
gr666	666	294358
pr1002	1002	259045

Métricas utilizadas para la evaluación del desempeño de los algoritmos.

Las métricas aplicadas son de tiempo y memoria utilizada.

- Tiempo: muestra cuánto tardó la tarjeta en resolver el algoritmo, es obtenida por una función de tiempo definida en el algoritmo, se calcula por la media de 30 corridas y es estimada en segundos.
- Memoria utilizada: muestra la cantidad de memoria utilizada para cada tarjeta al resolver el algoritmo, se calcula por la media de 30 corridas y es expresada en kbytes.

5.1 Comparación del comportamiento de las tarjetas de desarrollo al aumentar el numero de nodos implementando los algoritmos genético y colonia de hormigas.

El propósito de este experimento es utilizar la configuración establecida en la Tabla 2 para obtener resultados, de manera que podamos describir el comportamiento de Arduino y Raspberry Pi cuando el número de nodos en cada instancia aumenta al ejecutar el algoritmo de colonia de hormigas y el algoritmo genético. Se utilizan todas las instancias ya mencionadas y para cada instancia se ejecuta 30 veces, luego se calcula el promedio de los indicadores de calidad.

En la figura 6 se muestra el tiempo que utiliza el algoritmo colonia de hormigas al resolver cada instancias, se muestra que la tarjeta Arduino tiene un incremento gradual conforme incrementa el número de nodos de las instancias. En cambio la tarjeta Raspberry Pi muestra un incremento drástico conforme va el aumento el número de nodos.

En la figura 7 se muestra el uso de la memoria que utiliza al resolver cada instancia, se puede ver que en las primeras tres instancias ambas tarjetas utilizan un consumo de memoria igual, pero cuando la instancia aumenta a 202 nodos incrementa el uso de memoria por parte de la tarjeta

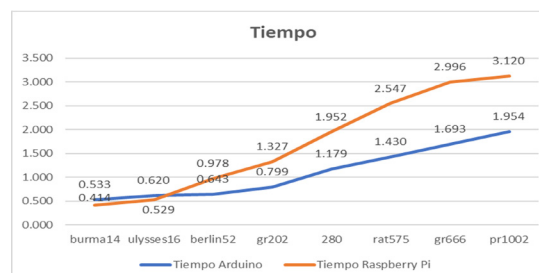


Fig. 6. Tiempo utilizado por el algoritmo colonia de hormigas en ambas tarjetas.

Arduinio.

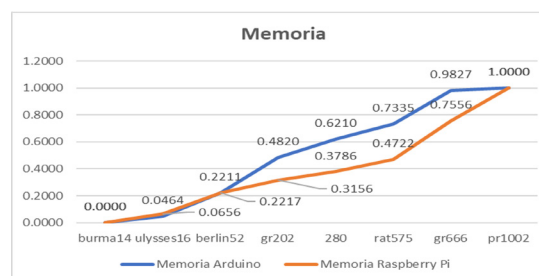


Fig. 7. Memoria utilizada por el algoritmo colonia de hormigas en ambas tarjetas.

Con los resultados anteriores podemos concluir que en cuanto al uso de memoria la tarjeta arduino tiene un consumo mayor a la utilizada por Raspberry Pi, esto debido a la poca capacidad de memoria establecida para esta. Por otro lado, el tiempo de ejecución en Arduino es menor en comparación con el de Raspberry pi.

En la figura 8 se muestra el tiempo que utiliza el algoritmo genético al resolver cada instancia, se muestra que la tarjeta Raspberry pi muestra un incremento escalonado pero elevado conforme va el aumento el número de nodos. En cambio la tarjeta Arduino tiene un incremento gradual conforme incrementa el número de nodos de las instancias por lo cual se mantiene bajo que el de la tarjeta Raspberry pi.

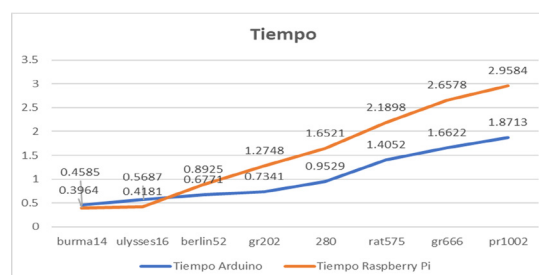


Fig. 8. Tiempo que tardó el algoritmo genético en ambas tarjetas.

En la figura 9 se muestra el uso de la memoria que se utiliza al resolver cada instancia, se observa que en ambas

tarjetas cuando resuelven las primeras tres instancias no hay diferencia significativa, pero conforme empieza a aumentar la cantidad de nodos, la tarjeta Arduino incrementa el uso de memoria, en cambio Raspberry pi mantiene un uso gradual de memoria.

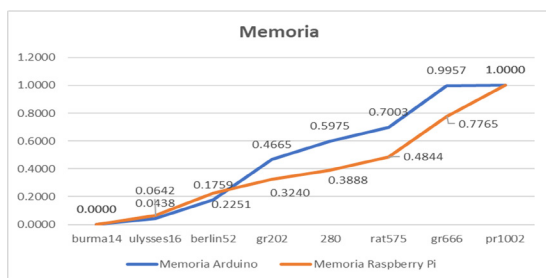


Fig. 9. Memoria utilizada por el algoritmo genético en ambas tarjetas.

Con base en los resultados anteriores, podemos concluir qué en términos de uso de memoria, debido a su baja capacidad de almacenamiento, el consumo de las tarjetas Arduino es superior al de las tarjetas Raspberry pi. Por otro lado, el tiempo de ejecución de Arduino es menor que el de Raspberry pi.

5.2 Comparación del comportamiento de las tarjetas de desarrollo utilizando sensores al implementar los algoritmos genetico y colonia de hormigas.

El propósito de la experimentación es poder describir el comportamiento de Arduino y Raspberry pi al resolver los algoritmos colonia de hormigas y genetico, cuando se les implementan dos sensores que influyen en la búsqueda de las soluciones. El propósito de los sensores es darle instrucciones de ejecución a las tarjetas cuando están en ciertos nodos, el uso de los sensores es a través de una probabilidad, por lo cual no todos los nodos pueden ser utilizados.

En la figura 10 se muestra el tiempo que se utiliza al resolver cada instancia, se muestra que la tarjeta Raspberry pi tiene un incremento gradual conforme va el aumento el número de nodos. En cambio, la tarjeta Arduino tiene un incremento muy rápido por lo cual supera al tiempo utilizado por el de la tarjeta Raspberry pi en la mayoría de las instancias.

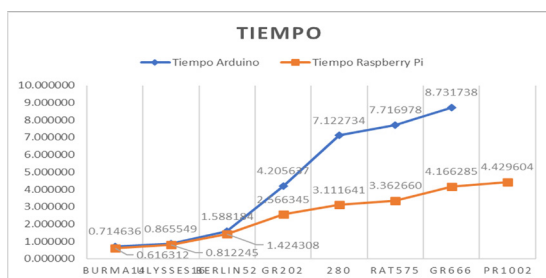


Fig. 10. Tiempo utilizado por el algoritmo colonia de hormigas en ambas tarjetas.

En cuanto al uso de memoria, se puede ver en la figura 11 que la tarjeta Arduino tiene un incremento muy rápido a partir de la tercera instancia, en cambio, la tarjeta Raspberry pi tiene un incremento gradual en todas las instancias. Cabe mencionar que la tarjeta Arduino no pudo resolver la ultima instancia "pr1002" debido a que se consumió la memoria disponible de esta, y no mostraba algún resultado.

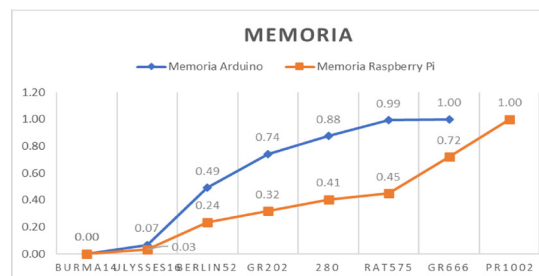


Fig. 11. Memoria utilizada por el algoritmo colonia de hormigas en ambas tarjetas.

Con base en los resultados mostrados, podemos concluir que en términos de uso de memoria, debido a su baja capacidad de almacenamiento, el consumo de la tarjeta Arduino suele ser mayor al tener que repartirla entre los componentes utilizados y tratar de resolver el algoritmo, con lo cual en algunas instancias no logra mostrar resultados debido a que es insuficiente para seguir ejecutando el proceso, en cambio Raspberry pi muestra un uso de memoria alto pero por su capacidad si logra obtener resultados.

Por otro lado, el tiempo de ejecución de Arduino se vuelve mayor que el de Raspberry, al tratar de interactuar con los componentes instalados y resolver el algoritmo, en cambio para la tarjeta raspberry pi el tiempo suele crecer de manera gradual.

También, en la figura 12 se muestra el tiempo que utiliza el algoritmo genetico al resolver cada instancia, se muestra que la tarjeta Raspberry pi tiene un incremento gradual conforme va el aumento el número de nodos. En cambio, la tarjeta Arduino tiene un incremento muy rápido por lo cual supera al tiempo utilizado por el de la tarjeta Raspberry pi en la mayoría de las instancias.

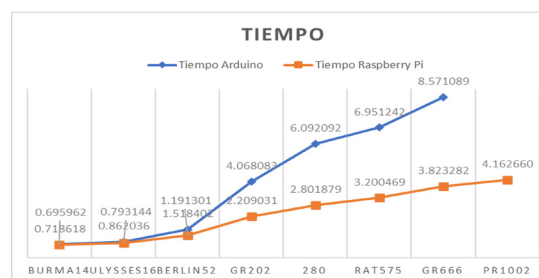


Fig. 12. Tiempo que tardó el algoritmo genetico en la tarjeta Arduino.

En términos de uso de memoria, se puede ver en la Figura 13 que la tarjeta Arduino está aumentando muy rápidamente a partir de la tercera instancia, mientras que la tarjeta Raspberry pi está aumentando gradualmente en todos los casos. Vale la pena señalar que la tarjeta Arduino no pudo resolver la última instancia "pr1002" porque se usó la memoria disponible y no se mostraron resultados.

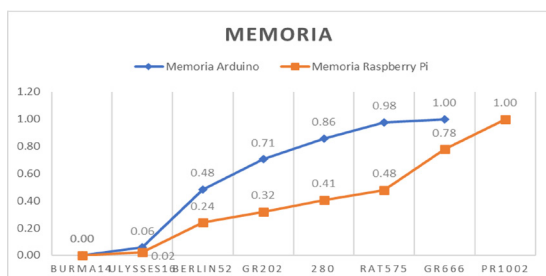


Fig. 13. Memoria utilizada por el algoritmo genético en la tarjeta Arduino.

Con base en los resultados mostrados, podemos concluir que en términos de uso de memoria, debido a su pequeña capacidad de memoria, el consumo de la tarjeta Arduino suele ser mayor, ya que tiene que distribuirse entre los componentes utilizados e intenta resolver el algoritmo tanto que en la última instancia no se muestran resultados porque el proceso no tiene suficiente memoria para ejecutarse. Por otro lado, Raspberry tiene un alto uso de memoria pero obtiene mejores resultados debido a su capacidad.

Por otro lado, al intentar interactuar con los componentes instalados y resolver algoritmos, el tiempo de ejecución de Arduino se vuelve más largo que el de Raspberry, mientras que para las placas Raspberry pi, el tiempo suele incrementarse gradualmente.

6. CONCLUSIONES

Al agregarles los sensores a las tarjetas de desarrollo el comportamiento del algoritmo genético es menor que el algoritmo colonia de hormigas en ambas tarjetas de manera similar cuando se realizó la experimentación sin sensores. Para la tarjeta Arduino en ambos algoritmos no logra resolver la última instancia por falta de memoria disponible, pero el algoritmo genético refleja que utiliza menor cantidad de memoria en comparación con el algoritmo colonia de hormigas.

Para la tarjeta Raspberry pi se observa que el consumo de memoria por parte del algoritmo colonia de hormigas es menor en dos instancias, sin embargo en tres instancias ambos algoritmos consumen la misma cantidad. Se identificó que en la tarjeta Arduino con instancias mayores a 50 nodos suele obtener un desempeño, en cuestión de tiempo y memoria, deficiente en comparación con la tarjeta Raspberry pi.

AGRADECIMIENTOS

Acknowledgements: Authors thanks to CONACYT for supporting the projects from (a) Cátedras CONACYT Program with Number 3058. (b) CONACYT Project with Number A1-S-11012 from Convocatoria de Investigación Científica Básica 2017-2018 and CONACYT Project with Number 312397 from Programa de Apoyo para Actividades Científicas, Tecnológicas y de Innovación (PAACTI), a efecto de participar en la Convocatoria 2020-1 Apoyo para Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación en Salud ante la Contingencia por CO-VID-19. (c) Yazef Valerio would like to thank CONACYT for the support number 953471.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benavides, J.A.C. (2008). Aplicación de técnicas meta-heurísticas a un problema de diseño de rutas de reparto en galicia. In *II International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*, 1425-1434.
- Bibiana, L., Medina, R., Cristina, E., Rota, G.L., Arturo, J., and Castro, O. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 16(2), 35-55.
- Dantzig, G., F.D.J.S. (1954). Solution of a large scale traveling salesman problem. *Operations Research* 2.
- Dorigo, M. and Di Caro, G. (1999). Ant colony optimization: a new meta-heuristic. In *Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, volume 2, 1470-1477. IEEE.
- Gómez, F. (2016). Vehículo autónomo para gestión de trayectorias basado en arduino y raspberry.
- Olivera, A. (2004). Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos. *Universidad de la República*.
- Stützle, T., Dorigo, M., et al. (1999). Aco algorithms for the traveling salesman problem. *Evolutionary algorithms in engineering and computer science*, 4, 163-183.

Aplicación móvil de oferta de cursos y temas de estudio para la enseñanza-aprendizaje virtual

García Castro Ricardo*, Contreras de la Cruz Martín**, Morales Rayón Arturo Martín***,
Ruiz Castro Roberto****, Raygoza Cózar Ricardo Omar*****

* Tecnológico Nacional de México, TecNM
Instituto Tecnológico Superior de Zongolica, ITSZ
Km. 4, Carretera a La Compañía S/N, Col. Tepetitlanapa, C.P. 95005
Zongolica, Veracruz, México.

*ricardo.garcia.pd18@zongolica.tecnm.mx

**martin_isc@zongolica.tecnm.mx

***art_martin_isc@zongolica.tecnm.mx

****roberto_isc@zongolica.tecnm.mx

*****ricardo_cozar_pdl55@zongolica.tecnm.mx

Resumen: El presente trabajo, describe el desarrollo de una aplicación móvil para publicación y recomendación de temas de estudio en línea ofertadas por docentes de la región de la ciudad de Orizaba, Veracruz. Para la realización, se utilizó el entorno de Desarrollo Integrado Android Studio bajo el lenguaje de programación Java, incluyendo la herramienta Firebase que proporciona funciones estadísticas, bases de datos, informes de fallas y mensajería mejorando la eficiencia de la solución. Los módulos Firebase utilizados son: Cloud Firestore para el almacenamiento de datos en la nube; Authentication con servicios de backend, SDK fáciles de usar y bibliotecas de UI elaboradas para autenticar a los usuarios mediante contraseñas, números de teléfono, proveedores de identidad populares, como Google, Facebook y Twitter; y Cloud Storage para almacenar y procesar con rapidez y facilidad el contenido generado por usuarios, como fotos y videos.

Palabras Clave: Internet, Android, Firebase, Aplicación Móvil, Java, Cloud Storage

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto, describe el desarrollo de una aplicación móvil de temas de estudio para trabajo en línea y/o presencial a nivel regional de la ciudad Orizaba, Veracruz. La aplicación móvil fue desarrollada mediante Android Studio, permite almacenar y recuperar datos de docentes para su acceso remoto por las personas interesadas en el aprendizaje de las temáticas ofrecidas. La herramienta Firebase facilita el desarrollo de aplicaciones web o móviles de una forma efectiva rápida y sencilla incorporando la conectividad con una base de datos así mismo el uso de diversas extensiones para el mejor rendimiento de la App. El proyecto se plantea para facilitar las necesidades tanto de docentes como de estudiantes de la región de Orizaba, Veracruz; que buscan una mejor manera de lograr sus objetivos y así mismo los docentes tener una mejor oportunidad laboral mediante la impartición de clases en línea.

1.1 Antecedentes

En agosto de 2011, los británicos Sam Chaudhary y Liam Don diseñaron ClassDojo, una plataforma de gestión del aula en la que participan docentes, padres y estudiantes. El objetivo de ClassDojo, es administrar un aula escolar con base a

puntuaciones sobre el comportamiento del alumnado a través de una interfaz de fácil uso, con diferentes opciones de personalización para que se adapte a las necesidades de cada clase (Espeso, 2019).

Superprof surgió en agosto de 2013 para dar respuesta a estas preguntas. Wilfried Granier y Yann Leguillon, los dos fundadores de este startup de clases particulares tuvieron la idea de ofrecer una plataforma para el intercambio de conocimientos (ver Figura 1).



Fig. 1. Sistema web Superprof

Los objetivos básicos de la plataforma Superprof son los siguientes: • Proponer una solución sencilla para vincular a alumnos y profesores. • Ofrecer tanto transparencia como libertad a los usuarios; la satisfacción del cliente es una prioridad para la plataforma Superprof (Superprof, 2019).

1.2 Problemática

En la actualidad, la pandemia COVID19 (Zimmer, 2020) ha obligado a las escuelas cerrar sus puertas y ofrecer atención “online”, los docentes y alumnos han cambiado la forma de comunicación creando nuevos métodos de enseñanza-aprendizaje. La situación actual de aprendizaje desde casa está provocando el surgimiento de nuevas oportunidades, entre ellas la oferta de cursos virtuales.

Hoy en día existen diversos medios de comunicación donde docentes pueden compartir, publicitar y ofrecer sus servicios para la enseñanza de cursos de forma virtual; desafortunadamente para el interesado es difícil tener certeza sobre la calidad del material de estudio publicado.

El presente proyecto propone el desarrollo de una aplicación para dispositivos móviles basados en sistema operativo Android, que permita el registro, oferta y búsqueda de temas de estudio en la región de Orizaba, Veracruz; integrando la valoración de cada curso mediante una escala de 1 a 5 estrellas y una sección de comentarios para evaluar el curso por parte de los usuarios.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología para el desarrollo del proyecto utilizado es Programación Extrema o *eXtreme Programming* XP (ver Figura 2), siendo ágil y flexible para la gestión de proyectos; una de sus principales características es su ciclo de vida dinámico mediante periodos de desarrollo cortos, llamados iteraciones (Beck, 2006).



Fig. 2. Metodología XP

En las siguientes secciones se da una breve explicación sobre cómo se han realizado las etapas.

2.1 Planificación

Durante esta etapa, se definen los alcances, límites, ciclos y fechas del proyecto de desarrollo. Siendo una de las principales la definición de requerimientos de software basados en las historias de usuarios recopiladas por el analista de sistemas. Es importante indicar que las historias de usuario se priorizan, se discuten y en algunos casos se dividen en requerimientos más específicos para su posterior valoración.

Al final de cada ciclo de iteración se entrega un producto software funcional, listo para probar e implementar.

2.2 Diseño

El desarrollo de los modelos de software, diagramas de casos de uso y base de datos son parte de esta etapa, siendo el análisis una de las etapas más importante para la propuesta que define el desarrollo del proyecto final.

2.3 Codificación

En la industria del software, existen muchas técnicas de codificación de programas de software. Durante el desarrollo del presente proyecto, se definió el uso de prácticas ágiles, la programación por pares fue la más utilizada permitiendo el rápido alcance de los objetivos de cada uno de los requerimientos definidos durante la etapa de diseño.

2.4 Pruebas

Las pruebas se realizan continuamente permitiendo su corrección incluso antes de liberar una versión funcional. Al tratarse normalmente de proyectos a corto plazo, las validaciones son revisadas por cada uno de los actores de la metodología, además el propio cliente puede hacer pruebas, proponer nuevas pruebas e ir validando las versiones.

2.5 Lanzamiento

Durante esta etapa se han completado las historias de usuario y ajustados a los requerimientos del cliente. Se tiene un software útil y este puede ser implementado como producto.

3. RESULTADOS

Durante las etapas del desarrollo se obtuvieron diversos artefactos que permitieron el alcance de las metas del proyecto.

- Historias de usuario (Planeación)
- Plan de iteración (Planeación)
- Diseño simple (Diseño)
- Modelo de base de datos (Diseño)
- Diagrama de clases (Codificación)

Las principales funcionalidades del software móvil “EducaClik” para la publicación, oferta y valoración de temas y cursos virtuales, y del cual se tiene una aplicación empaquetada en formato “apk” (Franceschi, 2017) se describen a continuación:

Pantalla inicial y de ingreso de usuarios: permite al usuario elegir su rol y autenticarse para ingresar a la aplicación móvil (ver Figura 3).

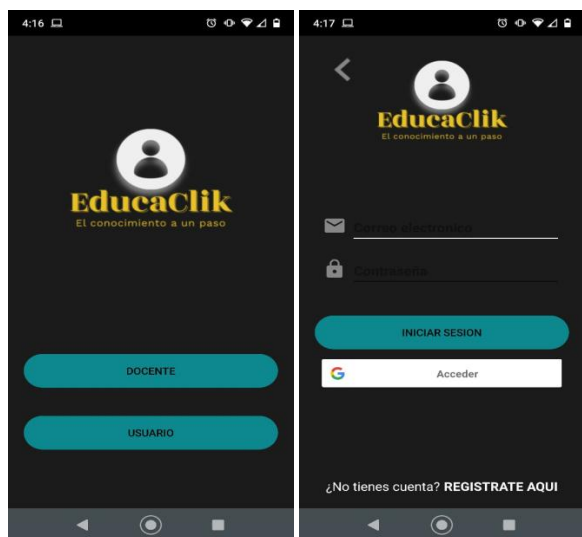


Fig. 3. Pantalla principal y login docente/alumno

Pantalla para el registro de nuevo usuario y de cursos, donde se ingresa la información de contacto más importante del propio usuario para mejorar la seguridad y validez de los participantes en la aplicación (ver Figura 4).

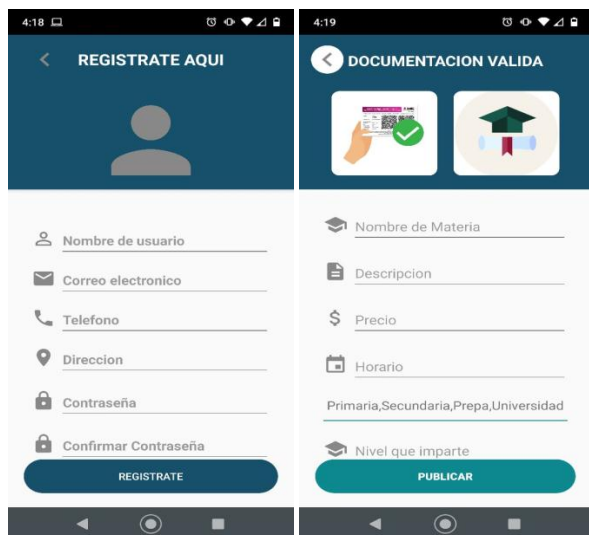


Fig. 4. Pantalla de registro de docentes y temas de estudio

Pantalla de oferta de cursos y consulta de materias por docente (ver Figura 5).

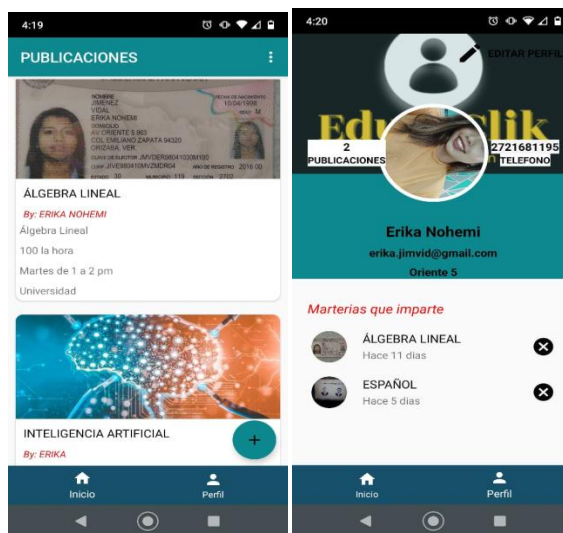


Fig. 5. Vista de publicaciones y consulta de cursos por docente

Mediante la implementación y difusión de la aplicación móvil en la región de Orizaba, Ver., los docentes tendrán una oportunidad de tener un ingreso económico mediante la publicación de material de temas de estudio y en los alumnos aprendizajes significativos mediante el uso de materiales virtuales recomendados.

La aplicación móvil resultante se convierte en una herramienta de difusión de contenidos educativos de apoyo para los procesos de enseñanza – aprendizaje entre docentes y alumnos, usando valoraciones y recomendaciones ingresadas por los usuarios en la aplicación.

El modelo por recomendaciones es creado con base a la valoración por estrellas y comentarios de los alumnos que toman los diversos cursos (ver Figura 6), al igual que muchos otros servicios en Internet, alguien debe iniciar tomando el curso para poder recomendarlos, se propone que el docente ofrezca su material a alumnos cercanos que conozcan su calidad profesional y que puedan recomendarlo valorándolo y dejando sus comentarios desde la aplicación móvil.

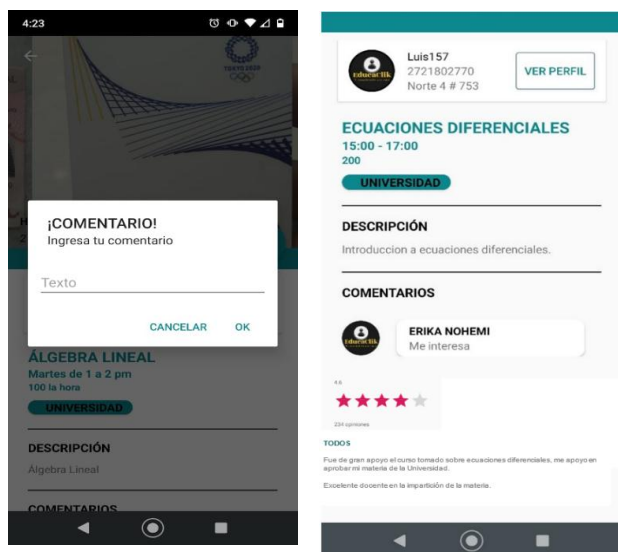


Fig. 6. Ventana de valoración de cursos y ventana de recomendaciones

4. RECOMENDACIONES

Realizar la publicación de la app en la plataforma Play Store de Google para disponerla hacia el público y realizar la difusión correspondiente para que sea utilizada por usuarios interesados.

Ofrecer una guía rápida incluida en la aplicación que permita al usuario aprender el uso correcto de la misma.

Proponer un módulo de evaluación del curso para la obtención de una constancia en formato digital.

5. CONCLUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos, en éste artículo se puede concluir que el objetivo se completó satisfactoriamente con la metodología utilizada, por otra parte, la aportación principal de este trabajo consiste en el diseño y desarrollo de una aplicación móvil Android para recomendaciones de docentes y temas de estudio virtuales en el contexto actual de pandemia COVID19 y las necesidades de la educación a distancia, como el principal motivo de su desarrollo.

REFERENCIAS

Espeso, P. (2 de Enero de 2019). *Educacion 3.0*. Obtenido de <https://www.educaciontrespuntocero.com/recursos/classdojo-que-es-como-empezar/> GCF

Superprof, V. (16 de Diciembre de 2019). Superprof. Obtenido de <https://www.superprof.mx/blog/equipo-competente-eficaz/>

Zimmer, C., (2020). *Un planeta de virus*. Capitán Swing Libros.

Beck, K., Andres, C., (2006). *Extremme Programming Explained: Embrace Change*, Addison-Westley, EUA.

Android Studio. (s.f.). Obtenido de <https://developer.android.com/studio/intro?hl=es-419>

Aprende Libre. (s.f.). Obtenido de <https://edu.gcfglobal.org/es/informatica-basica/que-es-un-sistema-operativo/1/>

Viñas, M. (2016). Recursos TIC para profesores. Obtenido de <https://www.totemguard.com/aulatotem/2011/05/khan-academy-una-nueva-manera-de-ensenar-matematicas-y-mas/>

Nolan, G., (2015). *Agile Android*, Appress, EU.

Franceschi, H., (2017). *Android App Development*, Jones & Bartlett Learning, EUA.

Aplicaciones móviles. (s.f.). Obtenido de <https://creatuaplicacion.com/tipos-aplicaciones-movilesexisten/>

Cerdeño, E. (s.f.). *Evolución y revolución en la telefonía*. Obtenido de <https://app.mapfre.com/mapfrere/docs/html/revistas/trebol/n65/pdf/Articulo2.pdf>

Evolución de los teléfonos celulares, (2007)., Obtenido de <http://www.unidiversidad.com.ar/historia-y-evolucion-de-los-telefonos-celulares-con-cualempezaste>

Sistemas operativos móviles. (s.f.). Obtenido de Tecnología: <https://www.areatecnologia.com/informatica/sistemas-operativos-moviles.html>

Comparación de detectores faciales para un sistema de videovigilancia de bajo costo

Daniel Humberto Villatoro-Carranco,
Marco Aurelio Nuño-Maganda, Yahir Hernández-Mier,
Said Polanco-Martagón

Laboratorio de Sistemas Inteligentes,
Universidad Politécnica de Victoria,
Avenida Nuevas Tecnologías 5902, Parque Científico y Tecnológico de
Tamaulipas, Victoria, Tamps, México, 87138.

Abstract: Este artículo compara la eficacia y la eficiencia en tiempo de ejecución de cuatro detectores faciales del estado del arte: HOG, Haar, SSD y MTCNN. La motivación de dicha comparación es seleccionar el mejor detector facial para un sistema de videovigilancia restringido a las características computacionales de una Raspberry Pi 4 B. El conjunto de datos utilizado para la comparación está conformado por cuatro vídeos, cada uno con diferente resolución, condiciones de iluminación y número de individuos. También se realizó la aplicación de una evaluación con el conjunto de datos WIDER FACE, asumiendo una distribución normal en el tiempo de ejecución y el uso de un conjunto de datos donde se conoce el número de individuos. Con base a las pruebas realizadas MTCNN obtuvo una calificación de eficiencia del 54% para la predicción de objetos y una eficacia en tiempos de ejecución para la resolución de 300 x 533.

Keywords: Raspberry Pi, detección facial, vigilancia, HOG, Haar, SSD, MTCNN, WIDER FACE.

1. INTRODUCCIÓN

La visión por computadora inicio sus primeros pasos en la década de los sesenta, cuando universidades pioneras tuvieron la motivación de dar a las computadoras la capacidad de percibir el entorno que les rodea de manera similar a como lo hacemos los seres humanos. Con el paso de los años, investigadores han trabajado en el desarrollo de modelos matemáticos para representar objetos en una forma comprensible para las computadoras, Szeliski [2011]. Dichos modelos se enfocan a procesar áreas específicas en una imagen para extraer la información necesaria y así poder lograr una identificación del objeto. Una de las principales aplicaciones de la visión por computadora es la seguridad por videovigilancia. Los detectores faciales son un subconjunto de los detectores de objetos y una parte esencial de los sistemas de videovigilancia modernos. Un ejemplo claro es *Local Binary Partner (LBP)* Ahonen et al. [2006], un algoritmo que etiqueta los píxeles de una imagen con números decimales llamados patrones binarios locales o códigos LBP. Estos patrones codifican la estructura local alrededor de cada píxel, la cual se compara con sus ocho vecinos, en una área de 3x3 para después restar el valor del píxel central. Los valores estrictamente negativos resultantes se codifican con un valor numérico de cero y los demás con un valor de uno. El resultado es la concatenación estos valores en el sentido de las agujas del reloj comenzando por el de arriba a la izquierda y su valor decimal correspondiente se usa como una etiqueta de identificación. Los números binarios derivados se denominan

patrones binarios locales o códigos LBP. Los detectores faciales han evolucionado desde la concepción del LBP, ejemplos notables son el *Histogram of Oriented Gradients (HOG)* Dalal and Triggs [2005], y *Haar cascade classifier* Viola and Jones [2001], los cuales tienen más de una década desde su publicación. Sin embargo, esto no significa que sean obsoletos, grandes compañías como Apple y Microsoft siguen usando dichos algoritmos, para ciertas aplicaciones de detección de rostro así como aplicaciones y dispositivos electrónicos como cámaras de vigilancia. Trabajos más recientes incluyen el *Single Shot Detection (SSD)* Liu et al. [2016] y el *Multi-task Cascaded Convolutional Networks (MTCNN)* Zhang et al. [2016].

Por su parte los sistemas embebidos modernos como Raspberry Pi han ganado popularidad recientemente debido a su bajo costo y versatilidad. Llama la atención usar dicho sistema como base para el desarrollo de un sistema de videovigilancia, ya que existen propuestas prometedoras de sistemas económicos de vigilancia basados en detección de movimiento, Murugan et al. [2017]. El objetivo del presente artículo se limita a la selección de un algoritmo de detección facial que asegure una buena relación entre eficacia para la detección de rostros y eficiencia en tiempo de ejecución, tomando en cuenta las capacidades de una Raspberry Pi 4 B. El resto de este artículo se estructura de la siguiente forma, en la sección de *Marco teórico* se le brinda al lector una serie de términos para que se familiarice con el tema a tratar dentro de los sistemas de reconocimiento facial, en la sección *Revisión del estado del arte* se muestra los trabajos existentes en la literatura,

los cuales respaldan esta investigación y motivan en gran manera a desarrollar un sistema de esta índole, en *Sistema Propuesto* se explica el funcionamiento y las características del sistema para el análisis de los algoritmos propuestos a trabajar, en *Materiales* se hace un listado del software y hardware implementado para el desarrollo de esta investigación, en *Resultados* se exponen los resultados obtenidos durante la experimentación mediante gráficas así como una interpretación detallada de los resultados obtenidos, para finalizar en el apartado de *Conclusión* se establece cuál algoritmo resultó mejor basado en los resultados de tiempos de ejecución y en la precisión para la predicción de objetos, y sirva para implementarlo en un sistema de videovigilancia.

2. MARCO TEÓRICO

La motivación del desarrollo de un sistema de videovigilancia con detección facial, es para poder brindar una respuesta rápida de alguna intrusión, y que esta pueda provocar una situación de riesgo, este sistema está orientado para áreas residenciales, escuelas u oficinas de trabajo. En el manual de tecnologías para sistemas de videovigilancia U.S. Department of Homeland Security and Technology. [2013], define que un sistema de *círculo cerrado de televisión (CCTV)*, consiste en una serie de dispositivos conectados que generan, transmiten, muestran y almacenan datos de vídeo. Los componentes que regularmente podemos encontrar en un sistema de vigilancia son los siguientes: cámaras, *Drive Record Vídeo (DVR)*, un router y monitores.

Conociendo los componentes que conforman un sistema de videovigilancia comercial, a continuación se describen las etapas de desarrollo utilizadas para un sistema mínimo de vigilancia con reconocimiento facial el cual se desglosa de la siguiente manera:

- **Detectores faciales:** todo sistema de videovigilancia se basa en el procesamiento de vídeo en tiempo real, plasmando los eventos que están sucediendo en ese instante. Ahora, si se desea ir más allá de lo básico y se habla de un sistema inteligente, este requiere procedimientos avanzados que permitan el seguimiento y la ubicación de los rostros. En este paso es recomendable buscar un algoritmo adecuado y realizar algunas comparativas con el software que se desea implementar para ejecutarlo, como la comparativa y ejecución de detectores faciales realizada por Goyal et al. [2017].
- **Benchmark para detectores faciales** Parte de las pruebas para la elección de un detector facial, son las pruebas que miden su precisión, basándose en un entrenamiento previo. Esta evaluación se realiza por medio de un método llamado *Intersección sobre Unión (IoU)* Rezatofghi et al. [2019], el cual consiste en cuadros etiquetados manualmente y cuadros de predicción, los cuadros etiquetados manualmente son aquellos donde se ubican correctamente en los objetos y los de predicción son los cuadros realizados por el algoritmo a evaluar midiendo el área de traslape entre estos dos. Una vez realizado el entrenamiento y la evaluación se obtendrá un porcentaje de localización, este porcentaje se compara con base en

la ponderación del método *Intersección sobre Unión (IoU)*, en donde las calificaciones establecidas están en un rango entre 0 y 1, los valores más altos son aquellos superiores de 0.5, lo cual establece que brindan una mejor eficiencia al momento de realizar la predicción del objeto. Teniendo estos conceptos para poder realizar esta evaluación se necesita de un algoritmo o varios en específico, un dataset de imágenes y un dispositivo donde se ejecutaran las pruebas. El conjunto de datos para imágenes usado se llama WIDER FACE, fue implementado por Yang et al. [2016], para realizar una evaluación de algoritmos para detección facial. WIDER FACE consiste en una serie de imágenes donde aparecen personas, en distintas posiciones, y bajo ciertas condiciones de iluminaciones.

- **Detección de puntos faciales de referencia:** en esta etapa, considerando que ya contamos con un detector facial que sea prometedor en consumo de tiempo computacional se pasa a la parte de la detección de puntos faciales. Estos últimos son puntos de referencia característicos de un rostro, la nariz, la posición de los ojos y la boca. Para poder realizar este análisis se requiere elegir un método matemático que permita crear la representación gráfica de un rostro humano basándose en esos puntos de referencia, como se realizó en la investigación de Wang et al. [2018].
- **Extractor de características:** teniendo los puntos de referencias, se necesita procesarlos por medio de un extractor de características como en la publicación hecha por Ramesha K [2010], donde buscan un reconocimiento facial y de género. Para la extracción de características usan una combinación de funciones globales y de malla para aislar estas características. Las funciones globales se basan en las proporciones del rostro y las distancias de la nariz ojos y boca, mientras que las funciones de malla son para determinar el color de piel, y vello facial. Estos vectores característicos sirven para poder realizar la identificación de la persona por medio de una comparación de vectores de características ya almacenados.
- **Clasificador:** la última etapa, hasta este punto se cuenta con el vector de características que se asocian a un rostro, y que corresponde con la persona a identificar. El clasificador se encargará de asociar estas características con las que están almacenadas y etiquetadas previamente en un conjunto y así poder tomar la decisión de determinar cierta identidad, como en el trabajo realizado Dürr et al. [2015], donde implementan un clasificador en conjunto con una Raspberry Pi para el reconocimiento facial en tiempo real, en donde procesan dos frames por segundo dando como resultado una precisión de reconocimiento del 97%.

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Un sistema de videovigilancia de bajo costo consiste en un conjunto de elementos los cuales resultan económicos y se apegan al mismo funcionamiento de los sistemas comerciales. Los sistemas comerciales de *círculo cerrado de televisión (CCTV)* se componen de varios dispositivos, donde el costo se eleva dependiendo de las funciones de vigilancia a realizar. En el trabajo realizado por Muyambo

[2018], se menciona que los sistemas de videovigilancia normalmente dependen de una persona que esté constantemente analizando el vídeo en tiempo real, pero siempre existe esa incertidumbre por parte del error humano, al descuidar su rol de vigilante. Además hace mención de lo innecesario que resulta el almacenamiento de horas de vídeo, algo que es muy común en sistemas comerciales de videovigilancia donde los dispositivos Drive Record video (DVR) se encargan de almacenar el vídeo grabado y la manera en que optimizan ese proceso, es que inicie la grabación cuando suceda una intrusión.

Con respecto a los sistemas de bajo costo, esto correspondería a sistemas de videovigilancia que cuentan con componentes económicos y de fácil acceso. Dentro del trabajo realizado por Huu-Quoc Nguyen et al. [2015], ellos diseñan e implementan un sistema de bajo costo para el monitoreo y aplican la detección de movimiento para reducir costos de almacenamiento de vídeo, y por medio de un servidor en la nube, dispositivos como celulares y computadoras pueden acceder para la revisión de intrusiones. Es importante resaltar el uso de las tecnologías *Internet of Things (IoT)* son fundamentales para este tipo de sistemas de videovigilancia de bajo costo, estas tecnologías permiten crear un enlace con los dispositivos hardware sin necesidad de una interacción física, permitiendo el acceso de manera remota así como recibir notificaciones por parte del dispositivo ante cualquier evento que suceda. Como todo sistema de videovigilancia, este debe incluir en sus cámaras la detección de infrarrojo para modo nocturno, y es algo que ha sido adaptado a estos sistemas de bajo costo, brindando más posibilidades de competir con sistemas ya establecidos en el mercado, como en el trabajo realizado por Abaya et al. [2014], donde utilizan una simple web cámara web con visión nocturna y donde vigilan cualquier situación de riesgo por intrusión, así como detectar humo en caso de algún incendio, y mediante la notificación vía e-mail se avisaba de dicho imprevisto. Acerca del reconocimiento facial, podemos encontrar trabajos que sirven como base para complementar un sistema de videovigilancia de bajo costo, como en el trabajo realizado por Mustakim et al. [2019], en donde ellos proponen un sistema de reconocimiento facial usando una computadora Raspberry Pi 3 dejando como antecedente la posibilidad de desarrollar sistemas de reconocimiento facial en una versión de hardware anterior al propuesto en este artículo. En segunda instancia tenemos la publicación realizada por Gunawan and et al [2017], y en su propuesta se encuentra un sistema de reconocimiento facial para la activación de un circuito con relé para abrir una puerta de cerradura magnética, utilizando una Raspberry Pi 3 reportando un 90% de precisión en reconocimiento facial solo con tres personas. Para finalizar esta sección con respecto a las pruebas de procesamiento de la Raspberry Pi 4 B en esta publicación Reenu Mohandas and Hayes [2020], utilizaron distintos modelos de redes neuronales principalmente las de tipo cuantificadas y las cuales se caracterizan por ser destinadas a dispositivos de bajo rendimiento. El hardware propuesto fue una GPU GeForce RTX 2080 Ti y una Raspberry Pi4, los resultados obtenidos fueron descritos de la siguiente manera, los modelos cuantificados funcionan con eficacia en la Raspberry Pi 4 dando como resultado valores altos de precisión mayores a 70% y con un tiempo de detección de 3 milisegundos, resultando comparable al

tiempo que le toman a los dispositivos GPU con modelos no cuantificados.

En base en los trabajos anteriores, en relación con sus resultados se abre la pauta para el desarrollo de un sistema de videovigilancia de bajo costo, utilizando elementos como una cámara IP de gama media-alta en conjunto con una Raspberry Pi 4 B. Con la justificación de ahorrar costos de instalación y hardware, además dentro de este sistema de bajo costo se contempla la integración de un sistema de reconocimiento facial en tiempo real.

4. SISTEMA PROPUESTO

Para el desarrollo de esta experimentación, se realizó un programa en Python 3 el cual se encarga de realizar el procesamiento de los vídeos de entrada. Por medio de una terminal se introducen los parámetros para el procesamiento de los vídeos. El funcionamiento del comparador de algoritmos inicia con la captura de los parámetros de entrada los cuales son ruta del vídeo, redimension máxima de vídeo y tipo de detector facial, una vez capturado esto se inicializa un proceso el cual cuenta con un timer y se encarga de calcular los tiempos de detección cada vez que se encuentra un rostro. Estos frames son enviados a un sub proceso que está analizando la detección de rostros, en caso de localizar uno este envía las coordenadas hacia el proceso principal, donde este se encarga de dibujar cajas alrededor de los rostros en el vídeo, también muestra el número de rostros detectados, y el tiempo de ejecución. Se redimensiona los límites máximos del vídeo a 1080 x 1920, 720 x 1280, 300 x 533, y 180 x 320, con la finalidad de demostrar si es probable que ciertas resoluciones de vídeo pueden afectar los tiempos de ejecución. Originalmente la resolución para procesar los vídeos era de 360 x 640, pero considerando que el algoritmo SSD redimensiona las imágenes de entrada a una resolución de 300 x 300, se optó por aplicar las mismas especificaciones con los demás algoritmos, usando una resolución de 300 x 533 evitando cualquier variación al momento de realizar los experimentos.

Para la ejecución del Benchmark se importa un conjunto de datos con imágenes, y cada una es redimensionada para su posterior procesamiento. Realizando los cálculos de precisión de cada algoritmo da como resultado una media la cual se compara con las calificaciones establecidas en el método de *Intersección sobre Unión (IoU)* donde se analiza si estos valores obtenidos en las predicciones realizadas por cada algoritmo se encuentran arriba de 0.5. Esto con la finalidad de saber si cada algoritmo implementado es mejor para la predicción de objetos. Una vez graficando los resultados se puede realizar un análisis y comparativa con respecto a los demás permitiendo realizar una elección adecuada.

4.1 Hardware

El hardware implementado para realizar las pruebas con los algoritmos es el siguiente:

- Raspberry Pi 4 B 4GB RAM.
- Adaptador SSD X825.
- SSD Western Digital 120GB.

En la figura 1 se observa el hardware implementado.

Algorithm 1 Medición de tiempo de ejecución. El detector facial es uno de: Haar, HOG, SSD ó MTCNN

```

1: procedure DETECTAR(ruta, max_res, detector)
2:    $i \leftarrow 0$   $\triangleright$  Contador de cuadros de vídeo
3:    $v \leftarrow$  flujo de vídeo en ruta
4:    $s \leftarrow$  cuadros a omitir
5:    $f_r \leftarrow$  factor de escala respecto a max_res
6:    $t \leftarrow \emptyset$   $\triangleright$  Tiempos de detección
7:   while  $v$  tiene cuadros do
8:      $i++$ 
9:      $cuadro \leftarrow$  siguiente_cuadro( $v$ )
10:    if  $i \bmod s = 0$  then
11:       $cuadro_r \leftarrow$  redimensionar( $cuadro$ ,  $f_r$ )
12:       $t_i \leftarrow$  tomar tiempo
13:       $cajas \leftarrow$  detector( $cuadro_r$ )
14:       $t_i \leftarrow$  tomar tiempo  $- t_i$ 
15:    end if
16:    for  $caja$  en  $cajas$  do
17:      dibuja  $caja$  en  $cuadro$ 
18:    end for
19:    desplegar( $cuadro$ )
20:  end while
21:  return  $t$ 
22: end procedure

```

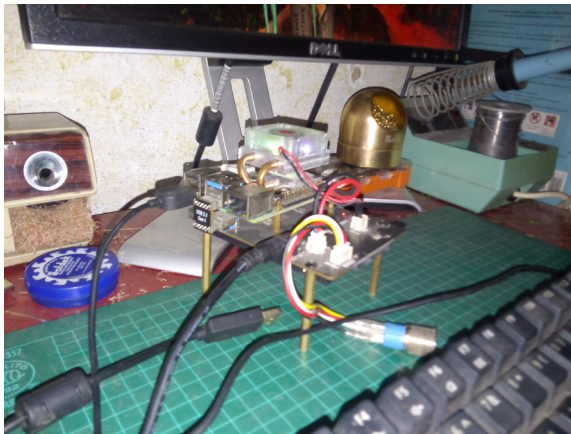


Figura 1. Raspberry Pi y adaptador SSD.

4.2 Software

El sistema operativo de la Raspberry Pi es Raspberry Pi OS dé 32 bits, y para la ejecución de los algoritmos el software utilizado fue el siguiente.

- **Python 3.4** se utilizó para la evaluación de los algoritmos.
- **OpenCV** biblioteca estándar para visión por computadora, la versión utilizada fue la 4.5.1.
- **OpenCV-archivos.XML** contienen vectores característicos para la detección de rostros, y fueron usados para las pruebas con el algoritmo Haar.
- **Librería face_recognition** Geitgey [2020], usado para la localización de rostros por medio del algoritmo HOG, librerías de OpenCV necesarias para el procesamiento de imágenes.

- **Librería MTCNN-CV2** Linxiaohui [2021], una implementación del algoritmo MTCNN para OpenCV sin la necesidad de instalar Keras en Python 3.4.
- **Modelos SSD** deploy.prototxt Wang [2021], y el res10_300x300_ssdlite_140000.caffemodel estos dos archivos permiten el funcionamiento de este algoritmo para el procesamiento de imágenes.
- **Librería multiprocessing** Heimes [2009], esta librería nos permite tener un proceso en segundo plano, el cual se encargara de realizar ciertas tareas sin interrumpir el proceso del primer plano.
- **Librería time** Python [2021] librería para el uso de tiempo local de la computadora.
- **Librería statistics** Crosta [2014], nos permite realizar cálculos estadísticos de manera rápida, como la media y desviación estándar.

4.3 Conjunto de datos

Para poder realizar esta evaluación, con respecto a los diferentes algoritmos, se necesitó de un conjunto de datos con vídeos en donde suceden situaciones cotidianas y que pueden ser captadas por un sistema de videovigilancia los cuales fueron bajados de la plataforma YouTube en las siguientes resoluciones y número de personas como se puede apreciar en la tabla 1.

Tabla 1. Listado de vídeos empleados para la comparación.

Vídeo	Número de personas	Resolución
1	2 - 4	720p
2	4	1080p
3	6 - 18	1080p
4	4 - 6	720p

Describiendo más a fondo este conjunto de datos en la figura 2 en donde el primer vídeo del inciso **a**) la cámara muestra distintos ángulos en específico obteniendo distintas posiciones del rostro, en el inciso **b**) el vídeo corresponde a cuatro personas que se encuentran retiradas de la cámara, pero permanecen en su lugar, en el vídeo del inciso **c**) se puede percibir personas caminando por la acera y en total son 18 personas transitando por la calle para concluir el inciso **d**) muestra un vídeo de una cámara con infrarrojo activado y con un número de 4 a 6 personas.

En la figura 3 se muestra el conjunto de datos WIDER FACE propuesto por Yang et al. [2016], empleado para entrenamiento y evaluación. El espacio total del conjunto de imágenes es de 1.8 Gigas y se compone por 16,106 imágenes, donde se reparten en distintas carpetas, cada carpeta está nombrada por la actividad que están realizando las personas en cada imagen. A partir de este conjunto de datos, se aplicará el método *Intersección sobre Unión (IoU)*, para realizar su evaluación de eficiencia correspondiente y, así poder realizar una elección óptima entre los algoritmos de detección facial que han sido propuestos, basándose en sus predicciones realizadas para detectar un rostro. Además la ventaja de este conjunto de datos es por ser para uso libre a cualquier propósito a realizar.

4.4 Discusión

Acorde con la revisión de la literatura y sus trabajos relacionados, existen ciertas observaciones a considerar,

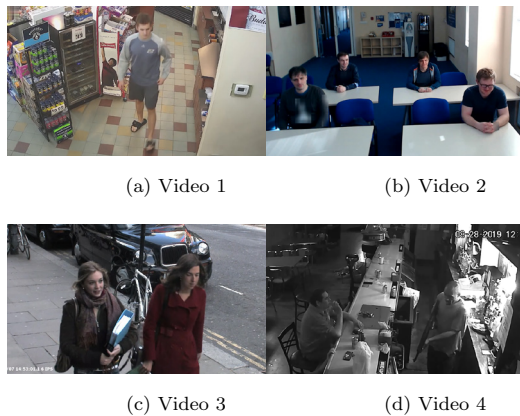


Figura 2. Conjunto de datos para vídeo.

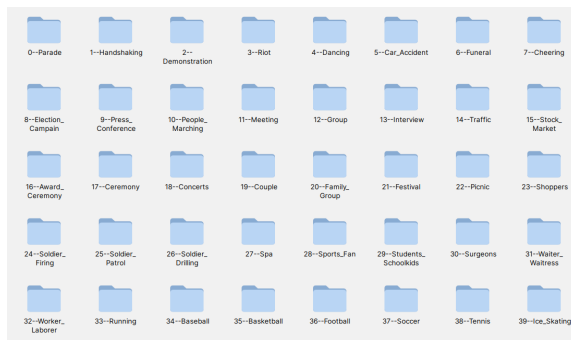


Figura 3. Conjunto de datos para imágenes.

por ejemplo en la mayoría de las pruebas realizadas con cámaras siempre estas se encuentran a una altura óptima y el rostro no se encuentra muy alejado, dando las condiciones necesarias para un mejor reconocimiento, considerando que existan ciertos factores ambientales o de movimiento, los cuales complican la tarea de detección de rostros. Además, en el grupo de personas utilizadas para la detección facial es reducido y sin estar en movimiento. En síntesis este artículo aporta una metodología distinta a lo que comúnmente se encuentra estipulada en la literatura con respecto a la experimentación y resultados, aplicando nuevas variaciones con respecto al vídeo que se procesa, debido al conjunto de datos el cual se caracteriza por tener distintas variaciones de iluminación y aparecen suficientes individuos para analizar, también recreando de manera fiel los posibles escenarios que se puedan presentar en un sistema de videovigilancia comercial.

5. RESULTADOS

Se realizó un promedio con base a los tiempos de ejecución registrados en los cuatro vídeos en su resolución correspondiente, graficando los tiempos de ejecución en la figura 4. Comenzando con el análisis para los tiempos de ejecución en la Raspberry Pi 4 B para los algoritmos HOG Haar y MTCNN en la resolución de 1080×1920 , se observa que el procesamiento más alto inicio con HOG con un tiempo de 7.82 segundos, Haar con 6.76 segundos y siendo el mejor MTCNN con 5.24 segundos siendo MTCNN el algoritmo

que demostró menos tiempo para esta resolución. Continuando con la resolución 720×1280 , HOG se mantiene en un tiempo de procesamiento alto de 4.04 segundos, para Haar 3.22 segundos, y para MTCNN 2.93 segundos. Para la resolución de 300×533 MTCNN registro 0.76 segundos, HOG con 0.71 segundos y por último Haar con 0.61 segundos. Para el algoritmo SSD la resolución está predeterminada a 300×300 y se presentó un tiempo mayor de ejecución para el SSD con 1.93 segundos. Es interesante observar que el procesamiento del MTCNN en 300×533 se incrementó un poco al procesar esta resolución, en comparación con 1080 y 720. Por último en la resolución de 180×320 MTCNN registro un tiempo de 0.31 segundos, seguido de HOG con 0.25 y Haar con 0.20 segundos, repitiéndose el mismo patrón con MTCNN para resoluciones bajas de 300×533 y 180×320 , los tiempos de ejecución aumentaron, pero en HOG y Haar estos disminuyeron, algo que fue muy distinto en resoluciones de 1080×1920 y 720×1280 , dónde los tiempos fueron muy altos. Pasando a los tiempos de ejecución dentro del conjunto de datos WIDERFACE cuando se aplica el método *Intersección sobre Unión (IoU)* en la figura 5. En la resolución 720×1280 , HOG registró un tiempo de 2.10 segundos, seguido de MTCNN donde registró .99 segundos y con un tiempo mínimo de 0.51 segundos para Haar. Para la siguiente resolución 360×533 HOG, continuó con un tiempo alto de ejecución de 0.73 segundos, para MTCNN de 0.41 segundos y para Haar un tiempo mínimo de 0.20 segundos. Para las resoluciones de 300×300 , dónde opera el algoritmo SSD, HOG encabezó un tiempo elevado de 0.50 segundos, seguido del SSD, dónde registró 0.40 segundos, mientras los tiempos mínimos en comparación con los dos anteriores fueron MTCNN con un tiempo de 0.30 segundos y Haar 0.14 segundos. Para finalizar dentro de las resoluciones 180×320 , HOG registró 0.18 segundos seguido de MTCNN con 0.12 segundos y Haar siendo el más bajo con 0.05 segundos. En las gráficas de la figura 6 se muestran los resultados de la eficiencia en la predicción de objetos, en el eje de las y se muestran los porcentajes de puntuación y en el eje de las x se reparten las distintas resoluciones de las imágenes procesadas del conjunto de datos. En las puntuaciones mayores a 50% se infiere que el algoritmo analizado muestra una eficiencia alta al momento de realizar la predicción donde se encuentra el objeto a detectar. Los resultados obtenidos en la resolución 720×1280 , MTCNN obtiene una puntuación de 59%, Haar con 28% y HOG con 27%. Para la resolución de 360×533 MTCNN registra 54%, Haar con 22% y HOG con 21%. Dentro de las resoluciones que trabaja el algoritmo SSD en 300×300 , MTCNN se mantuvo con una calificación dentro de la media de 50%, Haar con 19% y por último HOG con 18%. Finalmente, para la resolución de 180×320 , MTCNN registro un 38%, Haar con 12% y HOG con 12%.

6. CONCLUSIONES

Dentro de la metodología necesaria para el desarrollo de un sistema económico de videovigilancia, la experimentación obtenida forma parte de las primeras etapas para el desarrollo del mismo, en este trabajo se evaluaron los algoritmos de detección de rostros aplicados al dominio de sistemas de videovigilancia con cámaras de seguridad, en donde el usuario está alejado de la cámara y no es

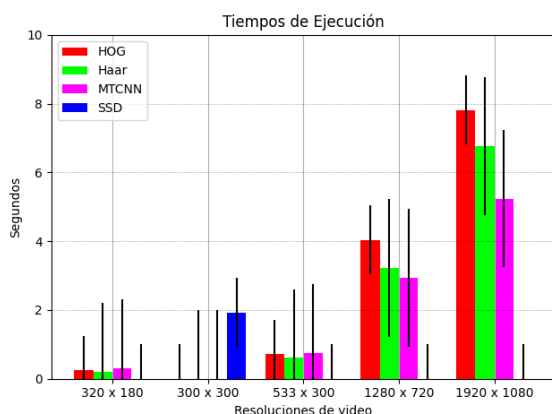


Figura 4. Tiempos de ejecución en Raspberry Pi 4 B.

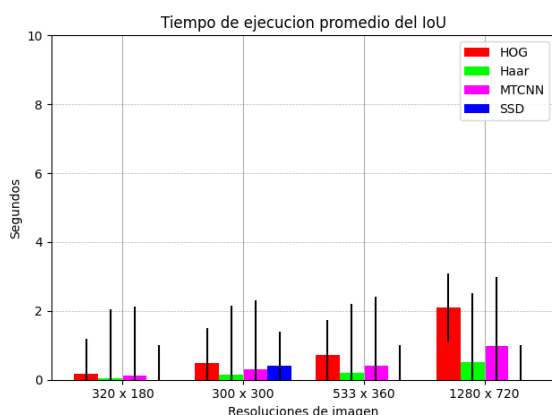


Figura 5. Tiempo de ejecución promedio del *Intersección sobre Unión (IoU)*.

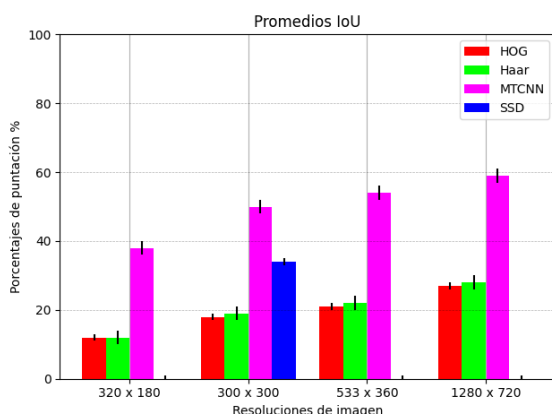


Figura 6. Promedio de *Intersección sobre Unión (IoU)* las puntuaciones mayores a 50%, establece ser mejor para la predicción de la posición del objeto a analizar.

fácil determinar la ubicación o identidad del mismo. Los algoritmos evaluados fueron HOG, Haar, MTCNN y SSD, además a partir, de los resultados obtenidos, se pudo observar el contraste de las tecnologías antiguas y actuales. Las pruebas realizadas con los conjuntos de datos de video e imágenes, basados en distintas características tales como posición, iluminación y condiciones ambientales, sustentaron los resultados de velocidad de ejecución en la Raspberry Pi 4 B, con diferentes resoluciones de video. Además junto con la metodología *Intersección sobre Unión (IoU)*, la cual mide la eficiencia para la predicción de los objetos a detectar, se pudo determinar el algoritmo óptimo para el sistema de bajo costo de vigilancia. De esto, se puede concluir que la resolución óptima para procesar los videos se encuentra dentro de la resolución de 300 x 533, ya que los tiempos de ejecución en la Raspberry Pi 4 B son menores para la detección de rostros, y con respecto a la eficiencia para la predicción de los objetos, MTCNN resultó, con una calificación de 54%, un poco arriba de la media, lo cual lo hace adecuado para la detección y reconocimiento de rostros en tiempo real. El sistema fue probado en un dispositivo Raspberry Pi 4 B, con un adaptador de disco duro SSD y un sistema operativo Raspberry Pi OS.

Con respecto al trabajo a futuro basado en la resolución y algoritmo óptimo obtenido en la experimentación, se consideraría trabajar con los siguientes componentes y pruebas:

- Realizar pruebas con una cámara IP en conexión a un router hacia la Raspberry Pi 4 B, emulando un sistema de videovigilancia.
- Efectuar pruebas de distancia para la detección facial, con distintas condiciones ambientales.
- Evaluar distintos extractores de características.

REFERENCES

- Abaya, W.F., Basa, J., Sy, M., Abad, A.C., and Dadios, E.P. (2014). Low cost smart security camera with night vision capability using raspberry pi and opencv. 1-6. doi:10.1109/HNICEM.2014.7016253.
- Ahonen, T., Hadid, A., and Pietikainen, M. (2006). Face description with local binary patterns: Application to face recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28(12), 2037-2041. doi: 10.1109/TPAMI.2006.244.
- Crosta, S. (2014). Python - statistics module. <https://pypi.org/project/statistics/>.
- Dalal, N. and Triggs, B. (2005). Histograms of oriented gradients for human detection. 1, 886-893 vol. 1. doi: 10.1109/CVPR.2005.177.
- Dürr, O., Pauchard, Y., Browarnik, D., Axthelm, R., and Loeser, M. (2015). Deep Learning on a Raspberry Pi for Real Time Face Recognition. doi:10.2312/egp.20151036.
- Geitgey, A. (2020). face-recognition. <https://libraries.io/pypi/face-recognition>.
- Goyal, K., Agarwal, K., and Kumar, R. (2017). Face detection and tracking: Using opencv. 1, 474-478. doi: 10.1109/ICECA.2017.8203730.
- Gunawan, T.S. and et all, M.H.H.G. (2017). Development of face recognition on raspberry pi for security enhancement of smart home system. *Indonesian Journal of*

- Electrical Engineering and Informatics (IJEEI)*, 5(4), 317–325. doi:10.11591/ijeei.v5i4.361.
- Heimes, C. (2009). python-multiprocessing. <https://docs.python.org/3/library/multiprocessing.html>.
- Huu-Quoc Nguyen, Ton Thi Kim Loan, Bui Dinh Mao, and Eui-Nam Huh (2015). Low cost real-time system monitoring using raspberry pi. 857–859. doi:10.1109/ICUFN.2015.7182665.
- Linxiaohui (2021). Mtcnn face detector using opencv. <https://pypi.org/project/mtcnn-opencv/>.
- Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.Y., and Berg, A.C. (2016). Springer International Publishing, Cham.
- Murugan, K.H.S., Jacintha, V., and Shifani, S.A. (2017). Security system using raspberry pi. 863–864. doi:10.1109/ICONSTEM.2017.8261326.
- Mustakim, N., Hossain, N., Rahman, M.M., Islam, N., Sayem, Z.H., and Mamun, M.A.Z. (2019). Face recognition system based on raspberry pi platform. 1–4. doi:10.1109/ICASERT.2019.8934485.
- Muyambo, P. (2018). Smart surveillance system safeguard security company using raspberry pi. 7(8), 40–44.
- Python (2021). Python - date time. <https://docs.python.org/3/library/time.html>.
- Ramesha K, K B Raja, V.K.R.L.M.P. (2010). Feature extraction based face recognition, gender and age classification. (*IJCSE*) *International Journal on Computer Science and Engineering.*, 2(01S), 14–23.
- Reenu Mohandas, Mangolika Bhattacharya, M.P.K.V.C. and Hayes, M.J. (2020). Tensorflow enabled deep learning model optimization for enhanced realtime person detection using raspberry pi operating at the edge. *AICS 2020 Artificial Intelligence and Cognitive Science Proceedings of The 28th Irish Conference on Artificial Intelligence and Cognitive Science*, 2771(61), 156–168.
- Rezatofighi, H., Tsoi, N., Gwak, J., Sadeghian, A., Reid, I., and Savarese, S. (2019). Generalized intersection over union: A metric and a loss for bounding box regression. 658–666. doi:10.1109/CVPR.2019.00075.
- Szeliski, R. (2011). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer International Publishing.
- U.S. Department of Homeland Security, S. and Technology. (2013). *CCTV Technology Handbook*. Interagency Agreement No.HSHQDC-07-X-00467.
- Viola, P. and Jones, M. (2001). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. 1, I–I. doi:10.1109/CVPR.2001.990517.
- Wang (2021). deploy.prototxt thesis. url-<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.8206211.v1>.
- Wang, N., Gao, X., Tao, D., and Li, X. (2018). Facial feature point detection: A comprehensive survey. *Neurocomputing*, 50–65.
- Yang, S., Luo, P., Loy, C.C., and Tang, X. (2016). Wider face: A face detection benchmark. 5525–5533. doi:10.1109/CVPR.2016.596.
- Zhang, K., Zhang, Z., Li, Z., and Qiao, Y. (2016). Joint face detection and alignment using multitask cascaded convolutional networks. *IEEE Signal Processing Letters*, 23(10), 1499–1503. doi:10.1109/LSP.2016.2603342.

Atributos de Calidad para evaluar la usabilidad de las Páginas Web

Ahumada Cervantes María de los Angeles*. Melo Morín Julia Patricia**. Rivera García Guadalupe Esmeralda***.

***Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, División de Estudios de Ingeniería Informática (Tel: 846-100-6236; e-mail: angeles.ahumada@itspnuco.edu.mx).

Resumen

La presente investigación proporciona un estudio de la usabilidad como atributo de calidad de las Páginas Web, tomando como punto de referencia las características que deben de cumplir conforme al estándar de la norma Organización Internacional de Normalización/Comisión Electrotécnica Internacional 25000. Se estudian los métodos que se utilizan para llevar a cabo dicho proceso, así como, se describen los aspectos que se van considerar para realizar la evaluación de los mismos. Se lleva a cabo una revisión de la literatura sobre las herramientas de software para la medición de la usabilidad de las Páginas Web y los inconvenientes. Se determina la metodología que puede ser utilizada para realizar el proceso de evaluación correspondiente y se establecen los resultados mediante la utilización de un caso práctico.

Keywords: Usabilidad, páginas web, Calidad, Evaluación.

1. Introducción

En la actualidad la adquisición de los software desde aplicaciones de escritorio, web, móviles o servicios, están dependiendo en gran medida del nivel de calidad alcanzado por cada uno de ellos, por esta razón todos los tipos de industrias que desean ser altamente competitivas en el mercado nacional e internacional han incrementado el nivel de calidad en sus procesos (Sakran, H.A & Alsudairi, M. 2021). La calidad del Software es el grado en que el software posee ciertos atributos que debe de cumplir en específico en la industria del Software se han definidos varios atributos a la hora de especificar la calidad de un producto, los cuales son: usabilidad, confiabilidad, seguridad, rendimiento, siempre buscando la satisfacción del cliente (Constanzo, M., Casas, S., & Marcos, A. 2014). Dentro de los atributos de calidad uno de los considerados importantes es el de la usabilidad, la cual indica la facilidad con la que un usuario puede usar una Página Web (Enriquez, 2013).

La usabilidad es un atributo de calidad la cual se refiere a la facilidad para el usuario para hacer una determinada tarea, que se adapte a las necesidades y a la satisfacción del mismo (Callejas-Cuervo, M., Alarcón-Aldana, A. C., & Álvarez-Carreño, A. M. 2017). El proceso de evaluación de la usabilidad podría arrojar resultados que dan pie a obtener mejoras en la producción de páginas web. La evaluación de la usabilidad es con la finalidad de modificar y optimizar algunos aspectos en las páginas web que se encuentren mal diseñados.

Existen organizaciones que han trabajado en estandarización de aspectos de calidad en el software como son la ISO (International Organization for Standardization), la IEEE (Institute of Electrical

and Electronics Engineers, Inc.) y la IEC (International Electrotechnical Commission). Estos estándares coinciden en especificar a la usabilidad como un atributo de calidad, la cual es importante para el usuario haciendo que el producto software sea atractivo, aprendido, usado bajo determinadas condiciones y contextos de uso. Para lograr este objetivo se tomó como referencia la Norma ISO/IEC 25000 para la evaluación de este atributo de calidad.

Las herramientas de software existentes para la evaluación de la usabilidad no consideran en forma específica la evaluación de este atributo de calidad, evalúan la interfaz de usuario considerando solo algunos aspectos de la usabilidad pero no se enfocan específicamente en una norma de calidad.

En los últimos años el uso de las páginas web para desarrollar las actividades diarias dentro de las empresas han ido en aumento, es necesario crear criterios que permitan realizar la evaluación de la usabilidad como un atributo de calidad de las mismas., considerando al usuario final como un actor principal de la utilización de las páginas web.

Este trabajo se enfoca de forma general de establecer los criterios que deben ser considerados para llevar a cabo la evaluación de la usabilidad la cual se realiza de la siguiente forma: en el apartado I. Introducción, nos proporciona una inducción al tema. En el apartado II. La usabilidad, describe el significado considerando la opinión de diversos autores. El apartado III. Estándares de Calidad ISO/IEC 25000, hace un análisis de los puntos que serán tomados para medir la usabilidad como un atributo de calidad. El apartado IV, analiza los métodos de evaluación que han utilizado diversos autores en sus

investigaciones para la evaluación de la usabilidad. En el apartado V, proporciona un estudio de las herramientas existente para la evaluación de la usabilidad y sus inconvenientes. En el apartado VI, establece una metodología para realizar la evaluación de la usabilidad de las páginas web. En el apartado VII, se establecen los resultados y por último en el VIII, se establecen las conclusiones y trabajos futuros.

II. Usabilidad

La Organización Internacional para la Estandarización propone dos definiciones relativas a la usabilidad del software:

1. ISO/IEC 9126 establece que la “Usabilidad se refiere a la capacidad de un software de ser comprendido, aprendido, usado y ser atractivo para el usuario en condiciones específicas de uso”.
2. ISO/IEC 9241 menciona que la “Usabilidad es la efectividad, eficiencia y satisfacción con la que un producto permite alcanzar objetivos específicos a usuarios específicos en un contexto de uso específico”.

Jakob Nielsen, define la usabilidad en términos de cinco atributos: facilidad de aprendizaje, eficiencia, memorabilidad, errores y satisfacción. Nielsen menciona que la importancia de estos atributos varía en función del contexto y de los usuarios finales (Enriquez, 2013).

Se puede definir la usabilidad de acuerdo a la ISO 25000 como la capacidad del Software de ser entendido, aprendido, usado y atractivo para el usuario cuando se usa bajo determinadas condiciones. Para lo cual el estándar divide estas características en subcaracterísticas como son:

- Capacidad para reconocer su adecuación.
- Capacidad de aprendizaje.
- Capacidad para ser usado.
- Protección contra errores de usuario
- Estética de la interfaz de usuario
- Accesibilidad.

En conclusión se puede definir que la usabilidad es la facilidad de uso que tiene un objeto o artefacto para un determinado usuario, con respecto al entorno en que se desenvuelve (Standardization, 2020). Este concepto es aplicado a diferentes ambientes y objetos para medir el proceso que se realiza. En este caso se utilizará para evaluar la usabilidad de las páginas web.

En cuanto a la usabilidad del software constituye un atributo de calidad que es primordial para el éxito del mismo, así lo determinan los estándares internacionales de calidad ISO/IEC 25000 que se mencionan en el siguiente apartado

III. Estandar de calidad ISO/IEC 25000

3.1 Calidad

Uno de los factores importantes actualmente en el desarrollo de Software es la calidad del producto como lo mencionan los estándares internacionales junto con la calidad del proceso.

La calidad de un producto de software es el conjunto de cualidades que lo caracterizan y determinan su utilidad. Se debe plantear un adecuado equilibrio en los factores como eficiencia, confiabilidad, satisfacción, entre otros, los cuales pueden definirse bajo dos aspectos (Alvarado, L., Gómez, Et. al. 2016):

- La calidad interna: Medible a partir de las características internas, como el código fuente.
- La calidad externa: Medible en el comportamiento del producto evaluada por el usuario final, que es la que será considerada para este estudio.

3.2 Estándar 25000

En los últimos tiempos han surgido la familia de normas ISO/IEC 25000, la cual establece una manual para la utilización de una serie de estándares internacionales denominados Requisitos y Evaluación de Calidad de Productos de Software (SQuaRE - System and Software Quality Requirements and Evaluation) (Standardization, 2020).

El estándar ISO/IEC 25000 establece una serie de guías que se encuentran basadas en ISO/IEC 9126 y en ISO/IEC 14598. Su principal funcionalidad es encaminar el desarrollo de software mediante la especificación de los requisitos que deben cumplir así como la evaluación de los atributos de calidad.

La norma ISO 25000 establece tres vistas en el estudio de calidad de un producto; la vista interna, la cual considera el tamaño, complejidad del código y que cumpla con las normas establecidas de acuerdo a la metodología de desarrollo orientada a objetos. Por otra parte, la vista externa, analiza el rendimiento de una página web, el uso de la memoria de una aplicación web o el tiempo de funcionamiento. La que se va a considerar en este estudio es la vista en uso, la cual se encarga de realizar mediciones con respecto a la eficiencia y utilización del software del usuario final, que el software sea productivo a la hora de realizar las tareas encomendadas.

Uno de los factores de calidad importantes que menciona la Norma ISO/IEC 25000 es el de usabilidad, ya que es el que determina el grado de satisfacción del usuario y de esto depende que el software se utilice o no en forma eficiente.

Para llevar a cabo la evaluación es necesario analizar los métodos que se utilizan para evaluar la usabilidad y determinar los que se van a considerar para la realización de la misma.

IV. Métodos de evaluación de la usabilidad

Los métodos son los pasos que se utilizan para medir la usabilidad de un producto como las páginas web. Ayudan al evaluador a realizar el trabajo en forma más eficiente, debido a

que los investigadores las han utilizado a lo largo de los años y han obtenido resultados favorables en dicho proceso.

Los métodos de valoración de usabilidad se pueden dividir en: inspección, indagación, test (Mohd Naz'ri Mahrin, 2009), modelo Semi-cognitivo y la Técnica de Eye Tracking.

Inspección: Son un conjunto de métodos basados en la examinación de la interfaz de usuario de una aplicación por parte de expertos. En este método cada evaluador realiza un diagnóstico de la interfaz con base a una lista de chequeo de heurística creada para tal fin. Posteriormente se reúnen para discutir los elementos encontrados en la interfaz, finalmente se elabora un reporte de los aspectos encontrados en forma cualitativa.

Los métodos son los siguientes: La evaluación heurística, recorrido de usabilidad plural y recorrido cognitivo, inspección de estándares.

Indagación: Consiste en analizar los gustos de los usuarios, desagrados, necesidades e identificación de requisitos. Los cuales pueden ser: Observación de campo, grupos de discusión dirigidos, entrevistas y grabación de usos

Test: En este método los usuarios trabajan en tareas utilizando el sistema o prototipo del mismo y los evaluadores analizan los resultados para ver como la interfaz soporta a los usuarios con sus tareas. Los cuales pueden ser: medidas de prestaciones, pensando en voz alta (Thinking Aloud), interacción constructiva, test retrospectivo, método del conductor (Giraldo, 2011).

Estos son métodos que se enfocan en evaluar la eficiencia y eficacia del sistema, es decir, evalúan la usabilidad en forma objetiva.

Modelo semi-cognitivo: Este método de evaluación entiende la interfaz como un mecanismo de comunicación entre el diseñador y usuario. Existen dos modelos, el modelo del diseñador, el cual es la imagen mental que tiene el creador de lo que quiere construir y como debe funcionar y el modelo del usuario que le explica el funcionamiento del sistema (Scolari, 2001).

Eye tracking: Es una técnica novedosa que permite tener constancia de qué punto del sistema de información ha estado mirando el usuario en cada momento. Esta técnica proporciona información sobre la dificultad para encontrar aspectos concretos de la interfaz y el tiempo o el número de elementos analizados antes de encontrar el elemento adecuado (López, J.M., 2010).

Para determinar una herramienta que sirva de apoyo para medir la Usabilidad como atributo de calidad bajo la Norma ISO/IEC 25000, es necesario hacer un análisis sobre los diferentes softwares que realizan este proceso. Este estudio permitirá conocer los criterios que se deben evaluar para que sirva de apoyo para que las empresas puedan validar el nivel de usabilidad de las páginas web.

V. Herramientas de software para evaluar la usabilidad de sitios web:

Se llevó a cabo la selección de varias herramientas que son usadas para llevar a cabo la evaluación de la usabilidad las cuales se describen a continuación:

- **WebSAT:** herramienta analizadora de las páginas web estáticas, es un prototipo de herramienta que inspecciona la composición HTML de las páginas web para la detección de problemas de usabilidad.

- **WebXm:** es la principal solución de riesgos con la finalidad de verificar los problemas que impactan la eficiencia y la conformidad con el usuario de los sitios web, es desarrollada por una compañía de IBM, denominada WatchFire (Benavides & Aros, 2012). Automatiza la detección de algunos defectos de página como: enlaces rotos, errores ortográficos, páginas de carga lenta, la forma de navegación, para ayudar a mejorar la usabilidad del sitio web. Su principal función es evaluar la calidad de los sitios web desde la perspectiva de la usabilidad, pero no evalúa la calidad de uso.

- **Ecusi:** Es un programa que incluye un conjunto de métricas para determinar si un programa web cumple con algunos criterios de usabilidad mediante diversos métodos (Solano, J. C. Cerón, C. A. Collazos and H. M. Fardoun, 2015).

- **CrazyEgg:** Es un programa de cómputo online que realiza un seguimiento de los clics que hacen los usuarios en cada componente, esta herramienta realiza mapas de calor, identificando los elementos distractores, áreas irrelevantes o lugares que no contienen enlaces donde los usuarios que interactúan con la página hacen clic. Los datos se exportan a Excel o base de datos, aunque los clics son seguidos en una sola página, no monitorean la sesión completa, por lo que no analiza el comportamiento de las visitas entre varias páginas de la aplicación web o en diferentes momentos.

- **Page Analytics:** Se utiliza como una extensión del navegador de google, utiliza métricas para analizar la página web a estudiar, da como resultado lo que visualizan los usuarios cuando dan clics en los distintos elementos de la página web, proporcionando que partes son más utilizadas por los usuarios de la misma, se encuentra en internet de forma gratuita, aunque en ocasiones permite realizar análisis de sesiones completas, la información que arroja puede ser un poco confusa. Por lo tanto es importante al utilizarla definir bien los objetivos que quieres lograr, así como, las métricas que se van a utilizar, sino puede ocasionar mucho trabajo al respecto.

- **UxCheck:** Se basa en los 10 principios de evaluación Heurística de Jacob Nielsen (Nielsen, 1994). Este se instala en el navegador y de esta forma el usuario puede interactuar con la página y ver qué elementos no cumplen con los principios, además permite agregar notas, realizar capturas de pantallas. Es gratis y fácil de utilizar, se enfoca principalmente en el diseño web, no permite establecer nuevos criterios de evaluación.

- Site Checker: Su evaluación se basa en el W3C Web Content Accessibility Guidelines (WCAG), valida código de Html, así como, puede evaluar otros contenidos tales como enlaces muertos, archivos ocultos, scripts de Java, CSS, comentarios adicionales en el código HTML y el código de relación de texto en una página web (Macho, 2013).

Se pueden observar algunos inconvenientes de las herramientas anteriormente mencionadas las cuales son:

- WebSat: No evalúa las páginas dinámicas
- WebMX: Evalúa la usabilidad y la accesibilidad de una página web. Sin embargo, en la evaluación de la accesibilidad sólo puede evaluar el texto y el color de fondo de contraste.
- Ecusi: Estas herramienta requiere de varios métodos de evaluación de la usabilidad y es muy tedioso determinar los resultados.
- CrazyEgg: Esta herramienta no proporciona los resultados en forma automática, los transporta a una hoja electrónica, donde serán interpretados por los expertos en usabilidad.
- Page Analytics: Hace un análisis de las sesiones completas sin embargo, la gran variedad de datos que arroja es confusa.
- UxCheck: Solo utiliza las heurísticas para evaluar la usabilidad.
- Site Checker: Evalúa la calidad interna y en la calidad externa solo se enfoca en la accesibilidad del usuario.

Como se puede observar la mayoría de los trabajos citados anteriormente se enfocan a evaluar la usabilidad en cuanto a contenido, accesibilidad de las interfaces web. Otras herramientas solo evalúan las heurísticas establecidas por Nielsen para la evaluación de la usabilidad. Ninguna de ellas se enfoca específicamente a medir la usabilidad conforme a los Estándares de Calidad de las Normas ISO/IEC 25000 en forma específica. En el siguiente apartado se establece la Metodología a utilizar para llevar a cabo este proceso

VI. Metodología para llevar a cabo la evaluación de la usabilidad

Para llevar a cabo la evaluación de la usabilidad como un atributo de la calidad, se deben establecer los criterios, así como los atributos que permiten valorar cada uno de los mismos para que las páginas web permitan cumplir con los Estándares Internacionales como lo marca la Norma ISO/IEC 25000 en su apartado 25010 además de la Norma ISO/IEC 25022-2016, que mide la calidad en uso en el apartado de usabilidad, la cuál es derivada de la Norma ISO 9241-11, misma que contempla los criterios de eficiencia, satisfacción y facilidad de uso, como criterios de calidad que deben ser contemplados para evaluar los productos de software como son las páginas web.

La evaluación será llevada a cabo mediante los siguientes pasos:

Se va a utilizar el método de inspección en el cual se llevará a cabo mediante cinco expertos en usabilidad de acuerdo a los estudios realizados por Nielsen (Nielsen, 1994), fundamentando que una mayor cantidad de evaluadores reduce el beneficio de forma considerable, se consideraron 5 expertos en el área Diseño de páginas Web del área de Informática.

El instrumento de medición de la evaluación incluye los siguientes aspectos a evaluar.

Comunicación: Mide el grado de interacción entre la interfaz Web y el usuario final (CCOM).

Facilidad de Uso: Mide el grado de Satisfacción del usuario frente a la Interfaz Web (CFUSO).

Estética: Este criterio mide el diseño estético que posee la interfaz del usuario (CFES).

Operatividad: Mide la capacidad que tiene la Interfaz del usuario para cumplir con una determinada función (COP).

Facilidad de Comprensión: Mide la capacidad que brinda la Interfaz del usuario para utilizar sus recursos en tareas y condiciones de uso en particular (CFCOM).

Eficiencia: Mide el tiempo empleado para completar una tarea en Interfaz Web (CEF).

Tolerancia a Fallos: Mide la capacidad que tiene la Interfaz Web para prevenir errores y establecer los mensajes de error de manera apropiada (CTF).

Documentación y ayuda: Mide la facilidad que ofrece la Interfaz Web de proveer de ayuda al usuario al momento de interactuar con la Página Web (CDYA).

Para cada criterio se establecerán una serie de atributos que son los que el evaluador utilizará para dar una ponderación a cada criterio.

Se propone crear una herramienta automatizada que evalúe todo tipo de Páginas Web de acuerdo a los 8 criterios que marca la Norma ISO/IEC, así como las métricas que corresponden a cada criterio para evaluar la usabilidad de la misma.

Una vez determinada la Metodología de esta investigación se procede establecer los resultados que se obtuvieron del análisis de evaluación de usabilidad.

VII. Resultados

Para llevar a cabo la aplicación de los criterios de evaluación de usabilidad se utilizó un caso de estudio, la página del Instituto Tecnológico de Superior de Pánuco, la cuantificación de los criterios se determinó en base a una escala liker de 0 a 5, en donde el Juicio de valor que se encuentra en la Tabla 1, va de un total cumplimiento a un No cumplimiento.

Tabla 1 Escala de valoración

Criterio	Valor asignado
Cumple Totalmente	5
Cumple Aceptablemente	4 a 4.9
Cumple Regularmente	3 a 3.9
Cumple insatisfactoriamente	1 a 2.9
No cumple	0.0 a 0.9

Posteriormente se obtiene el valor total de usabilidad de las Interfaces Web que corresponde al resultado de la sumatoria de las calificaciones de todos los criterios como se muestra en la ecuación 1 y ecuación 2.

$$\text{Criterio} = \Sigma (\text{Valor del atributo}) / \text{No-total.} \quad (1)$$

$$\text{Nivel de usabilidad} = (\text{CCOM} + \text{CFUSO} + \text{CFE} + \text{COP} + \text{CFCOM} + \text{CEF} + \text{CTF} + \text{CDYA}) / \text{Total de Criterios} \quad (2)$$

Se determinará una valoración en una escala de 0 a 100% como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Ponderación de los Factores de Evaluación de Usabilidad para las páginas web

CRITERIO	ABREVIATURA	VALORACION %
Comunicación(contenido)	CCOM	12.0%
Facilidad de Uso	CFUSO	15.0%
Operatividad	COP	13.5%
Factores estéticos	CFE	12.0%
Facilidad de Comprensión	CFCOM	12.0 %
Eficiencia	CEF	12.5%
Tolerancia a Fallos	CTF	12.5%
Documentación y ayuda	CDYA	10.5%

Se utilizará la siguiente ecuación 3, en la que se va a determinar el valor del criterio, sumando el valor de cada atributo establecido por el evaluador, entre el número total, multiplicado por la ponderación del factor.

$$\text{Criterio} = \Sigma (\text{atributos}) / \text{No-total} * \text{ponderación.} \quad (3)$$

Finalmente, para determinar la calificación de usabilidad se realiza la suma de los 8 criterios por la ponderación establecida a cada criterio. De esta forma se obtiene el valor de usabilidad otorgada a la páginas web evaluada.

La tecnología utilizada para el desarrollo del software permite evaluar cada uno de los 8 criterios se muestra en la Figura 1. Se desarrolló en MVC, modelo vista controlador sobre el lenguaje C#, montado en un datacenter de Microsoft Azure que incluye un servidor IIS así como un motor de base de datos SQL server, dando servicio a diversas plataformas de visualización web móviles o de escritorio.

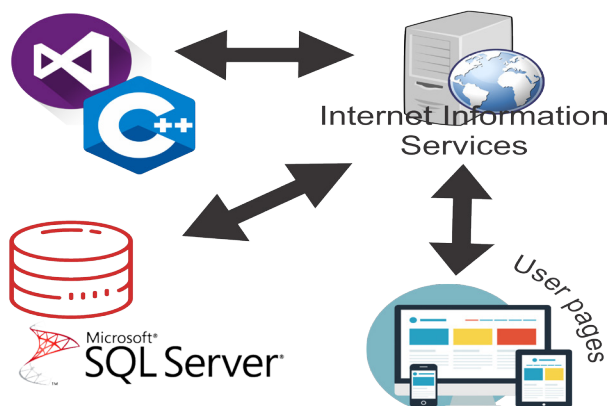


Fig. 1 Arquitectura Del Software de Evaluación

Cabe mencionar que el resultado más objetivo se presenta por criterio de evaluación, como se muestra en la Figura 2, ya que permite tener una visión más clara de los resultados de la evaluación. La herramienta de Software. En este caso se presenta la operatividad de la página web a estudiar:

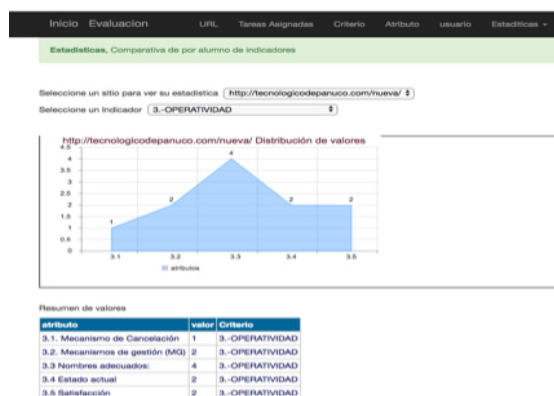


Fig. 2 Operatividad

En lo que respecta a los resultados obtenidos en el criterio de operatividad se observa en la Figura 2, que el punto 3.1 mecanismos de gestión, mecanismos de cancelación, satisfacción, se encuentran debajo de la media, debido a que en primera instancia la página principal no permite configurar el entorno en donde se trabaja y además de acuerdo a los resultados no proporciona satisfacción al usuario. De esta forma se obtienen los resultados de los 8 criterios establecidos para por evaluar la usabilidad de las páginas web, desde comunicación hasta documentación y ayuda de la página web.

VIII. Conclusiones

La presente investigación proporciona un estudio que sirve para poder determinar los criterios para llevar a cabo la evaluación de

la usabilidad como un atributo de calidad, tomando el estándar ISO/IEC 25000 con la finalidad de encontrar aspectos de la interfaz que se encuentren mal diseñados y proponer mejoras a las páginas web para que el usuario final logre la eficiencia y satisfacción en el uso de la misma.

En lo que respecta a los 8 criterios evaluados en el caso de estudio se determinó que la página web de la universidad el criterio de comunicación no cumple con una escala de valoración aceptable y tendrán que rediseñar este elemento de acuerdo a los resultados obtenidos. Estos resultados permitirán mejorar el diseño y mejorar la usabilidad de la misma.

La necesidad creciente de las empresas de contar con páginas web que sean usables y cumplan con los estándares de calidad establecidos por las normas internacionales, hace necesario evaluar la usabilidad como un principio de calidad, de tal forma que les permita a los desarrolladores de software darse cuenta de lo que deben modificar en el diseño de las páginas web para mejorar la usabilidad de las mismas, así como ahorrar tiempo en el mantenimiento el cual se traduce en una reducción de costos en horas de codificación.

Como trabajo a futuro se pretende llevar a cabo un modelo de evaluación de la usabilidad de las Páginas Web que incluya un grupo experimental en el que se analicen los resultados mediante la herramienta de software y la técnica de Eye tracking que permitan obtener las preferencias de los usuarios.

Referencias

- Alvarado, L., Gómez, Et. al. (2016). Proceso de aseguramiento de la calidad para un modelo de la calidad en Cuba. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, Vol.10, 124-137.
- Benavides, E. S., & Aros, C. G. (15 de 06 de 2012). Sistema difuso para la evaluación de la calidad externa de software orientado a la web. *Revista de Educación de Ingeniería*, 11.
- Callejas-Cuervo, M., Alarcón-Aldana, A. C., & Álvarez-Carreño, A.M. (2017). Modelos de calidad del software, un estado del arte. *Entramado*, 13(1), 236-250.
- Constanzo, M., Casas, S., & Marcos, A. (2014). Comparación de modelos de calidad, factores y métricas en el área de la Ingeniería de software. *Revista de Informes Científico Técnicos-UNPA*, 13(1), 1852-4516.
- Enriquez, J.A. (2013). Usabilidad en aplicaciones móviles. *Informes Científicos Técnicos-Unpa*, 5.
- Giraldo, J. A. (2011). Método para la evaluación integral de la usabilidad en sistemas e-learning. *Revista Educacion en Ingeniería*, 69-80.
- López, J.M. (2010). Análisis de la arquitectura de webs mediante tests de estrés de navegación. *El profesional de la información*, 359-367.
- Macleod, M., & Rengger, R. (1998). The Development of DRUM: A Software Tool for Video-assisted Usability Evaluation. National Physical Laboratory DITC HCI Group.
- Macho, D. G. (2013). La calidad de una página web como herramienta de comunicación. *Estudios sobre el mensaje periodístico*, 253-261. doi:https://doi.org/10.5209/rev_ESMP.2013.v19.42032
- Martínez, J. G. (20 de 09 de 2011). Evaluación de la usabilidad de un sitio web educativo y de promoción de la salud en el contexto universitario. 1-17. doi:<https://doi.org/10.21556/edutec.2011.37.393>
- Mohd Naz'ri Mahrin, P. S. (2009). Selecting Usability Evaluation Methods for Software Process Descriptions. 16th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC 2009), 523-529.
- Nielsen, J. (1994). *Usability Engineering*. Boston: Morgan Kaufmann.
- Sakran, H.A & Alsudairi, M. (2021) Evaluación de la usabilidad y accesibilidad de los sitios web móviles de gobierno electrónico de Arabia Saudita, en *IEEE Access*, vol. 9, págs. 48254-48275, doi: 10.1109 / ACCESS.2021.3068917.
- Scolari, C. A. (2001). hacia una sociosemiótica de las interacciones digitales. *Quaderns de comunicació i cultura*, 255-257.
- Standardization. (26 de agosto de 2020). I.O. ISO 25000 Calidad del producto Software. Obtenido de <http://iso25000.com/>
- Solano, J. C. Cerón, C. A. Collazos and H. M. Fardoun. (2015). ECUSI: Herramienta software para la evaluación colaborativa de la usabilidad de sistemas interactivos 10th Computing Colombian Conference (10CCC), Bogota, Colombia, 2015, pp. 157-163, doi: 10.1109/ColumbianCC.2015.7333418.

Un modelo de automatización para el consenso aplicado al problema de selección de viajes con un enfoque de intervalos

Manuel Barrón-Santiago*, Nelson Rangel-Valdez**, Claudia Gómez-Santillán*, Ma. Lucila Morales-Rodríguez*, Laura Cruz-Reyes*, Héctor J. Fraire-Huacuja*

* *Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Av. 1o. de Mayo s/No esq. Sor Juana Inés de la Cruz, C.P., Cd. Madero, Tam. 89440, México (Tel: 833-357-4820; e-mails: manuelbns60@gmail.com, claudia.gs@cdmadero.tecnm.mx, lucila.mr@cdmadero.tecnm.mx, laura.cr@cdmadero.tecnm.mx, hector.fh@cdmadero.tecnm.mx).*

** *Cátedras CONACyT - Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Av. 1o. de Mayo s/No esq. Sor Juana Inés de la Cruz, C.P., Cd. Madero, Tam. 89440, México (e-mail: nrangev@conacyt.mx)*

Resumen: El consenso es un proceso presente en la toma de decisiones grupales (GDM, Group Decision Making), en donde un grupo de expertos busca una solución que satisfaga los intereses de todo el grupo. Durante el proceso de consenso se busca resolver un problema en específico, para este artículo el problema que se busca resolver es el problema de selección de viajes, donde la solución a encontrar es una cartera formada por un conjunto de destinos, además otros factores a tomar en cuenta son días de viaje, el costo del viaje, los lugares a visitar. Este caso de estudio usa un enfoque de intervalos basado en superación para integrar las preferencias. Las principales contribuciones son un nuevo modelo para la automatización del consenso durante el proceso de toma de decisión grupal, así como también un mecanismo automático que apoyará a los expertos a realizar un ajuste en las preferencias que permita alcanzar el consenso.

Keywords: Real-time algorithms, scheduling, and programming; Decision making and cognitive processes; Modeling of human performance; Evolutionary algorithms; Modelling and decision making in complex systems.

1. INTRODUCCIÓN

El problema de toma de decisión grupal (GDMP por el vocablo en inglés *Group Decision Making Problem*) busca alcanzar el consenso de un grupo de expertos $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ en relación a la selección de la mejor alternativa de entre un conjunto factible $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ para un problema dado, considerando los criterios individuales de cada experto. Cuando el grupo de expertos encuentra una solución en la que todos están en común acuerdo o ha alcanzado el mayor grado de aceptación, se dice que los expertos han llegado a un consenso.

En la literatura hay múltiples trabajos que han diseñado modelos de consenso a diferentes casos de estudio, solucionando con ello el problema de GDMP. La Tabla 1 resume las principales características observados dentro de los trabajos de investigación analizados, estas características son: A) requerir o no la intervención de un moderador; B) contener una estrategia para el modelado de preferencias; C) tener la capacidad para manejo de incertidumbre; D) contar con una técnica utilizada para lograr el consenso; E) definir un mecanismo de ajuste de parámetros; F) incorporar el uso de intervalos en su modelado; y G) desarrollar automáticamente el proceso de consenso sin requerir intervención humana. Es importante notar que las técnicas para lograr consenso son: 1) valores máximos/mínimos; 2) valores de

dominancia estricta/débil; 3) medida de consenso y coherencia; 4) medida de consenso y proximidad; y, 5) regresión a la media.

En la Tabla 1, se pueden observar el uso recurrente de relaciones difusas para modelar las preferencias, o de medidas de consenso como técnicas para lograr consenso. Sin embargo, también se puede observar que pocos trabajos han utilizado intervalos como parte de la estrategia para solucionar GDMP. Considerando estas circunstancias, el presente trabajo de investigación propone una nueva estrategia de solución a GDMP a través de un mecanismo automático que permita eventualmente lograr el consenso. El mecanismo propuesto considera el uso de intervalos tanto para la definición de las relaciones de preferencia, como para el manejo de la incertidumbre existente en el problema. Adicionalmente, esta investigación aborda el Problema de Selección de Viajes (PSV), una variante minimalista del Problema de Optimización de Carteras de Proyectos poco estudiado en el área de GDM. Finalmente, una característica distintiva de la propuesta es el uso de la regresión a la media como técnica de consenso.

En resumen, el objetivo principal de la investigación es el desarrollo de un modelo que permita automatizar el consenso durante el proceso de toma de decisiones grupales en el caso de estudio concerniente a el PSV.

Tabla 1. Trabajos del estado de arte

Autor	A	B	C	D	E	F	G
Soung-Hie et al., 1997	No	Difuso	Si	1, 2	No	No	No
Herrera-Viedma, et al. 2007	Si	Difuso	Si	3	Si	No	Si
Alonso, et al. 2010	Si	Difuso, lingüístico,	Si	3	Si	No	Si
Tapia García et al. 2012	Si	Difuso, lingüístico	Si	4	Si	Si	Si
Singh & Benyoucef (2013)	Si	Difuso	Si	4	Si	No	Si
Herrera-Viedma et al. (2002)	Si	Múltiples tipos	No	4	Si	No	Si
Mata et al. (2009)	Si	Lingüístico Multigranular	No	4	Si	No	Si
Mata F. (2006)	Si	Lingüístico Multigranular	Si	4	Si	No	Si
This work	Si	Difuso	Si	5	Si	Si	Si

El resto de este manuscrito se organiza de la siguiente manera. La Sección 2 describe los principales conceptos relacionados con la investigación. La Sección 3 presenta la propuesta como modelo de automatización de consenso para abordar el GDMP. que el objetivo de la investigación es el desarrollo de un modelo de automatización para el consenso. La Sección 4 resume el experimento y los resultados obtenidos. La Sección 5 muestra las conclusiones.

2. MARCO TEÓRICO EL PROBLEMA DE SELECCIÓN DE VIAJES CON UN ENFOQUE DE INTERVALOS

2.1 El problema de selección de viajes con un enfoque de intervalos

El Problema de Selección de Viajes (PSV) es una variante del Problema de Selección de Cartera de Proyectos. Este problema se puede entender como un grupo de personas (familia, empresarios, amigos, etc.) que desean escoger un conjunto de destinos. Sin embargo, dado que los recursos disponibles son limitados, se desea encontrar una colección de destinos que satisfaga al grupo de manera consensuada.

La evaluación de un conjunto de destinos seleccionados será mediante los atributos particulares del PSV que son: número de destinos (di), el número de atracciones total (ai), la calificación del lugar (ci), y la duración en días de la estancia (ei). La selección de los destinos no deberá exceder el presupuesto

establecido (P), considerando que cada destino tiene un precio(pi). Formalmente PSV se define en la Ecuación 1.

$$Z = \text{Max } di(S), ai(S), ci(S), ei(S)$$

Sujeto a: (1)

$$pi(S) \leq P$$

La solución del problema será dada por el vector $S = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ donde $x_i=1$ indica que el destino i fue seleccionado, y $x_i=0$ que no.

En general PSV busca viajar a la mayor cantidad de destinos posible maximizando el número de atracciones a las que se tendrá acceso, con la mejor calificación posible por los usuarios, y pasando el mayor número de días en ellos. Considerando que es un grupo de personas involucrado en la solución de PSV, entonces se puede decir que éste representa un caso particular de GDMP, cuya solución se puede dar a través del modelo de automatización propuesto en la sección 5. Dato que la propuesta de integración requiere el manejo de intervalos, la siguiente sección resume los conceptos más relevantes al respecto.

2.2 Matemática de intervalos

Un número representado como intervalo es un concepto de los números reales del sistema numérico común. Balderas et al. (2019) menciona a que un número de intervalo se describe en términos de rango $E = [\underline{E}, \overline{E}]$, donde $\underline{E}$ representa el límite inferior y $\overline{E}$ representa el límite superior del número de intervalo. Una representación gráfica de número de intervalo se puede ver en la figura 1, la cual muestra un intervalo donde el límite inferior es $\underline{E} = 55$ y el límite superior es $\overline{E} = 65$ sobre una recta, donde la recta representa el sistema de números reales.



Figura 1. Representación de E

Para operaciones básicas con intervalos consideremos dos números de intervalo $D = [\underline{D}, \overline{D}]$ Y $E = [\underline{E}, \overline{E}]$, entonces las operaciones aritméticas básicas se pueden definir para estos como:

$$D + E = [\underline{D} + \underline{E}, \overline{D} + \overline{E}], \quad (2)$$

$$D - E = [\underline{D} - \overline{E}, \overline{D} - \underline{E}], \quad (3)$$

$$D \cdot E = [\min\{\underline{D} \cdot \underline{E}, \underline{D} \cdot \overline{E}, \overline{D} \cdot \underline{E}, \overline{D} \cdot \overline{E}\}, \max\{\underline{D} \cdot \underline{E}, \underline{D} \cdot \overline{E}, \overline{D} \cdot \underline{E}, \overline{D} \cdot \overline{E}\}], \quad (4)$$

Si E es un número real:

$$D \cdot E = \underline{D} \cdot E, \overline{D} \cdot E \quad (5)$$

Balderas et al. (2019) y Yao et al. (2011) definen reglas de relación de orden sobre los números de intervalo. Estas reglas se

basan en $P(E \geq D)$ que es una medida de la posibilidad de que la relación de orden $E \geq D$ sea cierta. Es fácil probar que esta medida de posibilidad es equivalente a la Ecuación 6.

$$P(E \geq D) = \begin{cases} 1 & \text{si } P_{ED} \geq 1, \\ P_{ED} & \text{si } 0 \leq P_{ED} \leq 1, \\ 0 & \text{si } P_{ED} \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Donde } P_{ED} = \frac{\bar{E} - \underline{D}}{(\bar{E} - \underline{E}) + (\bar{D} - \underline{D})}$$

Cuando los intervalos $E = [\underline{E}, \bar{E}]$ y $D = [\underline{D}, \bar{D}]$ cumplen que $e = \underline{E} = \bar{E}$ y $d = \underline{D} = \bar{D}$ entonces el valor de $P(E \geq D)$ se calcula como en la Ecuación 7. En otras palabras, satisfacen la relación de orden establecida como si fueran no intervalos.

$$P(E \geq D) = \begin{cases} 1 & \text{si } e \geq d \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad (7)$$

De acuerdo a Balderas et al. (2019) y Fliedner y Liesio (2016), una *realización* es un número real e que cae en los límites de un intervalo $E = [\underline{E}, \bar{E}]$. Tomando en consideración lo anterior, Balderas et al. (2019) menciona que se define como grado de credibilidad α a la medida de posibilidad $P(E \geq D)$ mínima que se debe satisfacer para considerar que un intervalo E es mayor o igual que otro intervalo D . Alternativamente, está el grado de credibilidad representa la posibilidad de que dadas dos realizaciones e y d de dos intervalos distintos E y D , la primera realización sea mayor o igual que la segunda.

Análogamente, a partir de $P(E \geq D) = \alpha$, se puede definir su negación que es la posibilidad de que el intervalo D sea mayor o igual al intervalo E de acuerdo a la Ecuación 8.

$$P(E \geq D) = \alpha \Rightarrow P(D \geq E) = 1 - \alpha \quad (8)$$

La relación de igualdad entre dos intervalos existe solamente cuando ambos intervalos coinciden tanto en límite superior como límite inferior. Finalmente, la combinación de la Ecuación 9 con la relación de igualdad permiten definir la relación de orden *mayor que* entre intervalos, quedando como resultado la Ecuación 8. Con esto termina la definición del conjunto básico de relaciones de orden entre intervalos (que son $>$, $<$, $=$, $\geq$, $\leq$).

$$E > D \Leftrightarrow P(E \geq D) > 0.5 \quad (9)$$

Por último, la Tabla 2 muestra ejemplos de comparaciones de intervalos de acuerdo a diferentes relaciones de orden.

Tabla 2. Comparación de relaciones de orden entre intervalos

E	D	Operación	Resultado	P_{ED}
[0,5]	[0,5]	=	True	0.5
[5,10]	[15,20]	<	True	0
[5,15]	[5,10]	>	True	0.66
[5,15]	[10,20]	$\leq$	True	0.25
[20,30]	[15,25]	$\geq$	True	0.75

3. EL MODELO DE AUTOMATIZACIÓN DEL CONSENSO

Esta sección presenta el nuevo modelo propuesto para automatizar el proceso de consenso que ocurre en GDMP. El modelo evita la necesidad de contar con un moderador, y aproxima el consenso siguiendo una estrategia de regresión a la media.

El desarrollo del modelo considera como caso de estudio al PSV descrito en la Sección 2.1. El modelo propuesto define las siguientes tres etapas: 1) etapa de obtención automática de la solución para el consenso; 2) etapa de evaluación del nivel de satisfacción consensual sobre la solución elegida; 3) etapa de retroalimentación del sistema mediante ajuste de parámetros preferenciales para un mejor consenso. La Figura 2 muestra la arquitectura de implementación del modelo propuesto. En esta figura se observa la relación entre el PSV y el modelo de automatización propuesto, donde PSV es el caso de estudio en la propuesta.

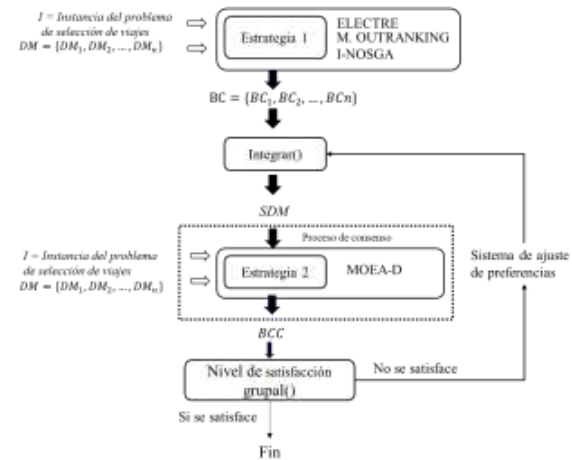


Figura 2. Arquitectura de implementación del modelo de automatización para el consenso.

Cada una de las etapas del modelo propuesto son detalladas en el resto de esta sección.

3.1 Etapa 1: obtención automática de la solución

La etapa de obtención automática de una solución consensuada consiste en utilizar metaheurísticas que permitan construir una solución a PSV, a partir de la información preferencial actual de los DMs involucrados. Esta etapa consta de 3 pasos reflejados en la arquitectura de la Figura 2 en los procesos denominados *Estrategia 1*, *Integrar*, y *Estrategia 2*.

La *Estrategia 1* tiene como objetivo obtener el mejor compromiso (o BC por el vocablo inglés *Best Compromise*) para cada DM. El BC será la solución a PSV que satisfaga las preferencias del decisor. El modelo plantea el uso de I-NOSGA como estrategia de búsqueda de dicha solución, apoyándose en

las relaciones de superación definidas por ELECTRE III para ajustarla a las preferencias de un DM en concreto. La entrada requerida es la instancia de PSV, y la información preferencial de cada DM. La salida será un BC por DM.

El paso *Integrar* tiene como objetivo integrar las preferencias en un moderador simulado denominado, el cual será el encargado de supervisar el consenso. Actualmente dicha integración se realiza simplemente mediante la unión de todos y cada uno de los BCs de los DM como parte de la instancia del PSV, dicha integración se refiere como *SDM* (o *Supra Decision Maker*).

Finalmente, la Estrategia 2 plantea realizar el proceso de consenso, para ello se propone usar el Problema de Optimización Subrogado de PSV (POSPSV) que considera dos objetivos maximizar el número de decisores satisfechos y de minimizar el número de decisores insatisfechos a partir de la instancia de PSV y un SDM asociado. Con lo anterior se define el mejor compromiso consensual (BCC, *Best Consensual Compromise*), que son las soluciones en el frente óptimo de Pareto del POSPSV. La Estrategia 2 indica el uso de MOEA/D como algoritmo de optimización para la obtención del BCC. La entrada en de la Estrategia 2 es la instancia redefinida en el paso *Integrar*, y la salida será el BCC. Para este trabajo en particular se considera un orden léxicográfico en los objetivos, considerando como mejor la maximización de los satisfechos.

Con lo descrito anteriormente se puede observar que la solución consensual se puede obtener automáticamente mediante la implementación de los 3 pasos, como se sugiere en este documento. En la siguiente Etapa del modelo de automatización se plantea el seguimiento cuando el consenso no es adecuado.

3.2 Etapa 2: Evaluación del Nivel de Satisfacción Consensual

Una vez que el BCC se ha identificado, el siguiente paso es verificar que se alcance el nivel de satisfacción mínimo estipulado por el grupo de DMs. La arquitectura lo implementa en el proceso *Nivel Satisfacción Grupal*. Para ello, se hace uso de un indicador de satisfacción medible que determine si una solución satisface o no a un grupo de personas. Este trabajo propone el uso de la regla definida en la Ecuación 10 como el umbral de satisfacción que cubre este propósito.

$$DM_{SAT} > DM_{DIS} \text{ y } DM_{SAT} > DM_{S}/2 \text{ y } DM_{DIS} \leq 20 \% DM_{S} \quad (10)$$

donde DM_{SAT} representa el número de DMs satisfechos, DM_{DIS} es la cantidad de DMs insatisfechos, y DM_{S} es el total de tomadores de decisiones. Cada vez que el umbral de satisfacción no es alcanzado, el modelo de automatización entrará en una etapa de ajuste de preferencias hasta llegar a un consenso; esto se detalla mejor en la siguiente sección.

3.3 Etapa 3: Retroalimentación del Sistema

Esta etapa aplica un mecanismo de ajuste de preferencias cuando el umbral de satisfacción deseado para el consenso no es alcanzado. Se implementa en el proceso *Sistema de Ajuste de Preferencias* dentro de la arquitectura propuesta.

Dado que los parámetros, dentro del sistema preferencial de cada DM, son expresados mediante intervalos $E = [\underline{E}, \bar{E}]$, se propone como mecanismo de ajuste basado en la regresión hacia la media. La estrategia se resume a continuación.

Primero, se obtiene $Avg(U_i)$ que es el promedio de cada parámetro preferencial i obtenido de entre los DMs. Segundo, se actualiza el valor de U_{ij} correspondiente a cada parámetro preferencial i de cada DM j usando las siguiente reglas: 1) si $U_i \geq U_{ij}$ entonces aumenta en 1% el valor de U_{ij} ; 2) si $U_i \leq U_{ij}$ entonces disminuir en 1% el valor de U_{ij} ; y, 3) si $U_i = U_{ij}$ entonces modificar U_{ij} aumentando en 1% el límite superior y disminuyendo en 1% el límite inferior.

Lo anterior simbolizan reflexiones de los decisores en favor de un consenso, eventualmente se alcanzará ya que a través de las reglas en algún punto los intervalos se interconectarán. Una vez realizado el ajuste, se busca nuevamente el BCC con el objetivo de corroborar que las nuevas preferencias permiten mejorar el nivel de satisfacción.

4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

4.1 Diseño Experimental

El modelo de automatización propuesto se validó resolviendo 30 instancias del PSV. Las instancias se componen por un presupuesto máximo, un número de objetivos, un número de decisores en el grupo, un número de destinos, y la información respectiva de cada destino incluyendo (precio, número de atracciones, calificación del destino, y estancia en días). El número de destinos fue 100, el número de objetivos fue 4, y el número de decisores considerados fue de 5. Los valores del resto de los parámetros de cada instancia fueron generados aleatoriamente en los rangos [0, 10000] para el presupuesto, [1, 9] para el número de atracciones, [0, 99] para la calificación y [1, 9] para el número de días en la estancia.

La información preferencial de los DMs se caracterizó por el conjunto de parámetros $\{W, V, \beta, \gamma, \lambda\}$ que representan los pesos de los atributos, los vetos, y los umbrales de credibilidad, mayoría, y de recursos, contemplados en el modelo de superación basado en ELECTRE III. Los DMs fueron simulados, contemplado fijos los umbrales en $\beta = \{[0.51, 0.67], [0.51, 0.67], [0.51, 0.67], [0.51, 0.67], [0.51, 0.67]\}$, $\gamma = [0.51, 0.67]$, $\lambda = [0.51, 0.67]$, variando aleatoriamente los pesos en el rango [0,1] considerando la suma de los mismos menor a 1 en los límite inferiores y mayor a 1 en los superiores, y variando aleatoriamente los vetos en los extremos mínimo y máximo obtenidos por el acumulado de los destinos.

La experimentación con I-NOSGA consideró como parámetros el uso de 30 repeticiones por instancia, cada repetición constó de 10000 evaluaciones. Los operadores genéticos fueron selección por torneo, cruce simple en un punto, y mutación simple, utilizando 0.02 como probabilidad de muta. El tamaño de la

población empleado fue de 100. Se reporta un tiempo de 1 minuto con 13 segundos por repetición por instancia.

La experimentación con MOEA/D también consideró 30 repeticiones por instancia, cada repetición constó de 1000 evaluaciones. Se empleó selección aleatoria y como operadores genéticos cruza simple en un punto, y mutación simple, utilizando 0.02 como probabilidad de muta. El tamaño de la población empleado fue de 100. Se reporta un tiempo de 10 minutos con 35 segundos por repetición por instancia.

La instancia empleada por MOEA/D integra los BC para resolver POSPSV.

4.2 Resultados

En la Tabla 5, se da a conocer el número de DMs satisfechos y DMs insatisfechos para la mejor solución de cada instancia. A cada solución se le aplicó la métrica del umbral de satisfacción y se muestra si satisface o no satisface el nivel de satisfacción impuesto por la métrica.

Tabla 5. Resultados para el primer experimento

Instancia	DMs-SAT	DMs-InSAT	SATISFACE
i01	5	0	Si
i02	5	0	Si
i03	5	0	Si
i04	5	0	Si
i05	5	0	Si
i06	5	0	Si
i07	5	0	Si
i08	5	0	Si
i09	5	0	Si
i10	5	0	Si
i11	5	0	Si
i12	5	0	Si
i13	5	0	Si
i14	5	0	Si
i15	5	0	Si
i16	5	0	Si
i17	5	0	Si
i18	5	0	Si
i19	5	0	Si
i20	5	0	Si

i21	5	0	Si
i22	5	0	Si
i23	5	0	Si
i24	5	0	Si
i25	5	0	Si
i26	5	0	Si
i27	5	0	Si
i28	5	0	Si
i29	5	0	Si
i30	5	0	Si

En los resultados mostrados en la Tabla 5, se puede observar que, de acuerdo a la métrica de satisfacción, la mejor solución compromiso para cada instancia si satisface el nivel de satisfacción necesario para que haya un consenso entre todos los DMs, por lo que no fue necesario el apoyo del mecanismo de ajuste de parámetros y esto no ayuda a probar que el modelo realmente funcione. A partir de estos resultados se puede concluir que se requiere diseñar otro experimento con instancias más difíciles de resolver, con el propósito de encontrar soluciones que no puedan satisfacer la métrica de satisfacción, con el fin de que el mecanismo de ajuste pueda apoyar realizando ajustes en las preferencias de los DMs y el proceso de consenso se realice nuevamente o las veces necesarias hasta que el modelo pueda ser capaz de resolver el problema.

5. CONCLUSIONES

El modelo de automatización puede tener diferentes posibles alcances en su aplicación. Por ejemplo, los principales que se deben lograr, son la solución al Problema de Selección de Viajes (o PSV), así como principalmente el lograr automatizar el consenso, con automatizar se refiere que cuando una solución no cumple con el nivel de satisfacción requerido el programa termina (sin el modelo de automatización), esto requiere que se una persona intervenga para realizar ajustes en las preferencias y tenga que ejecutar el programa nuevamente. Con el modelo se busca realizar este paso automáticamente sin que alguna persona intervenga, logrando así la automatización.

Para lograr resolver el problema el modelo se apoya de técnicas como el Modelo Electre III, un Modelo de Superación y los algoritmos I-NOSGA y MOEA-D y con el sistema de ajuste de preferencias y la métrica del umbral de satisfacción.

En el estado del arte ya existen múltiples modelos de consenso, pero es importante mencionar que lo que diferencia a la presente propuesta es que hasta ahora no se tiene un modelo de automatización aplicado al problema de cartera de proyectos bajo un enfoque de intervalos. Por lo tanto, los aportes más importantes que se puede observar son: 1) Nuevo modelo de automatización para el proceso de Consenso en la toma de

decisiones grupales; 2) Una nueva métrica para medir el nivel de satisfacción grupal. 3) Un mecanismo de ajuste de preferencias para el enfoque de intervalos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de proyectos CONACYT 3085 Cátedras CONACyT 2014 y A1-S11012 Ciencia Básica 2017-2018. También agradecer el apoyo del Laboratorio Nacional de Tecnología de Información (LaNTI) del TecNM/Campus ITCM.

REFERENCIAS

- Alonso, S., Herrera-Viedma, E., Chiclana, F., & Herrera, F. (2010). A web based consensus support system for group decision making problems and incomplete preferences. *Information Sciences*, 180(23), 4477–4495. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2010.08.005>
- Balderas, F., Fernandez, E., Gomez-Santillan, C., Rangel-Valdez, N., & Cruz, L. (2019). An Interval-Based Approach for Evolutionary Multi-Objective Optimization of Project Portfolios. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 18(04), 1317–1358. <https://doi.org/10.1142/S021962201950024X>
- Flidner, T., & Liesiö, J. (2016). Adjustable robustness for multi-attribute project portfolio selection. *European Journal of Operational Research*, 252(3), 931–946. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.01.058>
- Herrera-Viedma, E., Alonso, S., Chiclana, F., & Herrera, F. (2007). A Consensus Model for Group Decision Making With Incomplete Fuzzy Preference Relations. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15(5), 863–877. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2006.889952>
- Herrera-Viedma, E., Herrera, F., & Chiclana, F. (2002). A consensus model for multiperson decision making with different preference structures. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 32(3), 394–402. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2002.802821>
- Mata, F. (2006). Modelos para sistemas de apoyo al consenso en problemas de toma de decisión en grupo definidos en contextos lingüísticos multigranulares. *Universidad de Jaén, Doctoral Thesis Jaén*.
- Mata, F., Martínez, L., & Herrera-Viedma, E. (2009). An Adaptive Consensus Support Model for Group Decision-Making Problems in a Multigranular Fuzzy Linguistic Context. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 17(2), 279–290. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2009.2013457>
- Mata, F., Martínez, L., Martínez, J. C., & Herrera-Viedma, E. (2008). An adaptive consensus support system for gdm problems with heterogeneous information. En *Computational Intelligence in Decision and Control: Vol. Volume 1* (pp. 835–840). WORLD SCIENTIFIC. https://doi.org/10.1142/9789812799470_0137
- Singh, R. K., & Benyoucef, L. (2013). A consensus based group decision making methodology for strategic selection problems of supply chain coordination. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(1), 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.03.013>
- Soung-Hie Kim & Byeong-Seok Ahn. (1997). Group decision making procedure considering preference strength under incomplete information. *Computers & Operations Research*, 24(12), 1101–1112. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(97)00037-3)
- Tapia García, J. M., Tapia García, C., Martínez, M. Á., Amor Pulido, R., & Moral Ávila, M. J. D. (2012). Un modelo de consenso para problemas de toma de decisiones multicriterio en grupo mediante relaciones de preferencia intervalares difusas lingüísticas. *Revista de métodos cuantitativos para la economía y la empresa*, 14, 36–53.
- Yao, S., Jiang, Z., Li, N., Zhang, H., & Geng, N. (2011). A multi-objective dynamic scheduling approach using multiple attribute decision making in semiconductor manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 130(1), 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.12.014>

Interfaz de Composición de Consultas a Bases de Datos que Permita Incluir Funciones de Agregación Combinadas con Subconsultas

Rodolfo A. Pazos R.*, José A. Martínez F.**,
Saúl Mata A.***

Instituto Tecnológico de Cd. Madero, Tecnológico Nacional de México, Cd. Madero, México

* *r_pazos_r@yahoo.com.mx*

** *jose.mtz@gmail.com*

*** *zaul94@gmail.com*

Resumen: Hoy en día las bases de datos tienen una gran importancia en prácticamente todos los niveles empresariales, debido a que garantizan la seguridad y fiabilidad de la información. Esta información es valiosa, dado que sirve como apoyo a la toma de decisiones. La información almacenada puede ser accedida y manipulada únicamente por usuarios expertos en algún lenguaje de consulta. Debido a esto, se ha propuesto usar el lenguaje natural como medio de consulta, de esta forma, usuarios inexpertos pueden acceder también a estos datos sin dominar un lenguaje de consulta. Por esta razón, surgieron las interfaces de lenguaje natural a bases de datos (ILNBs); sin embargo, estas interfaces tienen un porcentaje de consultas correctamente contestadas de 90% aproximadamente, el cual es inadecuado para aplicaciones empresariales. A continuación, se presenta una herramienta que permite a usuarios casuales construir consultas complejas sin tener conocimiento conceptual sobre bases de datos ni algún lenguaje de consulta.

Palabras clave: Interfaz, composición, consultas, bases de datos, funciones de agregación, subconsultas.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, las bases de datos son ampliamente utilizadas en todos los niveles empresariales y organizacionales. Esto se debe principalmente a que la información almacenada en ellas es considerada un recurso valioso, y las aplicaciones de bases de datos garantizan la seguridad de esta información.

Sin embargo, son los usuarios expertos en algún lenguaje de consulta quienes se encargan de acceder a los datos y manipularlos. Con la intención de facilitar el acceso a las bases de datos y explotar aún más la información contenida en ellas, se ha planteado utilizar el lenguaje natural (LN) como medio de consulta. Esto permite a usuarios inexpertos obtener información que sólo podría ser accedida mediante un lenguaje de consulta.

Una interfaz de composición de consultas (ICC) es una herramienta que permite a usuarios casuales ingresar una consulta en LN y obtener fácilmente la traducción a SQL de dicha consulta. Para realizar dicha tarea, la ICC recibe como entrada una consulta en LN y, por medio de componentes gráficos, guía al usuario por el proceso de composición. Una vez que el usuario concluye la composición de la consulta, la interfaz muestra al usuario la traducción a SQL de la consulta, así como el resultado obtenido desde la base de datos.

Este trabajo tiene como objetivo añadir una nueva funcionalidad a una ICC. Dicha funcionalidad debe permitir a los usuarios componer consultas que incluyan funciones de agregación combinadas con subconsultas. De esta forma se busca ampliar el rango de consultas en lenguaje natural que pueden ser respondidas correctamente.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Como se mencionó en la Sección 1, una ICC permite a usuarios componer consultas complejas de una manera relativamente sencilla.

Existe una variedad de interfaces que han demostrado ser útiles para dicha tarea y que hacen uso de diferentes métodos de composición. También se pueden destacar otras diferencias entre cada una de ellas como la complejidad de las consultas que permiten componer o el nivel de dominio de SQL que un usuario debe tener para usar la interfaz. Algunas de las interfaces para composición de consultas se describen en [Little, 2004], [Hallet, 2007] y [ActiveDBSoft, 2018].

La Tabla 1 muestra una comparación de las características de algunas interfaces de composición y la interfaz propuesta en este trabajo. Las características por comparar son el método de composición usado por la interfaz, la posibilidad de construir subconsultas, y si permite o no usar funciones de agregación (FA). Además, se comparan en base al nivel de dominio, tanto conceptual como de un lenguaje de consulta, que debe tener un usuario para ser capaz de componer consultas correctamente.

Como se observa en la Tabla 1, las interfaces ofrecen diferentes métodos de composición. Otra de las diferencias se observa en el manejo de subconsultas y de funciones de agregación. Sin embargo, la principal diferencia entre la interfaz propuesta y el resto se encuentra en el nivel de dominio de conceptos referentes a bases de datos y un lenguaje de consulta. De este modo es posible que usuarios inexpertos logren componer consultas complejas de una manera sencilla.

Tabla 1. Comparación de interfaces de composición

Interfaz	Método de composición	Manejo de subconsultas	Manejo de funciones de agregación	Dominio conceptual de BDs	Dominio de lenguaje de consulta
Query Builder	LN, menús	No	Sí	Regular	Nada
Active Query Builder	Drag & drop	Sí	No	Regular	Poco
Microsoft Office Access	QBE, SQL	Sí	Sí	Mucho	Mucho
Conceptual Authoring Herramienta QBE	LN, menús	No	No	Nada	Nada
Interfaz Propuesta	QBE	Sí	Sí	Regular	Nada
	Árbol de composición	Sí	Sí	Nada	Nada

La interfaz presentada en este trabajo permite componer consultas a bases de datos complejas. La base de datos ATIS es un ejemplo de base de datos compleja según se menciona en [Castillo, 2016]. Cabe mencionar que en ningún momento la interfaz muestra al usuario el esquema de la base de datos; por lo tanto, es probable que el usuario solicite información que no se encuentra almacenada en la base de datos y, en consecuencia, no obtenga una respuesta o, si la obtiene, no sea la respuesta esperada.

3. DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ DE COMPOSICIÓN

La interfaz propuesta tiene como propósito permitir a usuarios casuales componer consultas que involucran subconsultas y funciones de agregación. Para lograrlo, la interfaz guía al usuario por el proceso de composición, el cual consta de 3 fases principales: *Selección del tema de interés*, *Selección del elemento de interés* y *Especificación de condiciones de búsqueda*. Durante cada una de estas fases, la interfaz presenta al usuario componentes gráficos que le ayudan a proveer a la interfaz la información requerida para la construcción de una consulta. Tal información se refiere a las tablas involucradas, las columnas involucradas y los valores de búsqueda que permitirán filtrar los resultados, así como la necesidad de aplicar o no funciones de agregación en algún momento del proceso de composición.

Es conveniente mencionar que, durante el proceso de composición, el usuario nunca ve los nombres de las tablas o de las columnas que constituyen la base de datos, sino que la interfaz le muestra descripciones de las tablas y de las columnas a fin de que el usuario tenga una mejor idea de la información que almacena la base de datos. En las siguientes subsecciones se describen algunas de las características más importantes de la interfaz de composición.

3.1 Árbol de composición

El árbol de composición propuesto inicialmente en [Aguirre, 2015] mantiene su relevancia en la interfaz de composición. Esta estructura permite representar gráficamente las tablas de la base de datos, así como las columnas que posee cada tabla. El árbol de composición tiene una estructura como la que se muestra en la Fig. 3.1.

- Tabla principal (descripción de la tabla en LN).
 - Columna 1 (descripción de la columna en LN).
 - Columna 2 (descripción de la columna en LN).
 - ...

Fig. 3.1. Estructura del árbol de composición

Como se observa en la Fig. 3.1, el árbol presenta como nodo raíz la descripción en lenguaje natural de la tabla seleccionada por el usuario. Además, muestra como nodos hijos la descripción de cada columna correspondiente a la tabla seleccionada previamente.

El árbol de composición es una parte fundamental de la interfaz, aunque se usa principalmente en la fase *Selección de elemento de interés*, también es utilizado en la fase *Especificación de condiciones de búsqueda*. Usar este método de composición le permite a la interfaz mostrar de manera clara los elementos (columnas) que tiene un tema (tabla).

3.2 Generación automática de subconsultas intermedias

La parte más importante del módulo de subconsultas es la generación automática de subconsultas. Este proceso ha permitido componer consultas que cuentan con hasta 4 subconsultas en SQL [Castillo, 2016]. La interfaz es lo suficientemente inteligente para generar automáticamente las subconsultas intermedias que conectan la subconsulta más interna con la consulta externa. De este modo, la interfaz muestra al usuario una traducción correcta a SQL de la consulta compuesta.

Algoritmo 3.1 Generación automática de subconsultas

```

1.  TablaConsExterna
2.  EsSubconsulta
3.  TablaSubconsulta
4.  If EsSubconsulta
5.      ObTablas = ObtenerTablas()
6.      ObRelaciones = ObtenerRelaciones()
7.      MaAdy[i][j] = 0 para i = 1, ..., |ObTablas| j = 1, ..., |ObTablas|
8.      For i = 0 to ObRelaciones
9.          RelacionesTablas = ObRelaciones.get(i)
10.         MaAdy[RelacionTablas[0]][RelacionTablas[1]] = 1
11.         MaAdy[RelacionTablas[1]][RelacionTablas[0]] = 1
12.      EndFor
13.  GenerarAlgBFS(MaAdy, TablaConsExterna)
14.  RutaSubconsultas = GenerarCamino(TablaSubconsulta)
15.  If RutaSubconsultas ≥ 3
16.      CrearConsultasInternas(RutaSubconsultas, TablaConsExterna, TablaSubconsulta)
17.  EndIf
18.  EndIf

```

El algoritmo 3.1 construye una matriz de adyacencia, donde cada nodo de dicha matriz representa cada tabla existente en la base de datos y su relación con alguna otra tabla. Posteriormente, se ejecuta un algoritmo de búsqueda en anchura (BFS) para obtener las tablas intermedias entre la tabla de la subconsulta más interna y la tabla de la consulta externa. En caso de obtener dos o más tablas, se ejecutará un método que usa las llaves primarias y foráneas correspondientes a las tablas para construir las subconsultas necesarias.

Es importante mencionar que la interfaz obtiene la información de tablas, columnas y relaciones con ayuda de un diccionario de información semántica (DIS). El DIS es especialmente necesario en el módulo de subconsultas, puesto

que, gracias a él, la interfaz identifica las relaciones que unen entre sí a las tablas, y es de este modo que se generan automáticamente las subconsultas faltantes.

3.3 Generación de consultas con FA

El módulo de funciones de agregación incorpora una funcionalidad importante para la interfaz, la cual le permite al usuario componer consultas con un mayor nivel de complejidad. Durante el proceso de composición, la interfaz adapta sus componentes gráficos acorde al tipo de consulta que busca componer el usuario. Cuando se presenta la necesidad de aplicar una función de agregación, la interfaz presenta al usuario los controles necesarios para la correcta aplicación de la función de agregación deseada.

El algoritmo 3.2 muestra el pseudocódigo para la construcción de consultas con funciones de agregación. De la línea 1 a la 4, el algoritmo obtiene los datos que el usuario ha generado durante el proceso de composición y que le permiten identificar el nombre de la tabla, el nombre de la columna y la función de agregación seleccionada.

Posteriormente, se identifica si el fragmento que se compone es una subconsulta; de ser así, se llama a la función *construirConsultaFA* que recibe como entrada el nombre de la tabla, la columna y la FA (línea 6). En caso contrario, es decir, si el fragmento que se compone es la consulta externa, se llama a la misma función, pero se agrega a la entrada el fragmento de consulta correspondiente a la consulta externa (línea 10).

Algoritmo 3.2 Generación de consultas con FA

```

1. datosFA = obtenerDatosFA()
2. nombreTab = datosFA[0]
3. nombreCol = datosFA[2]
4. nombreFA = datosFA[4]
5. If esSubconsulta
6.   consultaFA=construirConsultaFA(nombreTab, nombreCol, nombreFA)
7. EndIf
8. Else
9.   fragmentos = consulta.split("IN")
10.  consultaFA = construirConsultaFA(fragmentos[0], nombreTab, nombreCol, nombreFA)
11.  For i = 1 to fragmentos
12.    consultaFA += fragmentos[i]
13.  EndFor
14. EndElse

```

3.4 Proceso de composición de consultas

El proceso de composición por el cual la interfaz guía al usuario consta principalmente de 3 fases, como se menciona en la Sección 3. Pero incluye además las fases *Descomposición en subconsultas*, *Resultado de la subconsulta*, *Especificación de condiciones para la subconsulta y Vista previa y resultado*.

En la fase *Descomposición en subconsultas*, el usuario debe fragmentar la consulta principal en LN. Para tal efecto, es necesario identificar los elementos que solicitan información, lo cual permite obtener los niveles de subconsulta en los que se descompone la consulta completa.

Considere la siguiente consulta en lenguaje natural:

¿Qué tipo de avión tiene el vuelo 301?

En esta consulta se identifica como condición de búsqueda que *el vuelo sea el 301*. Así mismo el elemento que solicita información es *¿Qué tipo de avión tiene el vuelo*. La Fig. 3.2 ilustra la descomposición en subconsultas.

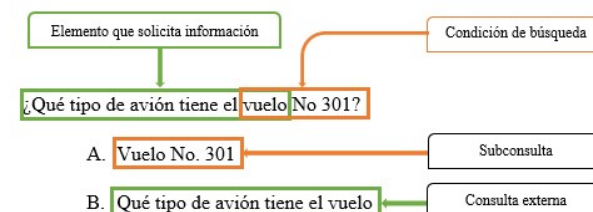


Fig. 3.2. Descomposición en subconsultas

En la fase *Selección del tema de interés*, la interfaz muestra al usuario la lista de temas de los cuales se debe seleccionar aquél del que se desea obtener información. En la *Especificación de condiciones de búsqueda*, la interfaz presenta al usuario el árbol de composición mencionado en la Subsección 3.1. El usuario debe seleccionar uno de los temas desplegados como hijos en el árbol y posteriormente seleccionar la condición que requiera aplicar.

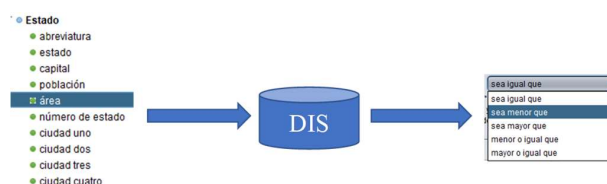


Fig. 3.3. Operadores de búsqueda

La Fig. 3.3 muestra un ejemplo del árbol de composición en esta fase, en el cual el usuario selecciona un elemento, y la interfaz le muestra en una lista desplegable las posibles condiciones a aplicar al elemento seleccionado. La interfaz, con ayuda del DIS, muestra al usuario sólo las condiciones aplicables al tipo de dato del elemento que fue seleccionado previamente.

En la fase *Selección de elemento de interés*, la interfaz muestra al usuario el árbol de composición. En caso de que el fragmento que se compone incluya una función de agregación, la interfaz mostrará una lista desplegable de la cual el usuario seleccionará la opción que corresponda con la FA deseada. Una vez que el usuario ha seleccionado la función de agregación, la interfaz genera un arreglo para almacenar los datos que le ayudarán a realizar la traducción de la consulta a SQL.

Arreglo selección de elementos con funciones de agregación					
Información del arreglo					
Descripción de tabla	Nombre de tabla	Descripción de columna	Nombre de columna	Descripción FA	FA

Fig. 3.4. Arreglo consulta con FA

La Fig. 3.4 muestra la estructura del arreglo donde se almacena la información de la consulta, el cual contiene la descripción en lenguaje natural de la tabla, el nombre de la tabla, la descripción en lenguaje natural de la columna, el nombre de la columna, la descripción de la FA y la función de agregación. La información del arreglo será posteriormente procesada para realizar la construcción de la consulta.

4. EJEMPLO DE COMPOSICIÓN

El módulo de subconsultas permite a la interfaz tratar con consultas que incluyen funciones de agregación combinadas con subconsultas. Los tipos de consultas que se consideran por la interfaz son los siguientes:

- Consultas con FA en la subconsulta más interna.
- Consultas con FA en la subconsulta más interna y que involucran sólo una tabla.
- Consultas con FA en la consulta externa.

Para ejemplificar el proceso de composición de una consulta, considérese la siguiente consulta que involucra funciones de agregación y subconsultas:

¿Cuál aerolínea tiene el vuelo con la tarifa de viaje sencillo más costosa?

El primer paso por realizar es la descomposición en subconsultas. Como se mencionó en la Sección 3, el usuario debe identificar las condiciones de búsqueda y los elementos que solicitan información. Una vez que se realiza la descomposición, los fragmentos de consulta a componer quedan de la siguiente manera:

Subconsulta: *tarifa de viaje sencillo más costosa.*

Subconsulta: *vuelo con la tarifa.*

Consulta externa: *Cuál aerolínea tiene el vuelo.*

Ahora, la interfaz guía al usuario para realizar la composición desde la subconsulta más interna hacia la externa. De esta forma, el usuario puede ver los resultados de los fragmentos de consulta y comprobar que el resultado coincide con la información que desea obtener. Entonces, la primera subconsulta en componerse es *tarifa de viaje sencillo más costosa*. El usuario debe seleccionar el tema *tarifa* (que hace referencia a la tabla *fare*), después debe seleccionar el elemento *tarifa de viaje sencillo* (que hace referencia a la columna *one_way_cost*). Si el usuario quiere obtener la tarifa más costosa, entonces debe aplicar la función de agregación *MAX* al elemento *tarifa de viaje sencillo*. De este modo, la interfaz genera el resultado y la traducción a SQL de la primera subconsulta.

La siguiente subconsulta por componer es *vuelo con la tarifa*. El usuario debe seleccionar el tema *vuelo*, el cual hace referencia a la tabla *flight*, y posteriormente la interfaz encuentra las columnas que relacionan la tabla *flight* y la tabla *tarifa*. Entonces, la interfaz obtiene y muestra al usuario el resultado de la subconsulta.

Por último, el usuario debe componer la consulta externa *Cuál aerolínea tiene el vuelo*. Para tal efecto, el usuario selecciona el tema *Aerolínea*, el cual hace referencia a la tabla *airport*, y después selecciona el elemento que contiene la información que desea conocer, en este caso es el elemento *nombre de aeropuerto*, el cual hace referencia a la columna *airport_name*. Una vez que el usuario selecciona el elemento de interés, la interfaz obtiene el resultado y traducción a SQL de la consulta original, y de esta forma se da por terminado el proceso de composición.

5. EXPERIMENTACIÓN

Se realizaron pruebas a la interfaz para evaluar su funcionamiento en la composición de consultas de los tipos mencionados en la Sección 4. Para realizar las pruebas se usó un corpus de pruebas compuesto por 20 consultas que corresponden a las bases de datos Geobase y ATIS.

La base de datos Geobase almacena información geográfica de los Estados Unidos de América y es ampliamente utilizada como BD de prueba para ILNBDs. La base de datos ATIS almacena información sobre vuelos, consta de 28 tablas y 125 columnas. La complejidad de esta base de datos es mayor en comparación con Geobase y con otras bases de datos que también se utilizan en la literatura para hacer pruebas.

5.1 Pruebas funcionales

Las pruebas funcionales evalúan que la interfaz permita componer correctamente consultas que involucren funciones de agregación y subconsultas. Para llevar a cabo las pruebas, se seleccionaron consultas del corpus de prueba y se realizó la composición de las consultas por medio de la interfaz.

Considérese la siguiente consulta en LN:

¿Cuál es la longitud promedio de los ríos del estado de Texas?

Para realizar la composición, el usuario debe descomponer en subconsultas la consulta original. El resultado de la descomposición es el siguiente:

Subconsulta: *Estado de Texas*

Consulta externa: *Cuál es la longitud de los ríos del estado*

El usuario debe componer primero la subconsulta *Estado de Texas*. Para tal efecto, debe seleccionar el tema *Estado*, enseguida debe seleccionar el elemento *nombre de estado* y especificar como condición de búsqueda que el *nombre del estado sea Texas*. Después, la interfaz obtiene el resultado de la subconsulta y la muestra al usuario.

Ahora se debe componer la consulta externa *Cuál es la longitud de los ríos del estado*. Para lograrlo, el usuario selecciona el tema *Río* y posteriormente seleccionará el elemento *longitud*. Como el fragmento que se compone requiere aplicar una función de agregación para obtener *la longitud promedio de los ríos*, el usuario debe seleccionar la opción correspondiente a la función promedio (AVG). Una vez que se selecciona la FA, la interfaz procesa la información obtenida sobre las tablas, columnas y funciones de agregación

involucradas para llevar a cabo la construcción de la expresión SQL correspondiente a la consulta en LN ingresada como entrada. De esta manera termina la composición de la consulta y se da por terminado el proceso de composición.

Durante las pruebas funcionales, se evaluó la interfaz de composición con cada una de las 20 consultas que conforman el corpus de prueba, obteniendo para cada una de ellas, el resultado y la traducción a SQL esperada. .

6. CONCLUSIONES

Actualmente la información es uno de los recursos más valiosos con los que cuentan las empresas y organizaciones en todo el mundo. La información almacenada en bases de datos ofrece a las distintas organizaciones, sin importar su giro, una mayor certeza a la hora de la toma de decisiones.

Si bien es cierto que, para sacar provecho a los datos almacenados, es necesario contar con usuarios expertos que puedan acceder a dichos datos y manipularlos, también son cada vez más las alternativas que se presentan para acceder a la información contenida en bases de datos y hacer uso de ella. Sin embargo, la gran mayoría de las herramientas desarrolladas requieren que el usuario tenga algún tipo de conocimiento sobre bases de datos (como puede verse en la Sección 2), y por ende la información sigue fuera del alcance de usuarios casuales.

A manera de facilitar la composición de consultas para aquellos usuarios que no poseen conocimientos conceptuales ni prácticos en bases de datos se ha diseñado e implementado una interfaz de composición de consultas [Aguirre, 2015]. Esta interfaz permite componer consultas de manera gráfica y sencilla.

Para implementar la nueva funcionalidad fue necesario mantener el funcionamiento del módulo de subconsultas propuesto en [Castillo, 2016]. Dicho módulo guía al usuario a realizar el proceso de composición desde los niveles más internos de subconsultas hacia la consulta externa y, gracias a él, se han logrado componer consultas que involucran desde 1 hasta 3 subconsultas.

La nueva funcionalidad desarrollada en este proyecto permite al usuario componer consultas que incluyen funciones de agregación combinadas con subconsultas. Para lograrlo la interfaz muestra diferentes componentes gráficos en función de la necesidad de aplicar o no una función de agregación en alguna de las subconsultas o en la consulta externa. De tal forma que ahora es posible componer consultas con un mayor grado de complejidad, mientras que el dominio de SQL o algún lenguaje de consulta se mantiene fuera de los requisitos para usar la interfaz.

Las pruebas funcionales demostraron que el nuevo módulo para funciones de agregación funciona correctamente para componer consultas de los casos mencionados en la Sección 4. Al igual que las versiones anteriores de la ICC, esta versión mantiene la independencia de dominio.

AGRADECIMIENTOS

El alumno de maestría Saúl Mata Alvarado agradece la beca otorgada (becario No. 960692) por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México.

REFERENCIAS

ActiveDBSoft (2018). Disponible en: <https://www.activequerybuilder.com> (Accedido: 26 de febrero de 2021).

Aguirre, A.G. (2015). *Módulo para composición de consultas para una interfaz de lenguaje natural a bases de datos*. Tesis de maestría. Ciudad Madero, México. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

Castillo, G. (2016). *Interfaz de composición de consultas a bases de datos que permita incluir subconsultas*. Tesis de maestría. Ciudad Madero, México. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

Hallet, C., Scott, D., and Power, R. (2007). "Composing questions through conceptual authoring". *Computational Linguistics*. (vol 33, no.1) pp. 105-133.

Little, J., de Ga, M., Zwier, T., and Alhajj, R. (2004). "Query builder: a natural language interface for structured databases". *Computer Science*. vol. (3280), pp. 470-479.

Preparando la condensación del conocimiento arquitectónico en un ambiente ágil co-localizado

José Luis Robles Reyes*. Gilberto Borrego Soto**. Ramón René Palacio***

*Instituto Tecnológico de Sonora, Campus Náinari, Cd. Obregón, Sonora., C.P. 85130
MEX (e-mail: jose.robles99633@potros.itson.edu.mx).

**Instituto Tecnológico de Sonora, Campus Náinari, Cd. Obregón, Sonora., C.P. 85130
MEX (e-mail: gilberto.borrego@itson.edu.mx).

***Instituto Tecnológico de Sonora, Campus Sur, Navojoa, Sonora., C.P. 85860
MEX (e-mail: ramon.palacio@itson.edu.mx).

Resumen: Hoy en día el uso de metodologías ágiles va en aumento, y con ello, algunos problemas derivados de la naturaleza ágil, como lo es: la falta de documentación del conocimiento arquitectónico (CA), que con el paso del tiempo puede conducir a la vaporización del CA. Pensar en la implementación del concepto de condensación del CA, como solución a la vaporización, donde los principios ágiles y las características del ambiente ágil co-localizado juegan un rol importante, hacen que dicha implementación sea un reto. Analizar las necesidades de las PyMEs, que existen en el ambiente ágil co-localizado, podría ayudar a entender el funcionamiento del activo del CA, y así encontrar una manera de implementar el concepto de condensación para mitigar la vaporización del CA.

Palabras clave: desarrollo ágil, conocimiento arquitectónico, deuda de documentación, vaporización del conocimiento, condensación del conocimiento

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la práctica del desarrollo ágil está en auge de acuerdo al State of Agile Report¹, donde Scrum es la metodología más utilizada con un 58%. Esto se debe en gran medida a que el desarrollo de software es rápido y flexible [1], ya que se adapta a las especificaciones del negocio y a los requerimientos del proyecto sin importar su tamaño. Sin embargo, se suele sacrificar la documentación para conseguir estos resultados de forma rápida, debido al tiempo y esfuerzo que conlleva [2], tiempo que puede utilizarse en otras actividades como la codificación. El mismo manifiesto ágil (base de desarrollo ágil) establece más importancia al software funcionando que a una documentación exhaustiva, así como a las interacciones de las personas que a los procesos y herramientas [3]. Debido a esto, se produce lo que se conoce como deuda de documentación, es decir, la falta de documentos de desarrollo [4], por ejemplo, falta de: reportes de desarrollo y de mantenimiento, solicitudes de cambios, diagramas arquitectónicos, entre otros. Además, la deuda de documentación afecta directamente a un activo fundamental en el proceso de desarrollo de software: el conocimiento arquitectónico (CA), que se refiere al conjunto de diseños y decisiones arquitectónicas (y su fundamento) de un proyecto de software [5]. Al preferirse la interacción cara a

cara sobre los documentos, ya que es “la forma más eficiente y efectiva de comunicar información de ida y vuelta dentro de un equipo de desarrollo” [3], el CA se maneja de forma tácita, o bien puede haber documentos con notación informal o ad-hoc [6]. Al decir de forma tácita, nos referimos al conocimiento que posee un individuo, forma parte de él y lo ayuda a tomar decisiones [7].

Por otro lado, existe aversión por parte de los desarrolladores a documentar [8], que incrementa más la prevalencia de la deuda de documentación. Esto provoca que cuando se requiere entender el diseño del proyecto, los desarrolladores deben revisar el código fuente para tratar de entenderlo [9], lo cual es tardado, poco eficiente y propenso a error, sin mencionar que se lleva entre el 40% y el 60% del tiempo para el mantenimiento del software. De igual forma, al no estar el CA formalizado, con el paso del tiempo, dicho CA contenido en estos documentos puede tergiversarse o dejar de entenderse, dando pie a la vaporización del CA [10]. También sucede que, si un miembro del equipo de desarrollo se retira del proyecto en curso también puede provocar vaporización [11], al llevarse el CA tácito consigo. En consecuencia, la vaporización del CA puede llegar a ocasionar problemas interpersonales en un equipo de desarrollo, quienes al no tener acceso al conocimiento, deben estar respondiendo preguntas que ya fueron respondidas con anterioridad, dando soluciones a problemas que ya fueron

¹ https://stateofagile.com/?_ga=2.221671120.992417076.1608265370-2131000716.1607009578#ufl-i-615706098-14th-annual-state-of-agile-report/7027494



Figura 1. Modelo SECI [7].

solucionados, provocando erosión en las relaciones interpersonales [12]. Cabe mencionar, que las relaciones interpersonales son de vital importancia en el paradigma ágil, ya que se valora más a los usuarios y herramientas que a los procesos, así como se considera la conversación cara a cara como la forma más eficiente y efectiva de comunicarse [3]. En particular, la vaporización del CA puede causar [13], [14]: (1) mala comprensión de los requisitos y soluciones, (2) falta de visión técnica en el seguimiento de proyectos, (3) que expertos pierdan el tiempo respondiendo a las mismas preguntas y tratando de resolver problemas previamente presentados y resueltos. Otra consecuencia de la vaporización del CA es la deuda técnica arquitectónica [15], es decir, un diseño arquitectónico inmaduro, que no alcanza el nivel de calidad requerido [16], [17]. Esto compromete la calidad del sistema, causando que este no actúe acorde a como fue planeado, además de los costos adicionales que podría generar cuando el sistema tenga que crecer o cambiarse [18].

Ahora bien, desde el punto de vista del manejo del conocimiento, al manejarse el CA de manera tácita, de acuerdo al modelo SECI (Figura. 1), el conocimiento se queda en la etapa de socialización, es decir, el CA pasa de boca en boca entre los miembros de un equipo. Por otra parte, cuando el CA se registra en documentos ad-hoc o informales, es decir, que no siguen alguna técnica formalizada de codificación, como lo es UML [19], dicho conocimiento sólo se externaliza. Esto provoca que el CA pueda malinterpretarse con el paso del tiempo, debido a que tampoco existen reglas para la interpretación de estos documentos, por lo que el significado podría olvidarse. Por lo tanto, de acuerdo a lo expuesto anteriormente, las transiciones de combinación y de internalización, es decir, formalización del conocimiento mediante estándares o protocolos (p. ej. UML), y apropiación del mismo a través de documentos formales, rara vez suceden en el desarrollo ágil, lo que provoca que el CA esté propenso a vaporizarse.

En contraparte, pensar en agregar prácticas de formalización (p. ej. diagramas UML) del conocimiento a una metodología ágil podría ser intrusivo [20], es decir, interferir con el proceso ágil, pudiendo restarle agilidad al desarrollo. Por otro lado, cuanto más intrusivo sea el proceso de documentación, se encontrará más resistencia del desarrollador a la documentación [21]. A su vez, en el ambiente ágil, el mismo manifiesto conduce hacia la deuda de documentación,

además del poco tiempo que hay para el desarrollo ya que se debe “entregar con frecuencia software que funcione, en periodos de un par de semanas a un par de meses, con preferencia en los periodos breves” [3]. Aparte, el manifiesto establece que: “las mejores arquitecturas, requisitos y diseños emergen de equipos auto-organizados”, por lo que ningún rol o puesto es nominal, es decir, por lo general no existe un arquitecto de software definido, lo cual puede provocar que el CA dependa de varias personas y de su conocimiento tácito, siendo vulnerable a la vaporización. Sobre todo en pequeñas y medianas empresas, en donde no tienen perfiles únicamente dedicados al diseño o la administración del CA.

La vaporización de CA es un fenómeno presente en el desarrollo ágil, en gran parte causado por los principios y valores ágiles, aunado a las actitudes de las personas involucradas en el proceso de desarrollo, así como las presiones de tiempo para presentar resultados. Las consecuencias de la vaporización incluyen que el software desarrollado no evolucione. Además, se puede incurrir en erosión de relaciones interpersonales, cuando no hay CA debidamente documentado, ya que los miembros del equipo, deberán estar respondiendo constantemente preguntas ya respondidas, y solucionando problemas ya solucionados, sobre todo cuando hay nuevos integrantes en un equipo. Dar solución a la vaporización no es trivial, sobre todo en PyMEs, ya que integrar actividades de documentación le podría restar agilidad al proceso de desarrollo, y causar una mala actitud de los desarrolladores al rechazarlas. Por lo que, existe la necesidad de mitigar la deuda de documentación, evitando ser intrusivos con el proceso ágil, para así minimizar la vaporización del CA en PyMEs. La aportación de este artículo consiste en resaltar, con evidencia bibliográfica, la brecha que existe con relación al manejo del CA en el ambiente ágil co-localizado, enfatizando el sector de las PyMEs. También, se tiene como aportación potenciales implementaciones del manejo del CA en ágil co-localizado, con base a lo encontrado la literatura.

2. CONDENSACIÓN DEL CONOCIMIENTO ARQUITECTÓNICO COMO SOLUCIÓN A LA VAPORIZACIÓN

El concepto de condensación de CA nace como propuesta de mitigación al problema de vaporización, y consiste en reunir el conocimiento que se encuentra disperso en distintos medios o artefactos informales (ver Fig. 2), para después clasificarlo, y ponerlo en un solo lugar para ser compartido [22]. Este concepto nace en un entorno de desarrollo de software global ágil (DSGA) [23], en donde una parte importante del CA se encuentra disperso en distintos medios electrónicos no estructurados (METNE), como: mensajería instantánea, correos electrónicos, foros, repositorios de código (mensajes de commit), entre otros. Los METNE son los medios preferidos para comunicarse en DSGA, debido a la distancia geográfica [24], así como a las distancias lingüísticas y culturales (p. ej. individuos que hablan diferente idioma y/o personalidad tímida de las personas) que pueden complicar la comunicación por vías más ricas como llamadas telefónicas o videoconferencias [25].

Ahora bien, al aplicar el concepto de condensación, el CA no se formaliza, ya que sólo reúne dicho CA disperso y lo ordena,

conduciéndolo a un estado organizado, mediante un esquema de clasificación determinado. Desde el punto de vista del modelo SECI (Fig. 2), al incluir el concepto de condensación, se obtienen dos sub-estados del conocimiento documentado (conocimiento que se externalizó y se registró en algún medio o documento no estandarizado): documentado organizado (mediante un mecanismo de clasificación) y el no organizado (carece de organización, o esta solo la conoce una persona), cuando el CA se encuentra disperso y desorganizado, al condensarse pasa al estado organizado. Con la organización derivada de la condensación del CA, se encuentra a un paso más cerca de estar formalizado, deteniendo la vaporización del mismo. Una vez organizado, el CA almacenado (p. ej. un repositorio.), queda disponible para todos, mediante un mecanismo de búsqueda, que facilite el acceso al mismo.

Hasta la fecha sólo se ha reportado una implementación completa del concepto de condensación del CA [22], la cual usó como mecanismo de clasificación el etiquetado social, comúnmente usado en redes sociales, ya que la implementación se enfocó a condensar en CA de los METNE. Para evitar la explosión de etiquetas [26] (múltiples instancias de etiquetas referentes al mismo concepto), se usó un etiquetado semifijo, que consiste en definir un catálogo de etiquetas predefinidas, con la posibilidad de crear nuevas, ligadas a un modelo de meta-etiquetas, con referencia semántica hacia un concepto en particular. El modelo de meta-etiquetas utilizado se obtuvo de un estudio empírico [23], donde se analizaron mensajes de distintos METNE, para crear una clasificación del tipo de CA que se compartían. Como parte de la implementación de condensación de CA, se implementó un mecanismo de búsqueda y recopilación de los mensajes de METNE, para facilitar el acceso al CA contenido en ellos. Al evaluar la implementación, se observó coherencia semántica de las etiquetas con los mensajes etiquetados, y que se pudo encontrar más rápido el CA utilizando el mecanismo de búsqueda propuesto, que utilizando los medios de búsqueda de METNE (Skype y Trello en este caso). Esto indica que es factible el uso de etiquetado social, como método de clasificación de CA. Se concluye que es fundamental tener un mecanismo de clasificación del CA, para que la implementación tenga éxito, ya que ayuda a organizar el CA, facilitando el acceso y acercándolo un paso más a la formalización.

También se ha implementado un mecanismo de clasificación basados en etiquetado social semi-fijo, para Slack² y Trello³, donde se implementó un asistente de etiquetado [27]. Slack es una herramienta de comunicación en equipo, actualmente muy popular que puede contener CA; lo mismo sucede con Trello, una herramienta de gestión de proyectos, que facilita el flujo de trabajo y permite organizar tareas en tableros tipo Kanban [28]. Estas tarjetas, generalmente contienen historias de usuarios, tareas o casos de uso, por lo que estas tarjetas pueden contener CA, por lo que puede ser considerado un METNE. Por otro lado, para etiquetar el CA de Slack, se creó un asistente de etiquetado social; TaggerBot [27], para clasificar el CA disperso en las conversaciones de Slack, y después guardar todo en un repositorio. Esta herramienta se evaluó mediante una simulación de escenario de trabajo con estudiantes

universitarios. Los resultados también mostraron que es viable implementar asistentes de etiquetado social como método de clasificación de CA, al existir coherencia semántica de las etiquetas. Sin embargo, se debe buscar probar los asistentes de etiquetado en un ambiente lo más apegado a la realidad posible. Además, se obtuvo que en Slack existen ciertas limitaciones a considerar, como la flexibilidad para crear extensiones. Estas limitaciones afectan la usabilidad y en consecuencia la adopción del mecanismo de clasificación, y por ende de todo el concepto de condensación.

En los estudios anteriores, el modelo de meta-etiquetas no llegó a estar formalizado, como lo es una ontología, es decir, una descripción formal de un concepto compartido [29], que permite definir un vocabulario para compartir información en un dominio determinado. En [30], se implementó un mecanismo de clasificación de CA usando una ontología, vinculando artefactos generados durante la etapa de codificación con quien los creó. Esto facilita en gran medida la búsqueda de dichos artefactos y el acceso al CA contenido en estos. Los resultados indicaron que la ontología propuesta presenta congruencia y es consistente con respecto a otras. Además, aporta varios beneficios, como un concepto compartido del conocimiento en la fase de codificación, así como una forma de vincular los artefactos y recursos utilizados por los desarrolladores durante el proyecto, con y los expertos o quienes crearon los artefactos.

El concepto de condensación del CA sólo se ha implementado y evaluado en su totalidad una vez, y fue en un ambiente controlado [22], sólo tomando en cuenta un ambiente global, donde el CA está disperso en los distintos METNE debido a las necesidades de comunicación del DSGA. Además, sólo se han implementado mecanismos de clasificación para estos medios [27], dejando de lado medios usados en ambientes co-localizados como: artefactos o documentos físicos, así como el conocimiento verbalizado (tácito en su totalidad), que también pueden contener CA propenso a vaporizarse, al no estar codificados bajo algún estándar y al estar dispersos en distintos medios. Por otro lado, la propuesta de ontología [30], sólo se evaluó con una prueba controlada, que proyecta cómo se aplicaría un mecanismo de clasificación del CA. A su vez, la literatura [22], [27], [30] establece que, clasificar el CA es un paso fundamental para la condensación del mismo, por lo que diseñar mecanismos de clasificación que consideren el CA tácito y documentado es fundamental para mitigar la vaporización en

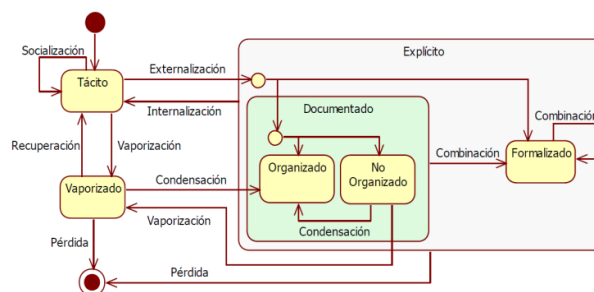


Figura 2. Modelo SECI: condensación del CA [22].

² <https://slack.com/intl/es-mx/>

³ <https://trello.com/es>

ambientes ágiles co-localizados. Por todo lo anterior nace la siguiente pregunta: ¿Cómo implementar el concepto de condensación del CA en un ambiente ágil co-localizado, sin ser intrusivos con el proceso de desarrollo?

3. IMPLEMENTACIÓN DE LA CONDENSACIÓN DEL CONOCIMIENTO ARQUITECTÓNICO A EN UN AMBIENTE ÁGIL CO-LOCALIZADO

En esta sección se aborda el origen de la necesidad de implementar el concepto de condensación del CA en un ambiente ágil co-localizado, así como las necesidades de este, en contraste con el ambiente de DSG.

3.1 PyMES y condensación del conocimiento

El concepto de condensación del CA nació en un ambiente de DSGA, sin embargo, el problema de vaporización de CA, afecta tanto a empresas dentro del ambiente global, como a empresas fuera de este.

Dentro del ambiente ágil, podemos encontrar empresas consideradas grandes (de 999 empleados⁴), que suelen tener la capacidad y los recursos para implementar mecanismos de comunicación eficaces, así como marcos de escalamiento ágil. Un ejemplo de estos marcos de trabajo es SaFe [31], el cual designa a uno o más miembros del equipo con el rol de arquitecto/diseñador de software, que entre otras cosas maneja el CA de distintos proyectos. Sin embargo, existe un sector de las empresas (PyMEs - menos de 99 empleados⁴) que no tienen ni los recursos, ni la capacidad (principalmente de personal) de implementar algún marco de escalamiento ágil, con el que puedan solucionar el manejo de CA. Por otra parte, en el ámbito ágil se evitan roles nominales, ya que suelen ser equipos auto-organizados y multifuncionales [3], por lo que quien desempeñe el rol de arquitecto de software no lo hará de manera fija, por lo que se tiene mayor riesgo de vaporización del CA.

En otro orden de ideas, las empresas dentro del ambiente co-localizado, tienen diferentes características con respecto al ámbito global, y una de ellas es la comunicación, que se da en mayor medida cara a cara en un ambiente co-localizado [32]. Por lo tanto, hay más medios tanto físicos, como virtuales, además de tácitos (conversaciones), donde queda CA. Por lo que, aplicar el concepto de condensación del CA es un reto mayúsculo.

3.2 Retos y limitaciones

En el ambiente ágil co-localizado existen distintos retos y limitaciones, como los problemas de comunicación entre los miembros de un equipo de desarrollo. Se han propuesto enfoques y modelos para la gestión del conocimiento (GC), como en [33], donde se abordan temas de gestión de la comunicación entre el equipo de desarrollo, específicamente durante la etapa de diseño del

software, con el objetivo de mejorar dicha comunicación y facilitar el intercambio de conocimientos. También se han investigado los canales de comunicación del conocimiento (basados en el modelo SECI) [34], donde se destaca que dichos canales cambian con el tiempo, por lo que, aun considerando sólo un canal de comunicación, con el cual compartir conocimientos del proyecto (medios electrónicos p. ej. GitHub, StackOverflow, etc.), no asegura que el conocimiento se comparta correctamente, debido al constante cambio de estos canales, lo que puede provocar que el CA se disperse, y quede propenso a vaporizarse.

Por otra parte, se ha reportado que el papel de la conversación y las interacciones sociales son un elemento clave en el intercambio eficaz de conocimientos en el desarrollo ágil [35]. Al existir documentación insuficiente, se pasan por alto detalles importantes durante una conversación, como el asumir algo que no se dijo, p. ej.: un analista de sistemas, pasa por alto detalles que son importantes para el cliente, debido a que no se especificaron en un inicio. A su vez, en [36] se reporta, que 13 de 18 organizaciones que participaron en un estudio para conocer los problemas durante la evolución, mantenimiento y desarrollo de software, afirman haber encontrado varios problemas directamente relacionados con la comunicación verbal, tales como: (1) los ingenieros olvidan con el tiempo cómo han resuelto varios problemas, (2) decisiones indocumentadas, (3) procesos se malinterpretan, (4) las personas no recuerdan lo que dijeron, lo que se les dijo o se les pidió, (5) los ingenieros se distraen demasiado cuando tienen que comunicarse. Además, el 50% de las organizaciones afirman que la documentación insuficiente ha llevado a una carga de comunicación oral, lo que afecta la comunicación entre individuos.

Por lo tanto, el buscar gestionar el conocimiento en forma tácita y explícita, al menos informalmente (conocimiento documentado), es vital y necesario en un ambiente de desarrollo ágil co-localizado. En [32], se presenta un marco para capturar el conocimiento tácito compartido entre desarrolladores, mediante un enfoque de programación por pares, para facilitar el proceso de aprendizaje organizacional. Los resultados son favorables en cuanto a prevalencia del CA, sin embargo, al ser tácito, depende totalmente de la capacidad de retención y comunicación de los miembros del equipo de desarrollo. Además, se deben considerar las barreras de comunicación como [37]: percepciones negativas del equipo mismo de desarrollo, falta de experiencia laboral, etc. Por otra parte, en [38], se destaca la existencia de CA documentado: dibujos, especificaciones técnicas y diagramas, así como conocimiento tácito derivado de la experiencia de los diseñadores. Este CA disperso en estos medios físicos, electrónicos y tácitos, es necesario para la toma de decisiones arquitectónicas [38], sin embargo, la falta de información en las primeras etapas del diseño puede retrasar la toma de decisiones, lo que provoca que se vuelva más costoso y difícil realizar cambios. Existen propuestas para apoyar el registro y la toma de decisiones arquitectónicas, las cuales ofrecen la ventaja de recuperar el CA [39], clasificarlo [40], y registrar las decisiones de diseño tomadas [41]. Sin embargo, ninguna de las propuestas

⁴<https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/smb-small-and-midsize-businesses>

contempla la gestión del conocimiento como una necesidad, al enfocarse en probar herramientas o enfoques de administración de recursos como el tiempo y el personal, y no en procedimientos que puedan acercar al CA a un estado formalizado, como lo es el concepto de condensación. Además, no consideran la gestión del conocimiento, ignorando que en un ambiente co-localizado el CA puede estar en forma tácita o en documentos y artefactos físicos. Por otro lado, se pueden encontrar herramientas que ayuden a registrar CA tácito [42], [43], y manejar la reutilización de código para ahorrar tiempo y esfuerzo [44]. Sin embargo, tampoco abordan la gestión del CA, ya que se enfocan en la necesidad de registrar el CA para tomar decisiones de diseño, dejando expuesto el CA a vaporizarse, ya que este carece de formalización, así como mecanismos de clasificación, así como gestión del CA documentado.

3.3 Implementación de la condensación en ágil co-localizado

Tomando en cuenta la literatura existente, con respecto a la gestión del CA en ágil co-localizado [32], [36], y las necesidades de las PyMEs [33]–[35], se considera necesario realizar un estudio empírico, para encontrar maneras de condensar el CA tácito y documentado, y con ello definir una propuesta de solución que involucre no sólo un mecanismo de clasificación del CA, sino todo el concepto de condensación, para posteriormente probar su factibilidad. Dicha solución, podría basarse en aprovechar las técnicas de etiquetado social en METNE (como se vio en [27]), utilizando inteligencia artificial, donde se sugieran etiquetas previamente definidas. De este modo, podría facilitarse la clasificación del CA etiquetado, aumentando el grado de precisión de las etiquetas con respecto a lo etiquetado, y así disminuir la explosión de etiquetas. De esta forma, con un CA coherentemente clasificado, se facilitaría su recuperación en el futuro. Otra posible solución, sería pensar en la creación de ontologías (como en el estudio de [30]), donde las meta-etiquetas que se proponen en [22] podrían tomarse como entidades de una ontología; de este modo se podría tener el CA clasificado con base en una estructura formal, para posteriormente implementar un motor de búsqueda que facilite el acceso al CA clasificado con dicha ontología.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó cómo la misma naturaleza del desarrollo ágil deriva en una deuda de documentación, que con el paso del tiempo provoca vaporización del CA, así como los problemas derivados de esta. Además, se presentó el concepto de condensación del CA, como una propuesta de solución a la vaporización, así como diversos trabajos que han implementado total, o parcialmente el concepto. Finalmente, se establecieron las implicaciones que conllevarían la implementación del concepto de condensación de CA en un ambiente ágil co-localizado, siendo las más importantes: conocer las necesidades y características de las PyMEs, y del ambiente ágil co-localizado. Validar cómo se gestiona el CA en este ambiente. Desarrollar un mecanismo de clasificación tanto para CA documentado (físico y electrónicamente), como para el CA tácito (totalmente verbalizado), evitando ser intrusivos con el proceso de

desarrollo. Diseñar una evaluación en un ambiente lo más apegado a la realidad posible, para finalmente probar la factibilidad de la implementación del concepto de condensación en ágil co-localizado. Por lo tanto, dadas las necesidades de las PyMEs y el ambiente ágil co-localizado, así como las características del desarrollo ágil, se puede concluir que es necesario y fundamental encontrar cómo aplicar el concepto de condensación, y encontrar cómo formalizar el CA una vez condensado, buscando la prevalencia del CA.

REFERENCIAS

- [1] P. Jain, A. Sharma, and L. Ahuja, "The Model for Determining Weight Coefficients of Maintainability Criteria in Agile Software Development Process," in *2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, 2019, pp. 1–4.
- [2] M. A. Babar, T. Dingsøyr, P. Lago, and H. Van Vliet, *Software architecture knowledge management: Theory and practice*. 2009.
- [3] K. Beck *et al.*, "Manifesto for Agile Software Development," *The Agile Alliance*, 2001. .
- [4] E. Tom, A. Aurum, and R. Vidgen, "An exploration of technical debt," *J. Syst. Softw.*, 2013.
- [5] P. Kruchten, P. Lago, and H. Van Vliet, "Building up and reasoning about architectural knowledge," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2006.
- [6] R. Hoda, J. Noble, and S. Marshall, "How much is just enough?," 2010.
- [7] I. Nonaka and H. Takeuchi, "Knowledge-Creating Company," *Knowledge-Creating Co.*, 1995.
- [8] T. Clear, "Documentation and agile methods," *ACM SIGCSE Bull.*, 2003.
- [9] B. Selic, "Agile documentation, anyone?," *IEEE Softw.*, 2009.
- [10] J. Bosch, "Software architecture: The next step," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, 2004.
- [11] H. Holz and F. Maurer, "Knowledge management support for distributed agile software processes," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, 2003.
- [12] S. Ryan and R. V. O'Connor, "Acquiring and Sharing tacit knowledge in software development teams: An empirical study," *Inf. Softw. Technol.*, 2013.
- [13] H. Holz, G. Melnik, and M. Schaaf, "Knowledge management for distributed agile processes: Models, techniques, and infrastructure," in *Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises, 2003. WET ICE 2003.*, 2003, pp. 291–294.
- [14] N. Uikey, U. Suman, and A. Ramani, "A Documented Approach in Agile Software Development," *Int. J. Softw. Eng. its Appl.*, 2011.
- [15] Z. Li, P. Liang, and P. Avgeriou, "Architectural Debt Management in Value-Oriented Architecting," in *Economics-Driven Software Architecture*, 2014.

- [16] S. Fraser *et al.*, "Technical Debt: From Source to Mitigation," in *Proceedings of the 2013 Companion Publication for Conference on Systems, Programming, & Applications: Software for Humanity*, 2013, pp. 67–70.
- [17] Y. Guo and C. Seaman, "A Portfolio Approach to Technical Debt Management," in *Proceedings of the 2nd Workshop on Managing Technical Debt*, 2011, pp. 31–34.
- [18] C. Fernández-Sánchez, J. Díaz, J. Pérez, and J. Garbajosa, "Guiding Flexibility Investment in Agile Architecting," in *2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2014, pp. 4807–4816.
- [19] P. Stevens and R. J. Pooley, *Using UML: Software Engineering with Objects and Components*. Addison-Wesley, 2006.
- [20] G. Bortis, "Informal Software Design Knowledge Reuse," in *Proceedings of the 32nd ACM/IEEE International Conference on Software Engineering - Volume 2*, 2010, pp. 385–388.
- [21] J. Burge and D. C. Brown, "Reasoning with Design Rationale," in *Artificial Intelligence in Design '00*, 2000.
- [22] G. Borrego, A. L. Morán, R. R. Palacio, A. Vizcaino, and F. O. García, "Towards a reduction in architectural knowledge vaporization during agile global software development," *Inf. Softw. Technol.*, 2019.
- [23] G. Borrego, A. L. Moran, R. Palacio, and O. M. Rodriguez, "Understanding architectural knowledge sharing in AGSD teams: An empirical study," in *Proceedings - 11th IEEE International Conference on Global Software Engineering, ICGSE 2016*, 2016.
- [24] H. Holmstrom, E. Ó. Conchúir, P. J. Ågerfalk, and B. Fitzgerald, "Global software development challenges: A case study on temporal, geographical and socio-cultural distance," in *Proceedings - 2006 IEEE International Conference on Global Software Engineering, ICGSE 2006*, 2006.
- [25] H. Holmstrom, E. O. Conchuir, P. J. Agerfalk, and B. Fitzgerald, "Global Software Development Challenges: A Case Study on Temporal, Geographical and Socio-Cultural Distance," *Glob. Softw. Eng. 2006. ICGSE '06. Int. Conf.*, pp. 3–11, 2006.
- [26] E. Bagheri and F. Ensan, "Semantic tagging and linking of software engineering social content," *Autom. Softw. Eng.*, 2016.
- [27] G. Borrego, G. Salazar-Lugo, M. Parra, and R. Palacio, "Slack's knowledge classification mechanism for architectural knowledge condensation," in *Proceedings - 6th Annual Conference on Computational Science and Computational Intelligence, CSCI 2019*, 2019.
- [28] R. A. Esparrago, "KANBAN.," *Prod. Invent. Manag. J.*, 1988.
- [29] M. A. Paredes-Valverde, M. del P. Salas-Zárate, R. Colomo-Palacios, J. M. Gómez-Berbis, and R. Valencia-García, "An ontology-based approach with which to assign human resources to software projects," *Sci. Comput. Program.*, 2018.
- [30] J. R. Martínez-García, F. E. Castillo-Barrera, R. R. Palacio, G. Borrego, and J. C. Cuevas-Tello, "Ontology for knowledge condensation to support expertise location in the code phase during software development process," *IET Softw.*, 2020.
- [31] Scaled Agile, "Scaled agile framework - safe for lean enterprises," *SAFe Enterp.*, 2018.
- [32] R. K. Kavitha and M. S. I. Ahmed, "A knowledge management framework for agile software development teams," in *Proceedings of 2011 International Conference on Process Automation, Control and Computing, PACC 2011*, 2011.
- [33] V.-P. Eloranta and K. Koskimies, "Aligning Architecture Knowledge Management with Scrum," in *Proceedings of the WICSA/ECSA 2012 Companion Volume*, 2012, pp. 112–115.
- [34] J. Tantisuwankul *et al.*, "A topological analysis of communication channels for knowledge sharing in contemporary GitHub projects," *J. Syst. Softw.*, 2019.
- [35] G. Melnik and F. Maurer, "Direct verbal communication as a catalyst of agile knowledge sharing," in *Agile Development Conference*, 2004, pp. 21–31.
- [36] M. Kajko-Mattsson, "Problems in agile trenches," in *ESEM'08: Proceedings of the 2008 ACM-IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement*, 2008.
- [37] S. Ghobadi and L. Mathiassen, "Perceived barriers to effective knowledge sharing in agile software teams," *Inf. Syst. J.*, 2016.
- [38] R. K. Jonkers and K. E. Shahroudi, "Reducing the Costs of Engineering Design Changes Through Adoption of a Decision Support and Knowledge Management System Early in the Design," in *2019 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, 2019, pp. 1–8.
- [39] D. Tofan, P. Avgeriou, and M. Galster, "Validating and improving a knowledge acquisition approach for architectural decisions," *Int. J. Softw. Eng. Knowl. Eng.*, 2014.
- [40] M. Bhat, K. Shumaiev, and F. Matthes, "Towards a Framework for Managing Architectural Design Decisions," in *Proceedings of the 11th European Conference on Software Architecture: Companion Proceedings*, 2017, pp. 48–51.
- [41] J. A. Diaz-Pace and A. J. Bianchi, "High-Level Design Stories in Architecture-Centric Agile Development," in *2019 IEEE International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C)*, 2019, pp. 137–144.
- [42] D. Tofan, M. Galster, and P. Avgeriou, "Capturing tacit architectural knowledge using the repertory grid technique (NIER track)," in *Proceedings - International Conference on Software Engineering*, 2011.
- [43] R. Capilla, J. C. Dueñas, and F. Nava, "Viability for codifying and documenting architectural design decisions with tool support," *J. Softw. Maint. Evol.*, 2010.
- [44] M. Njima, "Architecting for Scale: The Case for Systematic Software Reuse in Managing Technical Debt in Start-Ups," in *Proceedings of the 13th European Conference on Software Architecture - Volume 2*, 2019, pp. 55–58.

Evaluación de conjuntos de datos para reconocimiento de carga cognitiva y estrés

Edgar Omar Bañuelos Lozoya, Gabriel González Serna,
Nimrod González Franco

*TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México;
edgar.banuelos19ca@cenidet.edu.mx,
{gabriel.gs, nimrod.gf}@cenidet.tecnm.mx*

Resumen: La evaluación tradicional de la experiencia del usuario es de naturaleza subjetiva, por lo que se busca utilizar datos fisiológicos y de comportamiento para interpretar la relación que tienen los estados cognitivos del usuario con los elementos gráficos y de interacción que se muestran en la interfaz. En este artículo se presentan los resultados de la evaluación de conjuntos de datos que se llevó a cabo para seleccionar conjuntos relacionados con carga cognitiva y estrés con la finalidad de ser utilizados en experimentación inicial con modelos de aprendizaje automático que puedan ser adaptados al contexto UX.

Palabras clave: conjunto de datos, carga cognitiva, estrés, experiencia del usuario, UX

1. INTRODUCCIÓN

La cognición se refiere a procesos como la memoria, la atención, el lenguaje, la resolución de problemas y la planificación (Pessoa, 2008); a partir de estos procesos se identifican varios estados como: carga cognitiva, estrés mental, fatiga mental, atención, entre otros.

La carga cognitiva o carga de trabajo mental se caracteriza como «la cantidad de recursos cognitivos o de atención que se gastan en un momento determinado» (Charlton, 2002). El estrés mental ocurre cuando la carga cognitiva de una tarea excede la capacidad cognitiva de la persona que la está desarrollando (Huang et al., 2016).

La presencia de uno y otro estado puede manifestarse de diversas maneras. Por ejemplo, se ha encontrado que la carga cognitiva puede ser expresada como una experiencia subjetiva, con variaciones en el rendimiento de la tarea y con manifestaciones fisiológicas; o que existen relaciones entre numerosas respuestas físicas con la presencia de estrés mental, tales como agitación, ansiedad, sudoración, etc. (Vidulich and Tsang, 2012; Huang et al., 2016).

Es por ello que la carga cognitiva ha sido detectada a partir de tecnologías como electroencefalograma (EEG) y seguimiento ocular, debido a su relación con datos de la señal de la actividad eléctrica cerebral y de la variación de la dilatación de la pupila (e.g. Yang et al., 2019; Jimenez-Molina et al., 2018). El estrés mental se ha abordado a partir de datos de las señales de la actividad eléctrica del corazón y de la resistencia eléctrica de la piel, con tecnologías como electrocardiograma (ECG) y respuesta galvánica de la piel (GSR, del inglés *Galvanic*

Skin Response) (e.g. Masood and Alghamdi, 2019; Soto et al., 2021).

Tanto carga cognitiva como estrés han sido estudiados en diversos contextos tales como: juegos virtuales, conducción, control de tráfico aéreo, entre otros (e.g. Frey et al., 2016; Yokoyama et al., 2018; Aricò et al., 2016). Sin embargo, cuando de evaluación de experiencia del usuario (UX del inglés *User Experience*) se refiere, los estudios se han concentrado en complementar los mecanismos tradicionales con el análisis de estados emocionales del modelo de afecto (Posner et al., 2005) y falta trabajo para reconocer y representar adecuadamente la relación que tienen estados cognitivos, como los mencionados, con los elementos de una interfaz y los mecanismos de interacción.

Aunque autores afirman que hay un consenso de que enfoques multimodales son necesarios para entender contextos similares al de la experiencia del usuario, también resaltan la escasez de más y mejores conjuntos de datos y de mecanismos para hacerlos compatibles e integrarlos (Engelke et al., 2017). Es importante contar con conjuntos de datos que puedan ser reutilizados para entrenar modelos de aprendizaje automático para el reconocimiento de carga cognitiva y estrés mental y obtener resultados comparativos; esto puede ser complicado en el caso de modelos de aprendizaje profundo, ya que requieren de datos suficientes, una gran cantidad, para aprovechar su potencial (LeCun et al., 2015).

En este artículo se presenta el análisis que se realizó a nueve conjuntos de datos relacionados con carga cognitiva y estrés, considerando requerimientos propuestos para conjuntos de datos de referencia (Mahesh et al.,

2019), con la finalidad de ser utilizados para posteriores experimentos de evaluación de experiencia del usuario.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: la sección dos describe la metodología, la sección tres los conjuntos de datos, la sección cuatro los resultados obtenidos y la sección cinco las conclusiones generadas.

2. METODOLOGÍA

Mahesh et al. (2019) definen cinco requerimientos que deben cumplir los conjuntos de datos de referencia para la detección de estrés, los cuales pueden generalizarse para conjuntos de datos que involucren también otros estados, estos son:

- (R1) El tamaño de la muestra debe ser representativa y debe abarcar varios factores demográficos.
- (R2) El estímulo debe ser relevante y efectivo.
- (R3) Debe registrarse información complementaria de múltiples modalidades; en el caso de estrés, electrocardiograma y el registro de actividad electrodérmica deben ser siempre considerados.
- (R4) Deben usarse múltiples métodos de autoreporte o autoevaluación para analizar factores externos e internos que afectan la respuesta al estado.
- (R5) Los dispositivos de adquisición de datos deben de estar clínicamente validados y sus características de ruido deben de ser especificadas; la información de calibración debe ser registrada acorde a un protocolo de configuración de dispositivo.

La metodología que se llevó a cabo fue la siguiente: 1) búsqueda y descarga de artículos y conjuntos de datos relacionados, 2) evaluación de los requerimientos, 3) presentación de resultados y 4) selección de conjuntos viables de datos.

3. CONJUNTOS DE DATOS

Se identificaron un total de nueve conjuntos de datos vinculados con el reconocimiento de carga cognitiva y/o estrés:

1. HciLab (Schneegass et al., 2013), incluye datos ECG, GSR, temperatura, posición GPS, aceleración y autoevaluación de carga cognitiva a partir de video frontal durante actividades de conducción real; 10 participantes (3 mujeres, 7 hombres) con una media de edad de 35.6 años.
2. SWELL-KW (Koldijk et al., 2014), presentado en el contexto de investigación en estrés, incluye datos ECG, GSR, logs de computadora, expresiones faciales y posturas corporales de 25 participantes (8 mujeres y 17 hombres), con una edad promedio de 25 años, al realizar actividades en un escenario realista de oficina y con interrupciones a través de correos electrónicos; capturando autoreportes como NASA-TLX, escala likert de estrés, entre otros.

3. Conjunto de datos de INRIA¹ (Mühl et al., 2014), contiene grabaciones EEG, ECG, electromiografía (EMG), GSR, entre otras; capturadas de 24 participantes (12 hombres, 12 mujeres; media de edad de 24.7 años) realizando actividades para inducir estrés a través de una entrevista de trabajo falsa y para inducir carga cognitiva con tareas *n-back*; utilizan los cuestionarios STAI, SAM y RSME para la autovaloración subjetiva.
4. MIPDB (Langer et al., 2017), conjunto de datos que incluye EEG y seguimiento ocular de 126 participantes de 6 a 44 años donde el 80% presenta un desarrollo típico y el resto con algún desorden clínico, incluye tareas cognitivas con un enfoque pasivo y activo con el objetivo de ser útil para estudiar el procesamiento de información en el cerebro en desarrollo; aplican una batería amplia de cuestionarios para análisis cognitivo y de comportamiento.
5. STEW, construido por Lim et al. (2018) con datos EEG de 48 participantes masculinos, rating con una escala de carga de trabajo mental e identificación de dos tipos de tareas.
6. AffectiveROAD (Haouij et al., 2018), incluye datos GSR, fotopletiografía, temperatura y respiración de 10 participantes (5 hombres y 5 mujeres) de edad promedio de 29.9 años en actividades de conducción real y con etiquetado subjetivo de estrés.
7. EEGMat (Zyma et al., 2019), contiene grabaciones EEG de 36 participantes (27 mujeres y 9 hombres; edad promedio de 18.25 años) durante la realización de restas mentales, agregando una métrica de rendimiento con base en la cantidad de restas correctas.
8. Cogload (Gjoreski et al., 2020), contiene datos GSR, PPG, temperatura y acelerómetro (pulsera) de 23 participantes con una media de edad de 29.51 años durante actividades cognitivas para inducir carga de trabajo mental; aplican un cuestionario de personalidad y auto reporte a través de NASA-TLX.
9. Snake (Gjoreski et al., 2020), contiene datos GSR, PPG, temperatura y acelerómetro (pulsera) de 23 participantes (16 hombres y 7 mujeres) con una media de edad de 24.91 años capturados al jugar en el tradicional juego *Snake* para dispositivo móvil e inducir carga de trabajo mental; capturan autoreporte utilizando NASA-TLX.

4. RESULTADOS

Se tomaron como base los criterios de evaluación vinculados con cada uno de los requerimientos propuestos por Mahesh et al. (2019); la tabla 1 resume los resultados. Algunas de las observaciones clave son las siguientes:

- (R1) Población: En INRIA y AffectiveROAD la muestra incluye proporciones iguales de hombres y mujeres, sin embargo no se analizó la representatividad estadística ni otros factores demográficos. En MIPDB presentan una distribución de edad más

¹ No se ha encontrado públicamente.

amplia y consideran la presencia de padecimientos diagnosticados.

- (R2) Estímulo: Dada la naturaleza de MIPDB los estímulos están relacionados con la realización de tareas pasivas y activas pero no con el objetivo de elicitar estados mentales en específico.
- (R3) Modalidades: La mayoría de los conjuntos de datos incluyen por lo menos datos de dos señales fisiológicas o de comportamiento; algunos de ellos como HciLab y SWELL-KW incluyen además otros datos del contexto de la tarea.
- (R4) Auto reportes: Todos los conjuntos de datos incluyen por lo menos un cuestionario de autoreporte, destacando NASA-TLX para el caso de carga cognitiva.
- (R5) Dispositivos de adquisición de datos²: Cerca de la mitad de los conjuntos de datos reportan que utilizan algún dispositivo validado, sin embargo no realizan observaciones en cuanto a aspectos de ruido o referencia a algún protocolo de calibración, generalmente solo presentan la descripción del dispositivo, el número de electrodos si corresponde, la marca, el modelo y la frecuencia de captura de datos.

Tabla 1. Resultado de la evaluación de conjuntos de datos para carga cognitiva y estrés

Conjunto de datos	R1	R2	R3	R4	R5
HciLab	✓	✓	✓	✓	✓
SWELL-KW	✓	✓	✓	✓	✓
INRIA	✓	✓	✓	✓	*
MIPDB	✓	✓	✓	✓	✓
STEW	✓	✓	✓	✓	✓
AffectiveROAD	✓	✓	✓	✓	✓
EEGMat	✓	✓	✓	✓	✓
Cogload	✓	✓	✓	✓	✓
Snake	✓	✓	✓	✓	✓

Según el resultado de la evaluación, solo uno de los conjuntos de datos, AffectiveROAD, cumple con todos los criterios considerados, sin embargo, se tiene la limitante de que parte del análisis se realiza conforme a la información reportada por los propios autores y algunos aspectos, como los relacionados con la población, son comunicados con poco detalle en los artículos de referencia.

Por otro lado, el objetivo de este trabajo es seleccionar conjuntos de datos que puedan ser viables para generar modelos de aprendizaje útiles en la evaluación de experiencia del usuario o que por lo menos los estímulos y señales consideradas tengan una mayor similitud con lo empleado en ese contexto, es por ello que SWELL-KW, Cogload y STEW se consideran indicados para iniciar con el proceso de experimentación. INRIA también cumple con los características mencionadas sin embargo no ha sido posible adquirir su contenido y documentación. Como trabajo futuro se pretende analizar si la extensión de estos conjuntos de datos permitiría entrenar modelos más

exhaustivos en datos, como los denominados de aprendizaje profundo, así como su conveniencia.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta la evaluación realizada a nueve conjuntos de datos relacionados con carga cognitiva y estrés a partir de cinco criterios predefinidos. Se encuentra que solo uno de los conjuntos de datos cumple con todos los criterios, destacando algunas limitantes en el análisis, sin embargo se seleccionan a SWELL-KW, Cogload y STEW para realizar pruebas futuras en el contexto de evaluación de experiencia del usuario, dadas las similitudes de sus estímulos y señales con las que se utilizan en ese contexto.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Aricò, P., Borghini, G., Di Flumeri, G., Colosimo, A., Bonelli, S., Golfetti, A., Pozzi, S., Imbert, J.P., Granger, G., Benhacene, R., and Babiloni, F. (2016). Adaptive automation triggered by EEG-based mental workload index: A passive brain-computer interface application in realistic air traffic control environment. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10(OCT2016). doi:10.3389/fnhum.2016.00539.
- Charlton, S.G. (2002). Measurement of Cognitive States in Test and Evaluation. In S.G. Charlton and T.G. O'Brien (eds.), *Handbook of Human Factors Testing and Evaluation*, chapter 6, 97–126. Lawrence Erlbaum Associates, segunda ed edition.
- Engelke, U., Darcy, D.P., Mulliken, G.H., Bosse, S., Martini, M.G., Arndt, S., Antons, J.N., Chan, K.Y., Ramzan, N., and Brunnström, K. (2017). Psychophysiology-Based QoE Assessment: A Survey. doi:10.1109/JSTSP.2016.2609843.
- Frey, J., Daniel, M., Castet, J., Hachet, M., and Lotte, F. (2016). Framework for Electroencephalography-Based Evaluation of User Experience. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, 2283–2294. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. doi:10.1145/2858036.2858525. URL <https://doi.org/10.1145/2858036.2858525>.
- Georges, V., Courtemanche, F., Sénécal, S., Léger, P.M., Nacke, L., and Pourchon, R. (2017). The adoption of physiological measures as an evaluation tool in UX. In F.F.H. Nah and C.H. Tan (eds.), *HCI in Business, Government and Organizations. Interacting with Information Systems*, 90–98. Springer International Publishing.
- Gjoreski, M., Kolenik, T., Knez, T., Luštrek, M., Gams, M., Gjoreski, H., and Pejović, V. (2020). Datasets for Cognitive Load Inference Using Wearable Sensors and

² En el caso de INRIA no se reporta información al respecto.

- Psychological Traits. *Applied Sciences*, 10(11), 3843. doi:10.3390/app10113843. URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/11/3843>.
- Haouij, N.E., Poggi, J.M., Sevestre-Ghalila, S., Ghazi, R., and Jaidane, M. (2018). AffectiveROAD System and Database to Assess Driver's Attention. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing, SAC '18*, 800–803. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. doi:10.1145/3167132.3167395. URL <https://doi.org/10.1145/3167132.3167395>.
- Huang, M.X., Li, J., Ngai, G., and Leong, H.V. (2016). StressClick: Sensing Stress from Gaze-Click Patterns. In *Proceedings of the 24th ACM International Conference on Multimedia, MM '16*, 1395–1404. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. doi:10.1145/2964284.2964318. URL <https://doi.org/10.1145/2964284.2964318>.
- Jimenez-Molina, A., Retamal, C., and Lira, H. (2018). Using Psychophysiological Sensors to Assess Mental Workload During Web Browsing. *Sensors*, 18(2), 458. doi:10.3390/s18020458. URL <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/2/458>.
- Koldijk, S., Sappelli, M., Verberne, S., Neerincx, M.A., and Kraaij, W. (2014). The SWELL Knowledge Work Dataset for Stress and User Modeling Research. In *Proceedings of the 16th International Conference on Multimodal Interaction, ICMI '14*, 291–298. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. doi:10.1145/2663204.2663257. URL <http://doi.org.conricyt.remotexs.co/10.1145/2663204.2663257>.
- Langer, N., Ho, E.J., Alexander, L.M., Xu, H.Y., Jozanovic, R.K., Henin, S., Petroni, A., Cohen, S., Marcelle, E.T., Parra, L.C., Milham, M.P., and Kelly, S.P. (2017). A resource for assessing information processing in the developing brain using EEG and eye tracking. *Scientific Data*, 4. doi:10.1038/sdata.2017.40.
- LeCun, Y., Bengio, Y., and Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. doi:10.1038/nature14539. URL <https://doi.org/10.1038/nature14539>.
- Léger, P.M., Courtemanche, F., Fredette, M., and Sénécal, S. (2019). A Cloud-Based Lab Management and Analytics Software for Triangulated Human-Centered Research. In F.D. Davis, R. Riedl, J. vom Brocke, P.M. Léger, and A.B. Randolph (eds.), *Information Systems and Neuroscience*, 93–99. Springer International Publishing, Cham. doi:10.1007/978-3-030-01087-4_11.
- Lim, W.L., Sourina, O., and Wang, L.P. (2018). STEW: Simultaneous Task EEG Workload Data Set. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(11), 2106–2114. doi:10.1109/TNSRE.2018.2872924.
- Mahesh, B., Prassler, E., Hassan, T., and Garbas, J.U. (2019). Requirements for a Reference Dataset for Multimodal Human Stress Detection. In *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, PerCom Workshops 2019*, 492–498. doi:10.1109/PERCOMW.2019.8730884.
- Masood, K. and Alghamdi, M.A. (2019). Modeling Mental Stress Using a Deep Learning Framework. *IEEE Access*, 7, 68446–68454. doi:10.1109/ACCESS.2019.2917718.
- Mühl, C., Jeunet, C., and Lotte, F. (2014). EEG-based workload estimation across affective contexts. *Frontiers in Neuroscience*, 8, 114. doi:10.3389/fnins.2014.00114. URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnins.2014.00114>.
- Pessoa, L. (2008). On the relationship between emotion and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(2), 148–158. doi:10.1038/nrn2317. URL <https://doi.org/10.1038/nrn2317>.
- Posner, J., Russell, J.A., and Peterson, B.S. (2005). The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology. *Development and Psychopathology*, 17(3), 715–734. doi:10.1017/S0954579405050340.
- Schneegass, S., Pfleging, B., Broy, N., Heinrich, F., and Schmidt, A. (2013). A Data Set of Real World Driving to Assess Driver Workload. In *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, AutomotiveUI '13*, 150–157. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. doi:10.1145/2516540.2516561. URL <https://doi.org/10.1145/2516540.2516561>.
- Soto, M., Satterfield, C., Fritz, T., Murphy, G.C., Shepherd, D.C., and Kraft, N. (2021). Observing and predicting knowledge worker stress, focus and awakesness in the wild. *International Journal of Human-Computer Studies*, 146, 102560. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2020.102560>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1071581920301622>.
- Vidulich, M.A. and Tsang, P.S. (2012). Mental workload and situation awareness. In G. Salvendy (ed.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, chapter 8, 243–273. John Wiley & Sons, Inc., cuarta edi edition.
- Yang, S., Yin, Z., Wang, Y., Zhang, W., Wang, Y., and Zhang, J. (2019). Assessing cognitive mental workload via EEG signals and an ensemble deep learning classifier based on denoising autoencoders. *Computers in Biology and Medicine*, 109, 159–170. doi:10.1016/j.combiomed.2019.04.034.
- Yokoyama, H., Eihata, K., Muramatsu, J., and Fujiwara, Y. (2018). Prediction of Driver's Workload from Slow Fluctuations of Pupil Diameter. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 1775–1780. doi:10.1109/ITSC.2018.8569279.
- Zyma, I., Tukaev, S., Seleznev, I., Kiyono, K., Popov, A., Chernykh, M., and Shpenkov, O. (2019). Electroencephalograms during Mental Arithmetic Task Performance. doi:10.3390/data4010014.

Desarrollo experimental para la medición del gasto energético asociado a la actividad física utilizando dispositivos vestibles

Juan Antonio Miguel-Ruiz* Javier Ortiz-Hernández**
Manuel Erazo-Valadez *** Alicia Martínez-Rebollar****

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico/CENIDET
(m20ce065@cenidet.tecnm.mx*, javier.oh@cenidet.tecnm.mx**,
m20ce059@cenidet.tecnm.mx***, alicia.mr@cenidet.tecnm.mx****)

Resumen: La falta de actividad física es un factor crucial para el desarrollo de padecimientos como diabetes tipo 2, osteoporosis, obesidad y enfermedades cardiovasculares. En contraposición, la actividad física tiene claros beneficios para la salud como un mejor funcionamiento en los sistemas cardio respiratorio y muscular, una mayor masa y composición corporal, así como una menor tasa de mortalidad. En el presente artículo se analiza el concepto de gasto energético (EE por sus siglas en inglés), para la medición de la actividad física en el adulto mayor y una revisión de la literatura acerca de técnicas y métodos para la estimación del EE, utilizando sensores inerciales y su comparación con técnicas como la calorimetría indirecta para medir su grado de precisión. La calorimetría indirecta es la técnica más precisa en la medición del EE, pero es muy costosa de implementar ya que se basa en la medición de la cantidad de oxígeno (O₂) inhalado y de dióxido de carbono (CO₂) exhalado. La medición y monitoreo de la actividad física permite conocer cómo el adulto mayor distribuye su actividad durante el día. La información del gasto energético es de gran utilidad para la valoración y toma de decisiones por parte de especialistas en la salud, familiares o el mismo adulto mayor.

Palabras Clave: Gasto energético, dispositivos vestibles, actividad física, adultos mayores

1. INTRODUCCIÓN

La poca o nula actividad física es un problema de salud mundial, al menos un 60% de la población total no realiza la actividad física necesaria (OMS, n.d.). En México, de acuerdo con el reporte realizado en 2018 por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el 58% de la población mexicana mayor a 18 años presenta bajos índices de actividad física (ISSSTE, 2019).

Asimismo, datos recopilados por el INEGI, muestran que en 2018 residían en México 15.4 millones de personas mayores a 60 años (INEGI, 2019). De esta cifra el 60.9 por ciento de los hombres y el 70.5 por ciento de las mujeres mayores a 55 años no realiza ningún tipo de actividad física (INEGI, 2018). Se estima que para el año 2030 los ciudadanos mayores a 60 años alcanzarán un total de 20.4 millones, representando un total del 14.8 por ciento de la población del país (Ponce & Káner, 2015).

La falta de actividad física es un factor de riesgo importante, y en algunos casos es un detonante para las enfermedades no transmisibles, como pueden ser los accidentes cerebrovasculares, diabetes y cáncer; y ser precursora para padecimientos como la depresión, ansiedad y estrés (OMS, n.d.).

Estos datos deben ser considerados seriamente, estudios como el realizado por Gaetano (2016) indican que la falta de actividad física en adultos mayores es un factor crucial para el desarrollo de padecimientos como diabetes tipo 2, osteoporosis, obesidad, enfermedades cardiovasculares, enfermedades respiratorias, cáncer de colon y mama.

En contraposición, la actividad física tiene claros beneficios para la salud, no solo físicos, como lo explica Paramio-Pérez (2017) donde se explica que hay evidencia de mejora de la sensación de confianza, satisfacción sexual y un mejor funcionamiento intelectual. La Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que la actividad física fomenta que los adultos mayores presenten un mejor funcionamiento de sus sistemas cardiorrespiratorio y muscular, una mejor masa y composición corporal así como menores tasas de mortalidad por causas como cardiopatía coronaria, hipertensión, accidentes cerebrovasculares, diabetes tipo 2 (OMS, n.d. -b).

Estudios como el realizado por Herrera et al. (2017), demostraron claros beneficios de la actividad física. En una muestra de 26 adultos mayores como grupo experimental y de 20 como grupo de control. Aplicando un Programa de Actividad Física Integral (PAFI) durante 8 meses, con 2 sesiones semanales de 90 minutos cada uno. Los beneficios físicos y mentales fueron evidentes, se presentaron mejoras en la fuerza del tren inferior y superior; una mejora en la

flexibilidad del tren inferior y superior, así como una mayor agilidad y resistencia.

Por las razones mencionadas anteriormente, Sabido Rangel et al (2018), consideran que medir la actividad física realizada por un individuo aporta información acerca del estado de los pacientes y de su proceso patológico. Una valoración precisa y detallada de la actividad física es un requisito fundamental para entender la relación entre salud y enfermedad.

Durante el desarrollo de la actividad física se produce un gasto energético. En la investigación de Sabido Rangel et al. (2018) sugieren una medición de la actividad física basada en el gasto energético (EE), debido a que el gasto energético, también conocido como gasto calórico es una métrica utilizada para cuantificar los niveles de actividad física en la vida diaria.

Desde hace tiempo el seguimiento del EE humano ha sido muy utilizado para el entrenamiento deportivo, el control del peso, el control de la diabetes y otros objetivos de salud (Vargas et al., 2011). Diversos estudios como el realizado por Carneiro et al. (2015) realizaron el análisis de tres modelos diferentes para el cálculo del gasto energético mediante sensores vestibles, los resultados son comparados posteriormente con la técnica de calorimetría indirecta para valorar la exactitud del método. Kingsley et al. (2019) reproducen el estudio utilizando tres modelos de regresión lineal para el centro de masa, la cintura y el tobillo que igualmente hace uso de sensores vestibles, los resultados obtenidos son comparados con la técnica de calorimetría indirecta. Estos dos trabajos demuestran la viabilidad de estudios que buscan una medición del gasto energético utilizando sensores vestibles.

2. TÉCNICAS PARA LA MEDICIÓN DE LA ACTIVIDAD FÍSICA

La medición de actividad física puede realizarse censando los movimientos corporales o midiendo por calorimetría el gasto energético. Las técnicas para la medición se pueden dividir en tres categorías (M. Farinola, 2010; Sirard & Pate, 2001), estas son:

Técnicas patrón: De acuerdo con Arias-vázquez et al., 2013; Costill & Wilmore, 2001; Sirard & Pate, 2001, las técnicas patrón de calorimetría, tienen un mayor grado de exactitud y confianza, ya que se basan en la medición de la cantidad de oxígeno (O_2) inhalado y de dióxido de carbono (CO_2) exhalado. Estas técnicas son implementadas en ambientes controlados como laboratorios o centros de investigación. Aunque presentan una mayor exactitud, tienen los siguientes inconvenientes: a) la necesidad de espacios controlados y aislados, b) una preparación previa del participante, y c) instrumentos especializados para la medición del O_2 y el CO_2 . Aunque estas técnicas son poco prácticas en la vida diaria, son las más utilizadas para validar otras técnicas de medición de la actividad física.

Técnicas objetivas: En este tipo de técnicas la información se obtiene sin la necesidad de que el participante intervenga de

manera directa. Se pueden medir variables asociadas al gasto energético de los movimientos corporales, por ejemplo, la cantidad de pasos, la frecuencia cardíaca y cambios en la ubicación geográfica.

En este tipo de mediciones se puede hacer uso de sensores inerciales, tales como podómetros, acelerómetros, giroscopios. En este caso, la medición de la actividad física debe ser validada mediante alguna técnica patrón (Arias-vázquez et al., 2013; Costill & Wilmore, 2001).

Técnicas subjetivas: En este tipo de técnicas es necesario algún tipo de interacción del participante para la obtención de datos a través de cuestionarios, entrevistas o bitácoras de las actividades realizadas en un periodo de tiempo (Arias-vázquez et al., 2013; Costill & Wilmore, 2001).

Como se ha explicado, existen diversos enfoques para la medición de la actividad física. Entre ellos existen las técnicas patrón, objetivas y subjetivas, cada una con sus ventajas y desventajas, como puede ser la necesidad de equipo especializado, la comprobación de la técnica o la baja exactitud.

La selección de la técnica es influenciada principalmente por el estudio que se realice. Particularmente en esta investigación se hará uso de técnicas objetivas debido al fácil acceso a sensores inerciales, también conocidos como unidades de medición inercial (IMU) (Hernández et al., 2020) y porque las técnicas objetivas pueden ser aplicadas en la vida diaria ya que no es necesario el uso de aparatos especializados como en las técnicas patrón, permitiendo de esta manera un análisis de los movimientos como la aceleración y orientación (Costill & Wilmore, 2001).

3. TÉCNICAS OBJETIVAS

3.1. Dispositivos vestibles

Como se ha señalado en el punto anterior, la medición de la actividad física es posible con sensores. Estos sensores cuando se integran en un dispositivo vestible permiten obtener los datos de la actividad física del participante, como puede ser el número de pasos diarios, patrones de sueño, calorías quemadas por periodo de tiempo, ritmo cardíaco, pulso y temperatura, para después establecer una comunicación con otros dispositivos y transmitir la información capturada (M. G. Farinola & Lobo, 2017).

Los dispositivos vestibles incorporan generalmente microprocesadores, sensores y transductores en los elementos que se visten a diario, actuando como computadoras que siempre porta el usuario (M. G. Farinola & Lobo, 2017). La tecnología vestible corresponde a todo aquel dispositivo electrónico que tiene la capacidad de procesar datos, almacenar información y que pueda estar incorporada a la vestimenta o accesorios de una persona. Pueden ser relojes, pulseras, lentes, gorras, bandas para la cabeza, chamarras, camisas, zapatos e incluso pelucas formando parte de una amplia gama de dispositivos vestibles (Cauhtémoc, 2015).

3.2. Gasto energético

En reposo todas las personas consumen 3.5 mL/kg/min de oxígeno para cubrir las necesidades basales. Las necesidades o estado basales corresponden al gasto mínimo de energía de un organismo en reposo para el mantenimiento de la respiración y otras funciones vegetativas vitales. El MET es la unidad de medida (índice metabólico) correspondiente a la cantidad de energía que consume un individuo en situación de reposo. El MET es usado para representar el gasto energético (EE) (Ainsworth et al., 2000; Arias-vázquez et al., 2013; Pinheiro Volp et al., 2011). Un ejemplo de esto es el compendio de actividades físicas, el cual proporciona un esquema que clasifica la actividad física por tasa de gasto energético, en este se clasifica diferentes actividades mostrando su intensidad y sus respectivos niveles de intensidad física con el MET (AINSWORTH et al., 2013). De igual forma el EE puede ser medido en calorías consumidas, la unidad metabólica (MET) representa el costo energético de estar sentado tranquilamente y este es equivalente a 1 kcal/kg/h, que es igual a 4.184 kJ/kg/h (Redondo, 2015). El consumo de oxígeno es utilizado en técnicas patrón para medir en valores absolutos el oxígeno consumido en L/min, o cuando se considera el peso de cada participante en mL/kg/min.

4. ESTUDIOS PREVIOS PARA LA MEDICIÓN DEL GASTO ENERGÉTICO UTILIZANDO DISPOSITIVOS VESTIBLES

A continuación, se presentan 4 de los principales trabajos relacionados con investigaciones que buscan la medición del gasto energético (EE) utilizando sensores vestibles.

En la primera investigación los autores Carneiro et al. (2015) utilizaron teléfonos inteligentes para efectuar el análisis de tres métodos para el cálculo del gasto energético de las actividades de correr y caminar. El primer método consiste en realizar dos regresiones lineales de la velocidad de las actividades de caminar y correr para obtener el EE. La velocidad es obtenida a partir de los datos pertenecientes a la aceleración de los sensores. Los otros dos modelos se basan en regresiones lineales derivadas de los datos recolectados, uno usando la velocidad y el otro usando una raíz cuadrada media (fRMS) de la magnitud de la señal del acelerómetro. Los resultados obtenidos son comparados contra los resultados de la calorimetría indirecta usando una máscara oronasal Series 7450 V2 (Hans Rudolph, n.d.). La experimentación se realiza sobre una cinta de correr con una fase de calentamiento a 4 km/h durante 2 minutos. Una vez terminado el calentamiento se aumenta la velocidad a 6 km/h durante 1 minuto. La velocidad es aumentada en un 1 km/h cada minuto así hasta alcanzar una velocidad máxima de 12 km/h. La experimentación es aplicada en 13 sujetos, 12 mujeres y 1 hombre.

En el segundo estudio desarrollado por los autores Kingsley et al. (2019), se comparan las estimaciones de actividad física derivadas de un acelerómetro utilizando 9 modelos predictivos

para la muñeca contra un método validado enfocado a la cadera. Los acelerómetros utilizados durante el estudio corresponden a la marca ActiGraph GT3X (ActiGraph, n.d.). En este estudio participaron 110 personas usando un acelerómetro en la muñeca y la cadera durante 1 semana. Los datos recopilados del acelerómetro se utilizan para calcular las estimaciones de la actividad física utilizando 3 modelos lineales y 6 modelos de redes neuronales artificiales. La experimentación tuvo como resultado 9044 horas de actividades físicas variadas de 7 a 96 minutos por día. Estos resultados corresponden a los 110 participantes que se componen de 84 mujeres, 23 hombres y otros con edades de 45 ± 11 años.

En la tercera investigación realizada por Caron et al. (2020) se tuvo el objetivo de desarrollar ecuaciones para la predicción del gasto energético mediante sensores IMU de la marca MTw™, Xsens (Xsens, n.d.), de los cuales se obtenían los datos de aceleración medidos en tres sitios diferentes del cuerpo durante condiciones estáticas y activas en adultos de mediana edad y mayores con y sin diabetes tipo 2 (DT2). Se contó con la participación de 40 sujetos de prueba entre las edades de 40 a 74 años, haciendo uso de IMU colocadas en el centro de masa (CM), la cadera y el tobillo. Posteriormente se hizo un análisis de regresión múltiple para seleccionar variables relevantes para las ecuaciones del cálculo del EE. Estas ecuaciones son comparadas contra un método de referencia el cual es la calorimetría indirecta mediante un analizador de gases respiratorio Ergostik, Geratherm Medical AG (GmbH & Kasernenstraße, n.d.). Para la experimentación se le pidió a cada participante que realizara dos periodos de 6 minutos estando sentado y de pie; para posteriormente hacer cinco caminatas niveladas de 6 minutos a diferentes velocidades (0.5 a 1.50 m/s) en un orden aleatorio, la información es recopilada con una frecuencia de muestreo de 75 Hz.

En el cuarto trabajo los autores Tsukahara et al. (2016), presentan el desarrollo de un algoritmo para la estimación del equivalente metabólico calculando los valores MET a partir de los datos obtenidos de la aceleración de un sensor triaxial Actiwave Motion (CamNtech, n.d.), con una velocidad de muestreo adaptativa. El algoritmo hace uso de cuatro velocidades de muestreo de 32, 16, 8 y 4 Hz. El algoritmo determina los diferentes tipos de muestreo a partir de una aceleración sintética. Cabe mencionar que en este trabajo se busca de igual manera reducir el consumo eléctrico en comparación con otro tipo de algoritmos, manteniendo al máximo la precisión para el cálculo de los valores MET. Los sujetos que se incluyeron en la experimentación constaban de 6 participantes, 4 hombres y 2 mujeres con edades entre 21 y 25 años. Los participantes debían portar por un día el acelerómetro triaxial en la cintura, las principales actividades analizadas fueron descansar acostado y sentado, trabajar en un pc, lavar ropa, lavar platos, moverse con una carga, limpiar con una aspiradora, caminar lento (55 m/min), caminar con normalidad (700 m/min), caminar con rapidez (100 m/min), caminata

normal con una carga (3 kg), subir una escalera, bajar una escalera, correr (130 m/min).

La posición y el efecto de múltiples sensores en un sujeto es de importancia ya que el número y la ubicación del dispositivo en el cuerpo puede afectar de múltiples maneras un estudio de este tipo. Ejemplo de esto son las dos siguientes investigaciones.

En la primera de ellas, Khan et al (2018) proponen un marco de trabajo (Framework) para el reconocimiento de la actividad humana para redes de área corporal (BAN). Una BAN consiste en el uso de múltiples dispositivos vestibles colocados en el cuerpo para recolectar una mayor cantidad de información. Empleando la técnica de *local energy-based shape histogram* (por sus siglas LESH) para la detección de actividades. En este estudio hacen uso de clasificadores como el modelo de regresión lineal simple (SLR), el clasificador Naïve Baye y el algoritmo de Optimización mínima secuencial (SMO). En el estudio hacen una combinación de 5 sensores, no se especifica el tipo ni la marca, pero si la combinación de estos, los cuales se encuentran distribuidos en la mano izquierda con la etiqueta 1, la mano derecha con la etiqueta 2, la cintura con la etiqueta 3, el pie izquierdo con la etiqueta 4 y el pie derecho con la etiqueta 5. Las pruebas para la colocación de los sensores se realizaron con cada uno de los sensores por separado, tres sensores y cinco sensores al mismo tiempo, resultando como la mejor combinación los sensores 1, 3, 4 al mismo tiempo para los 3 clasificadores.

En la segunda investigación Attal et al. (2015) presentan una revisión sistemática de diferentes técnicas de clasificación para el reconocimiento de actividades humanas a partir de datos de sensores inerciales y el efecto de la posición. Para su desarrollo se hace uso de tres unidades de sensores inerciales de la marca *Xbus Kit de Xsens*, estos fueron utilizados por participantes sanos en puntos clave de las extremidades superiores e inferiores del cuerpo como el pecho, el muslo derecho y el tobillo izquierdo. Para la experimentación se usaron técnicas de *machine-learning* tanto de aprendizaje supervisado y no supervisado. Las entradas de los modelos consisten en datos brutos de los sensores inerciales. La adquisición de los datos se recabó de seis sujetos sanos con diferentes perfiles, con una edad media de 26 años y un peso medio: 65 kg. Los resultados presentados muestran que los algoritmos supervisados tienen un mejor desempeño que los no supervisados en especial k-nearest neighbors (K-NN) y random forests (RF).

4.1 Síntesis o conclusiones

En la literatura se presentan diversos análisis para el gasto energético (EE), donde se consideran el uso de diversos dispositivos como el ActiGraph GT3X, MTw™, Xsens o el sensor triaxial Actiwave Motion (ActiGraph, n.d.; CamNtech, n.d.; Xsens, n.d.), cada uno de ellos siendo un sensor inercial triaxial que permite tres grados de libertad (ejes X, Y, Z). Combinados con técnicas matemáticas como regresiones lineales o modelos de redes neuronales artificiales y su

comprobación con una técnica patrón como la calorimetría indirecta mediante un analizador de gases respiratorio o una máscara oro nasal Series 7450 V2 (GmbH & Kasernenstraße, n.d.; Hans Rudolph, n.d.).

El efecto en un estudio donde se consideran múltiples dispositivos colocados en el cuerpo puede afectar de diversas formas. Como que el número de datos provenientes de los dispositivos es mayor, lo cual generaría mayor exactitud. Pero la carga sobre el dispositivo que reciba estos datos requerirá un nivel mayor de procesamiento (Attal et al., 2015; Khan et al., 2018).

Se puede concluir que cada uno de los estudios presentados es valioso, por los dispositivos y métodos que se presentan en cada estudio. Por esto se considerará el uso de sensores vestibles, en específico el uso de sensores inerciales, así como el uso de múltiples sensores vestibles como en el trabajo de Khan et al (2018) con la combinación de la mano izquierda, la cintura y el pie izquierdo. De igual forma el resultado de esta investigación deberá ser comprobado, tanto con los resultados presentes en el compendio de actividades físicas y con una técnica patrón para verificar el grado de error presente en cada método y poder ser validado.

5. PROPUESTA PARA LA MEDICIÓN DEL GASTO ENERGÉTICO DE LA ACTIVIDAD FÍSICA

En este trabajo de investigación se busca medir el gasto energético en el adulto mayor. Se proporcionará esta información al propio adulto mayor o una tercera persona, como puede ser un familiar o un médico. Esto con la intención de conocer en qué medida cubre las recomendaciones mínimas, el saber cuánta energía utiliza durante el día y el cómo distribuye su actividad física. Proponemos el uso de dispositivos vestibles no invasivos, específicamente el uso de sensores inerciales como acelerómetros y giroscopios, para el monitoreo del gasto energético. La investigación se desarrollará en cinco fases estas pueden ser observadas en la ilustración 1 y se componen de:

Fase 1 Adquisición de datos: En esta fase se seleccionará un dispositivo vestible, para ello se realizará un estudio del mercado de dispositivos vestibles, para una posterior comparación y selección del dispositivo que se adecue de mejor manera a las necesidades de este trabajo. Se realizará la adquisición de los datos del dispositivo seleccionado, mediante el desarrollo de una aplicación móvil, estos datos serán clasificados dependiendo del tipo de movimiento ya sea caminar, trotar o correr. Se debe mencionar que en esta fase se tendrá en cuenta el posicionamiento de sensores como en el trabajo realizado por Khan et al (2018). El resultado final de esto serán los datos clasificados dependiendo del tipo de movimiento y el posicionamiento de los sensores.

Fase 2 Selección de modelos para el gasto energético: En la fase dos se realizará el análisis de los diferentes modelos y métodos, para el cálculo del gasto energético que se reporta en

la literatura. Se considerarán aspectos como el costo computacional y el grado de exactitud de estos. El siguiente paso consta de seleccionar los modelos o métodos que se ajusten a las necesidades de esta investigación. Finalmente, cuando se hayan seleccionado los modelos o métodos se realizará la implementación en un prototipo el cual será utilizado en la siguiente fase.

Fase 3 Determinación del gasto energético: En esta fase se realizará el análisis y pruebas del prototipo implementado en un dispositivo móvil donde se deberá comparar contra los resultados presentes en el compendio de actividades físicas y su comparación con una técnica patrón. Esta técnica patrón podría ser la calorimetría indirecta con una máscara para la medición del consumo de oxígeno y exhalación de dióxido de carbono. Los resultados obtenidos deberán ser comparados estadísticamente y calcular el error cuadrático; para luego realizar correcciones sobre el prototipo para la medición del gasto energético.

Fase 4 Implementación del sistema: En esta fase se realizará el desarrollo del sistema para la medición de la actividad física en adultos mayores, se tomará como base el prototipo que se tendrá desarrollado en ese momento. El sistema implementado permitirá al adulto mayor tener un recuento de calorías gastadas, que tan activo es durante el día, igualmente esta información será accesible a su cuidador.

Fase 5 Pruebas en adultos mayores: En la última fase se realizarán tres pasos principales. El primero de ellos consiste en la selección y obtención de una muestra de adultos mayores, en la cual se aplicarán las pruebas de la aplicación desarrollada. El segundo paso son las pruebas finales para la validación de la aplicación y el método para el gasto energético. En el tercer paso se realizarán correcciones en el caso de que se presenten errores en la aplicación.

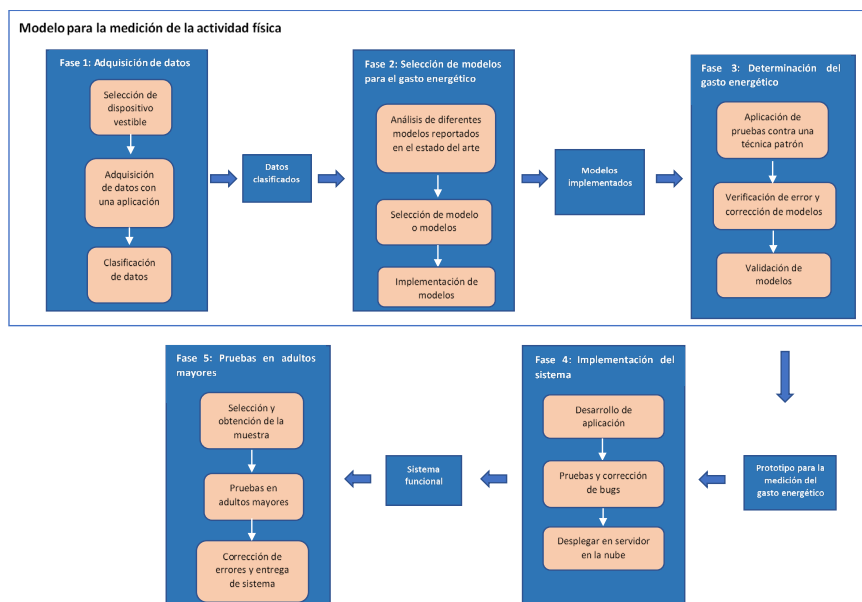


Ilustración 1 Fases para la medición del gasto energético

6. CONCLUSIONES

La medición de la actividad física es un punto crítico que podría ayudar a reducir la probabilidad de padecer enfermedades cardiovasculares y percibir una mejora en la condición física. El desarrollo de esta investigación permitiría una estimación del gasto energético.

La información generada es valiosa tanto para el adulto mayor; como para especialistas de la salud, debido a que permitiría realizar análisis correctos en la asignación de dietas y programas de acondicionamiento físico en adultos mayores (Caron et al., 2020). Así como promover una vida activa para el

adulto mayor gracias a una medida concisa como el gasto calórico en sus actividades diarias.

Como trabajos a futuro se realizarán más búsquedas de algoritmos para el cálculo del gasto energético. Se comenzará con la investigación de los diferentes sensores que se encuentren en el mercado, para la estimación del gasto energético y el análisis de estándares para sistemas de medición de gasto energético.

7. REFERENCIAS

- ActiGraph, L. (n.d.). *GT3X*.
<https://actigraphcorp.com/support/activity-monitors/gt3x/>
Ainsworth, B. E., Haskell, W. L., Whitt, M. C., Irwin, M. L., Swartz,

- A. M., Strath, S. J., O'Brien, W. L., Bassett, J., Schmitz, K. H., Emplainscourt, P. O., Jacobs, J., & Leon, A. S. (2000). Compendium of physical activities: An update of activity codes and MET intensities. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(9 SUPPL.). <https://doi.org/10.1097/00005768-200009001-00009>
- AINSWORTH, B. E., HASKELL, W. L., WHITT, M. C., IRWIN, M. L., SWARTZ, A. M., STRATH, S. J., O'BRIEN, W. L., DAVID R. BASSETT, J., SCHMITZ, K. H., EMPLAINCOURT, P. O., DAVID R. JACOBS, J., & LEON, A. S. (2013). Compendium of Physical Activities: an update of activity codes and MET intensities BARBARA. *Historical Semantics and Cognition*, 12, 61–89. <https://doi.org/10.1515/9783110804195.61>
- Arias-vázquez, P. I., Balam-de la Vega, V., Sulub-herrera, A., Carrillo-rubio, J. A., & Ramírez-meléndez, A. (2013). Beneficios clínicos y prescripción del ejercicio en la prevención cardiovascular primaria: Revisión. *Revista Mexicana De Medicina Y Rehabilitación*, 25(2), 63–72. <https://www.medigraphic.com/pdfs/fisica/mf-2013/mf132e.pdf>
- Attal, F., Mohammed, S., Dedabrishvili, M., Chamroukhi, F., Oukhellou, L., & Amirat, Y. (2015). Physical human activity recognition using wearable sensors. *Sensors (Switzerland)*, 15(12), 31314–31338. <https://doi.org/10.3390/s151229858>
- CamNtech, C. L. & (n.d.). *Activwave Motion*. <https://www.camntech.com/activwave-motion/>
- Carneiro, S., Silva, J., Aguiar, B., Rocha, T., Sousa, I., Montanha, T., & Ribeiro, J. (2015). Accelerometer-based methods for energy expenditure using the smartphone. *2015 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications, MeMeA 2015 - Proceedings*, 151–156. <https://doi.org/10.1109/MeMeA.2015.7145190>
- Caron, N., Peyrot, N., Caderby, T., Verkindt, C., & Dalleau, G. (2020). Estimating energy expenditure from accelerometer data in healthy adults and patients with type 2 diabetes. *Experimental Gerontology*, 134(December 2019), 110894. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2020.110894>
- Costill, D. L., & Wilmore, J. H. (2001). *FISIOLOGÍA DEL ESFUERZO Y DEL DEPORTE* (3rd ed.). Paidotribo. <https://profesoradonline.com/wp-content/uploads/2020/06/Fisiologia-del-Esfuerzo-y-del-Deporte-Jack-Wilmore-Costill.pdf>
- Farinola, M. (2010). Técnicas de valoración de la actividad física. *Calidad de Vida y Salud*, 3(2), 23–34.
- Farinola, M. G., & Lobo, P. R. (2017). *Técnicas De Medición De La Actividad Física En Investigaciones Argentinas : Necesidad De Incorporar Técnicas Objetivas*. 18, 9–19.
- Gaetano, A. (2016). Relationship between physical inactivity and effects on individual health status. *Journal of Physical Education and Sport*, 16(2), 1069–1074. <https://doi.org/10.7752/jpes.2016.s2170>
- GmbH, G. R., & Kasernenstraße. (n.d.). *ERGOSTIK*. <https://www.geratherm-respiratory.com/product-groups/cpet/ergostik/>
- Hans Rudolph, I. (n.d.). *Hans Rudolph 7450 Series V2 Mask*. <https://www.amronintl.com/hans-rudolph-7450-series-v2-mask.html>
- Hernández, A. L., Cortés, M. C. B., Barón, A. Á., Tinjaca, L. A. T., & Ávila, H. A. G. (2020). Tecnología vestible una ventaja competitiva en el entrenamiento deportivo. In *Tecnología vestible una ventaja competitiva en el entrenamiento deportivo* (Vol. 11, Issue 1). <https://doi.org/10.15332/dt.inv.2020.01161>
- Herrera, E., Pablos, A., Chiva-Bartoll, O., & Pablos, C. (2017). Effects of Physical Activity on Perceived Health and Physical Condition on Older Adults. *Journal of Sport and Health Research*, 9(1), 27–40. <http://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/166401>
- Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado ISSSTE. (2019). *Sedentarismo afecta al 58.3 por ciento de los mexicanos mayores de 18 años*. <https://www.gob.mx/issste/prensa/sedentarismo-afecta-al-58-3-por-ciento-de-los-mexicanos-mayores-de-18-anos?idiom=es>
- Khan, M. U. S., Abbas, A., Ali, M., Jawad, M., Khan, S. U., Li, K., & Zomaya, A. Y. (2018). On the Correlation of Sensor Location and Human Activity Recognition in Body Area Networks (BANs). *IEEE Systems Journal*, 12(1), 82–91. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2016.2610188>
- Kingsley, M. I. C., Nawaratne, R., O'Halloran, P. D., Montoye, A. H. K., Alahakoon, D., De Silva, D., Staley, K., & Nicholson, M. (2019). Wrist-specific accelerometry methods for estimating free-living physical activity. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 22(6), 677–683. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2018.12.003>
- Organización Mundial de la Salud OMS. (n.d.-a). *Inactividad física: un problema de salud pública mundial*. https://www.who.int/dietphysicalactivity/factsheet_inactivity/es
- Organización Mundial de la Salud OMS. (n.d.-b). *La actividad física en los adultos mayores*. https://www.who.int/dietphysicalactivity/factsheet_olderadults/es/#:~:text=presentan menores tasas de mortalidad,mejor masa y composición corporal
- Paramio-Pérez, G. (2017). Beneficios psicológicos de la actividad física y el deporte. *Revista de Educación, Motricidad e Investigación*, 7, 1. <https://doi.org/10.33776/remo.v0i7.3133>
- Pinheiro Volp, A. C., Esteves de Oliveira, F. C., Duarte Moreira Alves, R., Esteves, E. A., & Bressan, J. (2011). Gasto energético: Componentes y métodos de evaluación. *Nutrición Hospitalaria*, 26(3), 430–440. <https://doi.org/10.3305/nh.2011.26.3.5181>
- Redondo, R. B. (2015). Gasto energético en reposo; métodos de evaluación y aplicaciones. *Nutrición Hospitalaria*, 31, 245–254. <https://doi.org/10.3305/nh.2015.31.sup3.8772>
- Sabido Rangel, J. L., Apolo-Arenas, M. D., Montanero Fernández, J., & Caña-Pino, A. (2018). Measurement of energy expenditure in submaximal functional assessment tests through accelerometry. *Rehabilitación*, 52(4), 223–229. <https://doi.org/10.1016/j.rh.2018.06.003>
- Sirard, J. R., & Pate, R. R. (2001). Physical activity assessment in children and adolescents. *Sports Medicine*, 31(6), 439–454. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131060-00004>
- Tsukahara, M., Nakanishi, M., Izumi, S., Nakai, Y., Kawaguchi, H., & Yoshimoto, M. (2016). Low-power metabolic equivalents estimation algorithm using adaptive acceleration sampling. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS, 2016-Octob*, 1878–1881. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591087>
- Vargas, M., Lancheros, L., & Barrera, M. del P. (2011). GASTO ENERGÉTICO EN REPOSO Y COMPOSICIÓN CORPORAL EN ADULTOS. *Revista de La Facultad de Medicina*, 59, S43–S58.
- Xsens. (n.d.). *MTw: Easy Integration Of EMG And Wireless Inertial 3D Kinematics*. <https://www.xsens.com/press-releases/mtw-easy-integration-emg-wireless-inertial-3d-kinematics>

Desarrollo experimental de un sistema para la detección de caídas en adultos mayores

Manuel Erazo-Valadez * Javier Ortiz-Hernández **
Juan Antonio Miguel-Ruiz *** María Yasmín Hernández-Pérez ****

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico/CENIDET
(m20ce059@cenidet.tecnm.mx *, javier.oh@cenidet.tecnm.mx **, m20ce065@cenidet.tecnm.mx ***,
yasmin.hp@cenidet.tecnm.mx ****)

Resumen: En el presente artículo se realiza un análisis respecto a la importancia que tiene en la actualidad la detección de caídas en adultos mayores, indicando cuales son las causas que pueden incrementar la probabilidad de sufrir alguna caída y las consecuencias causadas tanto físicas como psicológicas. Se mencionan los diferentes tipos de sensores y los algoritmos que son utilizados para dar solución al problema de la detección de la caída. Se mencionan algunos dispositivos que han sido desarrollados para la detección de caídas y se realiza la propuesta de desarrollo de un sistema de detección que utiliza sensores vestibles e incorpore distintos tipos de sensores para detectar la caída.

Palabras clave: Caídas, detección de caídas, adulto mayor, sensores vestibles

1. INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera como acontecimientos involuntarios que hacen perder el equilibrio y dar con el cuerpo en tierra u otra superficie firme que lo detenga (Durán et al., 2017).

El envejecimiento acelerado de la población ha provocado que se genere un nuevo problema de salud pública: las caídas de personas de la tercera edad (da Silva-Gama & Gómez-Conesa, 2008). Se estima que durante un año suceden aproximadamente 37.3 millones de caídas por adultos mayores, provocando lesiones graves en las personas que las sufrieron (Silva-Fhon et al., 2019).

Estudios epidemiológicos han arrojado como resultado que una de cada tres personas mayores de 65 años, sufre una caída al año y la mitad de estas personas sufre más de una (Varas-Fabra et al., 2006). Las muertes como resultado de alguna caída de adultos mayores con edad de 65 años y mayores representan tres cuartas partes de las muertes por caída en los Estados Unidos (Rubenstein & Josephson, 2002).

La incidencia y la gravedad de los daños provocados por las caídas aumentan de acuerdo con la edad, ya que con la edad también se ve afectado el equilibrio y la reacción de las personas de la tercera edad (Kannus et al., 2014). Las consecuencias provocadas por las caídas pueden ser físicas y psicológicas. Las consecuencias físicas más comunes son inflamaciones provocadas por el golpe y las fracturas se presentan en un 6% del total de las caídas. Mientras que las consecuencias psicológicas más comunes son la pérdida de la

confianza en sí mismo y el miedo o ansiedad a sufrir de nuevo una caída (Varas-Fabra et al., 2006).

Las personas con edad de 65 años y mayores están más propensas a sufrir caídas. Por cuestiones de la edad pueden presentar diversas enfermedades crónicas y/o degenerativas como lo son los problemas cardiovasculares, trastornos del sistema nervioso y la osteoporosis las cuales pueden influir en la dificultad para caminar, pérdida de equilibrio y movimiento (Rubenstein & Josephson, 2002)(Zorrilla & Dahily, 2011).

Varios estudios han demostrado que la polimedicación también influye en las caídas. Personas que consumen tres medicamentos o más, tienen mayor probabilidad de sufrir una caída (Silva-Fhon et al., 2019)(Varas-Fabra et al., 2006)(Rubenstein & Josephson, 2002). Los medicamentos que elevan la probabilidad de sufrir una caída en las personas de la tercera edad son los siguientes: drogas psicotrópicas, sedantes, hipnóticos, antidepresivos, benzodiazepinas y neurolépticos (Rubenstein & Josephson, 2002)(Zorrilla & Dahily, 2011).

Se han detectado una gran variedad de factores extrínsecos e intrínsecos que se han asociado a las caídas que sufre este grupo de la población. Los factores extrínsecos más comunes son los relacionados con el ambiente del hogar y los intrínsecos detectados son: las discapacidades, enfermedades crónicas agudizadas, caídas previas, cambios del cuerpo provocados por la edad y la medicación múltiple. La presencia de dos o más de estos factores está relacionado con la probabilidad de que ocurra una caída (De et al., 2002).

En México residen 15.4 millones de personas con una edad de 60 años o mayor, de las cuales 7.4 millones viven solas. El 41.4% son económicamente activos, mientras que el 69.4 sufre de alguna discapacidad (Nacional & Unidas, 2020).

2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE DETECCIÓN DE CAÍDAS

2.1 Sistemas de detección de caídas basados en monitoreo ambiental

En esta categoría se incluyen los sistemas de detección que utilizan sensores los cuales son instalados alrededor del entorno del usuario y son los encargados de monitorear las actividades que realizan las personas diariamente. Las tecnologías más utilizadas en este tipo de detectores son los sensores infrarrojos y los que utilizan cámaras para monitoreo (Pérolle & Etxeberria Arritxabal, 2006).

Ventajas:

- Sensores instalados en un lugar establecido.
- Se evitan los problemas de autonomía.

Desventajas

- Los muebles del lugar, personas u otros objetos pueden afectar la precisión de la detección de la caída.
- Se deben de instalar demasiadas tecnologías para evitar puntos ciegos dentro de cada una de las habitaciones.
- El elevado costo de implementación.

2.2 Sistemas de detección de caídas basados en dispositivos portátiles

En esta categoría se incluyen los sistemas de detección que utilizan dispositivos sensores que puede llevar una persona sin afectar las actividades que desarrolla durante su vida diaria. Estos sistemas son divididos entre los que utilizan acelerómetros y los que utilizan otro tipo de sensores (Pérolle & Etxeberria Arritxabal, 2006).

Ventajas:

- Normalmente se utiliza un solo dispositivo.
- Monitoreo constante.
- Los muebles, personas u otros objetos no afectan su funcionamiento.

Desventajas:

- La autonomía del dispositivo ya que necesitan una fuente de alimentación.

- El usuario debe de recordar colocarse el dispositivo correctamente.

3. SISTEMAS DE DETECCIÓN DE CAÍDAS

3.1 Red inalámbrica de sensores inerciales para el registro y procesamiento de movimientos corporales

En este trabajo se propone el sistema *Wagyromag (Wireless Accelerometer, Gyroscope and Magnetometer)*. El dispositivo desarrollado es un nodo sensor inalámbrico que incluye acelerómetro, giroscopio y magnetómetro triaxiales. Este trabajo no está enfocado solamente en la detección de caídas, también puede ser utilizado para telerehabilitación, el análisis del movimiento en el deporte y la detección de crisis nocturnas de epilepsia.

No se consideró el envío de alguna señal de alerta en el momento que se realiza la detección de la caída. El sistema realiza la detección mediante las variaciones de inclinación que son detectadas por los tres tipos de sensores con los que cuenta (Olivares Vicente et al., 2014).

3.2 Ángel4

Ángel4 es un dispositivo personal comercial desarrollado por la empresa SENSE4CARE. Proporciona una detección automática de caídas utilizando un acelerómetro triaxial y un algoritmo, el cual no es especificado.

El dispositivo se coloca en la cintura mediante un cinturón especial o un clip diseñado para sostenerlo. El sensor de detección puede conectarse al sistema de teleasistencia, al centro de salud o a un teléfono inteligente mediante una conexión Bluetooth y cuenta con una aplicación móvil la cual facilita su uso y personalización.

Cuando se detecta una caída se le permite al usuario cancelar el envío de la alerta durante una ventana de tiempo, si la alerta no es cancelada el sistema realiza una llamada de emergencia y envía mensajes detallando que se detectó una caída y la ubicación GPS donde sucedió.

El sistema es utilizado en distintas situaciones: Realizar algún deporte de riesgo (montañismo, ciclismo, etc.), monitorear a personas que viven solas, personas que realicen algún tipo de rehabilitación y personas que tengan algún problema de movilidad (SENSE4CARE, n.d.).

3.3 Detección de caídas mediante teléfonos inteligentes para mejorar la seguridad de los adultos mayores en el hogar

Los teléfonos inteligentes ofrecen ventajas de bajo costo y fácil disponibilidad, lo que hace que sea sencillo el proceso de despliegue de los sistemas de detección de caídas.

En este trabajo la detección de caídas se efectúa analizando de manera continua los cambios de aceleración y comparando las mediciones con respecto a ciertos umbrales previamente establecidos para determinar si se trata o no de una caída. Es decir, se observa y detecta el cambio de aceleración en el eje vertical y el valor promedio de la magnitud de la señal del vector de aceleración para diferenciar la caída de otras actividades de la vida diaria. Se utilizó el algoritmo Acceleration Change-based Falls Detection Algorithm (ACFDA) desarrollado por el mismo autor. Fue puesto a prueba utilizando dos conjuntos de datos que fueron recopilados con ayuda de dos teléfonos inteligentes, el Google Nexus 4 y el ZTE Nubia NX511j.

La recopilación de los datos se hizo mediante los sensores internos integrados en los teléfonos inteligentes. En esta investigación solo se tomó en cuenta la información de los acelerómetros de cada uno de los celulares. Después de recopilar los datos de la aceleración, se normalizaron con la unidad de gravedad (g). La normalización se realizó con ayuda de la aplicación *Physics Toolbox Accelerometer* instalada en los teléfonos inteligentes utilizados (Nguyen et al., 2019).

4. TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN DE CAÍDAS MEDIANTE EL USO DE ACELERÓMETROS

4.1 Basadas en redes neuronales

Implementan una red neuronal que utiliza los datos recopilados para su clasificación de dos maneras: actividad normal o caída. Se construye una red de avance que se compone por 3 capas donde cada una de ellas cuenta con 5 neuronas. La figura 1 muestra la estructura que tiene la red neuronal utilizada en el trabajo.

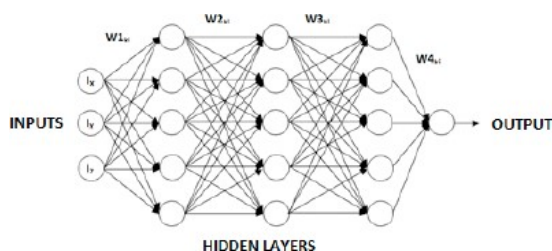


Figura 1: Estructura de la red neuronal utilizada para la detección de caídas (Vallejo et al., 2013)

Para probar el funcionamiento de la red se utilizó un conjunto de datos recopilados por un dispositivo capaz de enviar los

datos de la aceleración a una computadora donde se realiza el proceso de detección de caídas.

El conjunto de datos almacenados fue separado en dos partes, el primer subconjunto de datos incluye los datos de 329 caídas y 392 de actividades que realiza el usuario en su vida diaria y fue utilizado para entrenar la red. El segundo subconjunto de datos contiene los datos de 216 caídas y 250 actividades de la vida diaria, este subconjunto fue utilizado para probar el funcionamiento de la red neuronal después de haber sido entrenada. Los resultados de las pruebas realizadas se presentan en la tabla 1 (Vallejo et al., 2013).

Tabla 1. Error en entrenamiento y prueba

Porcentaje de error de entrenamiento	1.25%
Porcentaje de error de prueba	1.07%
Porcentaje de caídas no detectadas en entrenamiento	1.52%
Porcentaje de caídas no detectadas en pruebas	1.86%

4.2 Basadas en la detección de las etapas de la caída

Toman en cuenta los estados por los que pasa la persona antes, durante y después de sufrir una caída.

A continuación, se mencionan las cuatro etapas de la caída:

1. Caída libre: Este estado hace referencia al momento en el que inicia todo tipo de caída, donde el cuerpo se aproxima hacia el suelo con una aceleración vertical semejante a la gravedad.
2. Impacto: Esta etapa se refiere al momento en el que el cuerpo choca contra el suelo u otros objetos.
3. Reposo: Esta etapa toma en cuenta el tiempo de reposo que se presenta después de haber sufrido una caída. Normalmente el tiempo de reposo es menor que 10 segundos (s), si el tiempo en esta etapa se puede determinar que la persona puede estar inconsciente.
4. Posición Horizontal: En esta etapa se verifica la posición del cuerpo después de haber sufrido una caída (Jia, 2011).

En la figura 2 se muestran las 4 etapas y cambios de aceleración por los que pasa una persona durante la caída. En la gráfica se pueden apreciar las etapas detectadas en los cambios de aceleración que las caracteriza. En la gráfica se toman en cuenta el valor de la aceleración relacionada con la unidad de gravedad (g) y el tiempo que transcurre en segundos (s).

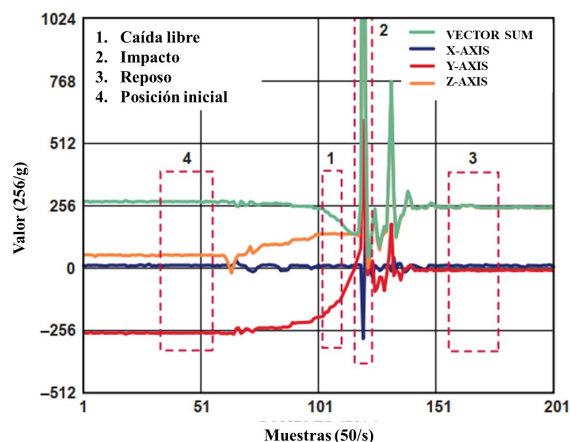


Figura 2: Estados de la caída y cambios de aceleración (Jia, 2011).

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL PROPUESTO

Se busca desarrollar un método que pueda ser utilizado para la detección de caídas en adultos mayores considerando las mejores prácticas encontradas. Adicionalmente, se hará un análisis y valoración documental y experimental de otros tipos de sensores vestibles que puedan ser utilizados para realizar la detección de la caída. Lo que se busca es reducir el margen de error, ya que se necesita poder diferenciar entre una caída y algún evento similar (caminar o agacharse) que por sus características pueda ser confundido como una caída.

El objetivo de esta investigación es desarrollar un sistema para la detección de caídas de adultos mayores y el envío de su notificación por medios digitales hacia personas previamente determinadas.

Dentro de las funcionalidades que tendrá el sistema será un botón de fácil acceso para el adulto mayor, con el cual se podrá cancelar el envío de la alerta en caso de no necesitar alguna asistencia médica o por parte de la persona que está encargada de él. Otra función del botón es activar el envío de la alerta por si se presenta alguna emergencia que no se haya detectado.

Se contará con una aplicación móvil para que tanto el adulto mayor y la persona encargada pueda consultar el nivel de las baterías del dispositivo que se esté utilizando y consultar algunas estadísticas como la reiteración de las caídas que se ha sufrido, el tipo de caída que más se ha sufrido, etc.

Para cumplir con este objetivo se proponen las siguientes fases:

Fase 1. Desarrollo del modelo dinámico que caracteriza los tipos de caídas que puede sufrir un adulto mayor: En esta fase se va a realizar un estudio para comprender el fenómeno de

la caída, sus etapas, sus características, etc. para construir un modelo dinámico.

Fase 2. Desarrollar el modelo computacional del fenómeno de la caída: En esta fase, se utilizará el modelo dinámico generado en la fase anterior para generar un modelo computacional, el cual pueda ser utilizado para realizar la detección de los distintos tipos de caídas.

Fase 3. Diseño de la arquitectura propuesta: En esta fase se realizará el diseño de la arquitectura a utilizar para el desarrollo del sistema. El diseño estará basado en la arquitectura propuesta en (Ortiz-hernandez et al., 2020), la cual tiene como objetivo ser implementada en proyectos de IoT. Esta arquitectura es muy útil para este tipo de proyectos ya que contempla el almacenamiento y el manejo de los datos.

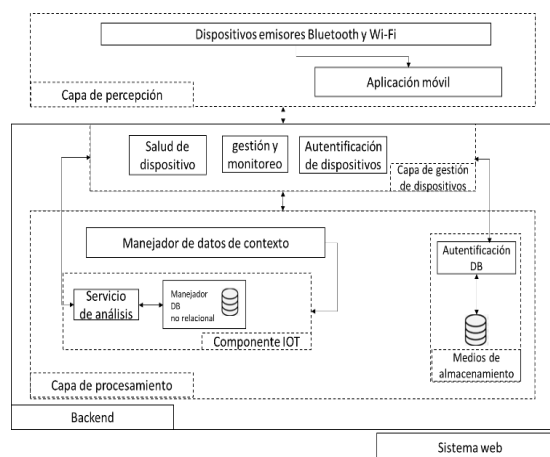


Figura 3: Arquitectura propuesta en el artículo (Ortiz-hernandez et al., 2020)

Fase 4. Desarrollo del sistema de detección de caídas: Durante esta fase se llevará a cabo el desarrollo del sistema de detección de caídas siguiendo la arquitectura generada en la fase anterior. Al llegar a esta fase ya se debe de conocer las tecnologías a utilizar y los sensores que se van a implementar para realizar la detección.

Fase 5. Pruebas: Durante esta fase se llevarán a cabo las pruebas del sistema de detección de caídas. Las pruebas se realizarán en un lugar controlado y con ayuda de personas jóvenes y sanas que puedan simular los diferentes tipos de caídas, que puede sufrir un adulto mayor y ayudarán a evaluar la arquitectura propuesta, el comportamiento de los sensores utilizados y la efectividad en la detección de las caídas.

Las pruebas determinarán los valores para las siguientes variables que serán utilizadas para evaluar el funcionamiento del sistema:

- Verdaderos positivos (VP): número de caídas que se detectaron como caídas.
- Verdaderos negativos (VN): número de no caídas que fueron detectadas como no caídas.
- Falsos positivos (FP): número de no caídas que fueron detectadas como caídas.
- Falsos negativos (FN): número de caídas que fueron detectadas como no caídas.

Los valores mencionados anteriormente se utilizarán para calcular la precisión y la especificidad. Para calcular la precisión del sistema se utiliza la ecuación 1, en la cual, los verdaderos positivos se dividen entre la suma de los verdaderos positivos y los falsos positivos.

$$\frac{VP}{VP + FN} \quad (1)$$

Para calcular la especificidad que tenga el sistema se utilizará la ecuación 2, en la cual, se utilizan los valores de los verdaderos negativos que se dividen entre la suma de los falsos positivos y los verdaderos negativos.

$$\frac{VN}{FP + VN} \quad (2)$$

6. CONCLUSIÓN

Debido a que en la actualidad se ha incrementado la población de adultos mayores sea incrementado la necesidad de tener soluciones a problemas que presenta esta parte de la población a nivel mundial. Lo que se busca con este tipo de soluciones es ayudarlos a poder vivir más tiempo de forma autónoma y mejorar su forma de vivir.

La detección de caídas se ha vuelto un tema muy importante, ya que se pueden evitar consecuencias graves que son producto de la tardanza en el auxilio de las personas mayores que sufrieron la caída. Las opciones en cuanto a detectores de caídas son muy limitados y de difícil acceso para las personas.

En el desarrollo del sistema de detección de caídas se buscará combinar tecnologías que son utilizadas actualmente en los detectores de caídas, como lo puede ser la interacción entre los datos de distintos sensores para buscar incrementar la precisión de la detección de la caída.

REFERENCIAS

- da Silva-Gama, Z. A., & Gómez-Conesa, A. (2008). Factores de riesgo de caídas en ancianos : revisión sistemática
Risk factors for falls in the elderly : *Rev Saúde Pública*, 42(5), 946–956.
- De, S. P., Hernández, S., Moctezuma, A., Rodrigo, G., Ortega, G., & María, R. (2002). Caídas en el adulto mayor. Factores intrínsecos y extrínsecos. *Revista Medica Del Instituto Mexicano Del Seguro Social*, 40(6), 489–493.
- Durán, E. R., Camarero, G. F. R., & Martínez-Esparza, E. H. (2017). Incidencia y características de las caídas en un hospital de cuidados intermedios de Barcelona. *Gerokomos*, 28(2), 78–82.
- Jia, N. (2011). Accelerometer, Detecting Human Falls with a 3-Axis Digital. *Analog Dialogue*, 3–9.
- Kannus, P., Parkkari, J., Koskinen, S., Niemi, S., Palvanen, M., Järvinen, M., & Vuori, I. (2014). *Fall-Induced Injuries and Deaths Among Older Adults*. 281(20), 1895–1899.
- Nacional, E., & Unidas, N. (2020). Comunicado De Prensa Núm . 337 / 19 10 De Julio De 2019 “ Estadísticas a Propósito Del ... Día Mundial De La Población (11 De Julio) .” *INEGI*, 337(19), 1–13.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2020/Poblacion2020_Nal.pdf
- Nguyen, H., Zhou, F., Mirza, F., & Nacem, M. A. (2019). Fall Detection Using Smartphones to Enhance Safety and Security of Older Adults at Home. *2018 11th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network, ICMU 2018*, 4–5.
<https://doi.org/10.23919/ICMU.2018.8653613>
- Olivares Vicente, A., Olivares Ruiz, G., & Gómez Mula, F. (2014). Wagyromag : red inalámbrica de sensores inerciales para el registro y procesamiento de movimientos corporales Wagyromag : red inalámbrica de sensores inerciales para el registro y procesamiento de movimientos corporales. *Universidad de Granada, Junio*.
- Ortiz-hernandez, J., Miguel-ruiz, J. A., Erazo-Valadez, M., Martinez-rebollar, A., Mejia-lavalle, M., & Torres-restrepo, L. (2020). A Lightweight Framework for IoT Smart Solutions. *Por Publicar*.
- Pérolle, G., & Etxeberria Arritxabal, I. (2006). Detector automático de caídas y monitorización de actividad para personas mayores. *Revista Española de Geriatria y Gerontología*, 41(Supl 2), 33–41.
[https://doi.org/10.1016/s0211-139x\(06\)73006-2](https://doi.org/10.1016/s0211-139x(06)73006-2)

- Rubenstein, L. Z., & Josephson, K. R. (2002). The epidemiology of falls and syncope. *Clinics in Geriatric Medicine*, 18(2), 141–158. [https://doi.org/10.1016/S0749-0690\(02\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0749-0690(02)00002-2)
- SENSE4CARE. (n.d.). *ANGEL4*. Retrieved March 10, 2021, from <https://www.sense4care.com/fall-detection/>
- Silva-Fhon, J. R., Partezani-Rodrigues, R., Miyamura, K., & Fuentes-Neira, W. (2019). Causas y factores asociados a las caídas del adulto mayor Causes and factors associated to falls among the Elder Causas e fatores associados a quedas no idoso. *Enfermería Universitaria*, 16(1).
- Vallejo, M., Isaza, C. V., & Lopez, J. D. (2013). Artificial Neural Networks as an alternative to traditional fall detection methods. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, 1, 1648–1651. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2013.6609833>
- Varas-Fabra, F., Castro Martín, E., Pérula De Torres, L. Á., Fernández Fernández, M. J., Ruiz Moral, R., & Enciso Berge, I. (2006). Caídas en ancianos de la comunidad: Prevalencia, consecuencias y factores asociados. *Atencion Primaria*, 38(8), 450–455. <https://doi.org/10.1157/13094802>
- Zorrilla, A., & Dahily, G. (2011). Aspectos sociodemográficos de las caídas en ancianos atendidos por un Grupo Básico de Trabajo. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 44(8), 51. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>

Análisis del uso de sensores LiDAR y RGB-D para la detección de objetos durante el desplazamiento vehicular

Andrea Palacios Cervantes* Dante Mújica-Vargas*

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca-Morelos, México m20ce086@cenidet.tecnm.mx, dante.mv@cenidet.tecnm.mx.

Abstract:

Es fundamental conocer los alcances y beneficios de los sensores de percepción como RGB-D y LiDAR, dado que son los más utilizados en el ámbito de la conducción autónoma para la detección de objetos. En esta investigación se realizaron varias simulaciones, desarrolladas en el entorno de MATLAB donde se analizó su funcionamiento de forma separada y simultánea, con el fin de demostrar el rendimiento de combinar dichos sensores para la obtención de datos en forma más rápida y precisa.

Keywords: RGB-D, LiDAR, detección de objetos

1. INTRODUCCIÓN

En un vehículo autónomo el uso de sensores es conveniente para la detección de los objetos que hay en su entorno. Actualmente algunos vehículos cuentan con algún sensor de visión instalado para apoyar en las tareas de visión, localización y algunos casos de conducción. Un ejemplo son los autos Tesla que disponen de un total de ocho cámaras que se encuentran distribuidas, cuatro en la parte delantera y cuatro en la parte trasera del vehículo (Li et al., 2018). Este artículo está dedicado al aprovechamiento de los sensores LiDAR y RGB-D en las tareas de detección durante el desplazamiento vehicular.

La aplicación de sensores LiDAR para la detección de objetos ha apoyado con el desarrollo de diferentes trabajos de investigación, como el caso del investigador Weon, quien desarrolló un algoritmo de fusión con sistemas 3D LiDAR que reciben objetos detectados por sensores basados en aprendizaje profundo (Weon et al., 2020). Además el investigador Rozsa utilizó los datos adquiridos por LiDAR para perfeccionar un método de detección y categorizar obstáculos (Rozsa and Sziranyi, 2018).

En el caso de los sensores RGB-D, su aplicación también se encuentra enfocada a la detección de objetos. El investigador Tsai empleó estos sensores para el diseño de un método de reconocimiento simultáneo de objetos en 3D (Tsai and Tsai, 2018). Igualmente el investigador Dussan aprovechó los datos recabados por este sensor para la creación de mapas en 3D aplicando métodos de detección (Dussan Narvaez et al., 2020).

Ambos sensores son principalmente utilizados para la detección de objetos en 3D por medio de automóviles

o robots. Los datos adquiridos, son aprovechados para el diseño de métodos que permiten identificar objetos, conocer dimensiones, aplicar maniobras de movimiento y reconstrucción mapas en 3D. Sin embargo, LiDAR presenta un problema de ruido cuando las partículas como las gotas de lluvia y el polvo se hacen presente y afectan las mediciones del sensor. Por lo que es necesario de la fusión con otro sensor que disminuya el ruido generado y la detección sea más confiable y precisa. Mientras que por el lado de los sensores RGB-D, el alcance del sensor llega a ser corto y con baja calidad, por lo cual los datos adquiridos necesitan pasar por métodos de refinación y se recomienda fusionar con otro sensor.

En este trabajo se desarrolla una simulación de un automóvil, que utiliza de forma simultánea los sensores LiDAR Y RGB-D, con el fin de demostrar el beneficio de usar ambos sensores para reducir el ruido, obtener una mejor precisión de los datos, mayor alcance, mayor velocidad y mejorar la calidad de la detección de objetos durante el desplazamiento vehicular.

El resto del documento se encuentra organizado de la siguiente manera. En la segunda sección, se presentan algunos conceptos teóricos. En la tercera sección, se explica los elementos desarrollados para la propuesta. En la cuarta sección se explica los experimentos realizados. Finalmente en la quinta sección se encuentra la conclusión del trabajo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Conducción autónoma.

La conducción autónoma es una tecnología compleja que está compuesta por muchos sub-sistemas con 3 componentes principales que son: el seguimiento, la percepción y la planificación. En cada componente participan diferentes tecnologías y tareas como se observa en la Figura 1 que tienen como objetivo el apoyar la realización de una conducción autónoma segura (Liu et al., 2020).

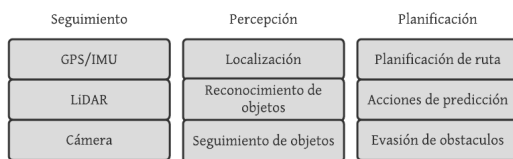


Fig. 1. Componentes que se involucran en la conducción autónoma

El seguimiento es el primer componente en actuar para recabar la información que será procesada y utilizada en los siguientes dos componentes. En esta parte se hace uso de sensores que se encargaran de detectar y transformar las magnitudes físicas.

2.2 Sensor LiDAR

Los sensores LiDAR se utilizan para el mapeo, localización y evasión de obstáculos por medio de una percepción inteligente de objetos 3D. La información que el sensor detecta a través de una nube de puntos de forma rápida y precisa, teniendo como principal tarea el detectar la curva de un objeto que posteriormente pasará a ser una *multi-frame* de la curva que se ha proyectado para finalmente obtener el contorno de la extracción (Gong et al., 2020).

Las nubes de puntos generados por LiDAR proporcionan una descripción del entorno que escanea, pero es muy difícil diferenciar los puntos individuales. En el caso de un vehículo en movimiento los mapas producidos con LiDAR, se les aplica un método de filtrado de partículas para correlacionar la información y lograr una localización en tiempo real con 10 cm de precisión y eficacia en entornos urbanos (Liu et al., 2020).

Matemáticamente un punto es simplemente una tupla incorporada con varios atributos y se representa como podemos observar en (1) (Li et al., 2019):

$$p_i = xi, xy, x, z, Ii, \dots \quad (1)$$

Donde xi, xy, x, z, Ii representan las coordenadas espaciales de cada atributo.

La colección de puntos en una nube de puntos se representa en (2):

$$P = p1, p2, p2, pi, \dots pi \quad (2)$$

2.3 Sensor RGB-D

Los sensores RGB-D son un tipo de dispositivo de detección de profundidad que funciona en asociación con los colores rojo, verde y azul. La información de profundidad proporciona una contribución importante para la detección de objetos, el análisis de escenas, estimación de pose, seguimiento visual, segmentación semántica, análisis de formas y reconstrucción en 3D (Zhang et al., 2019).

Las detecciones que se realicen por medio de radar a partir de las posiciones y velocidad en la que se encuentre el objeto cercano al vehículo Ego, se calculará ángulo de estimación basado en el movimiento utilizando (3) y (4) (Park et al., 2020).

$$(X_t, Y_t) = (X_{ego}, Y_{ego}) + \mathbf{R}(\Psi_{ego}) \cdot (x_t, y_t)^T \quad (3)$$

Donde $\mathbf{R}$ es la rotación de la matriz, (x, y) son las coordenadas del vehículo ego, (X, Y) son las coordenadas mundiales y $(x_t, y_t)^T$ coordenadas de los objetos.

$$\Psi_{target} = \tan^{-1} \left(\frac{Y_t - Y_{t-1}}{X_t - X_{t-1}} \right) \quad (4)$$

donde Ψ_{target} es el ángulo del objeto detectado y $(X_t, Y_t)^T$ coordenadas de los objetos.

3. PROPUESTA

Para comprobar la eficiencia y aumento de la percepción del ambiente durante el desplazamiento vehicular de un sensor LiDAR al trabajar en conjunto con un sensor RGB-D (ver Figura 2), se desarrolló una simulación en el entorno de MATLAB. Dentro de la simulación se consideró una pista de forma semi-circular (ver Figura 3) de dos carriles y con 4 objetos diferentes.

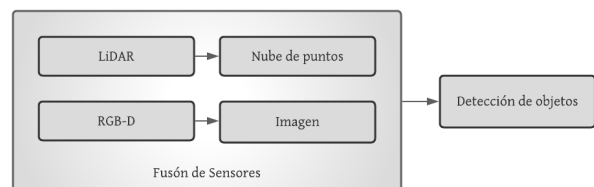


Fig. 2. Esquema de fusión de sensores

Los 4 objetos colocados en la pista (ver Figura 4), se encuentran programados cada uno con una trayectoria y velocidad diferente. Los objetos que se encuentran involucrados son:

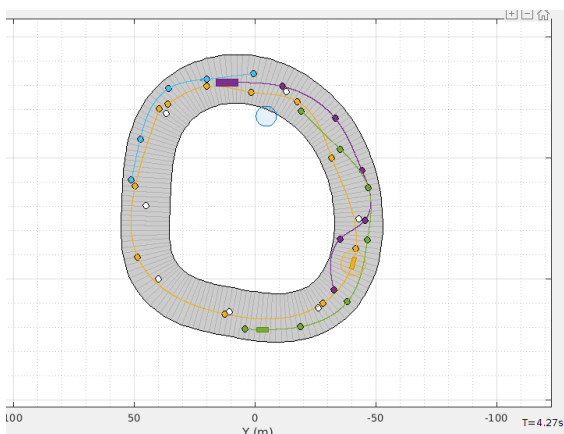


Fig. 3. Pista en la simulación de MATLAB



Fig. 4. Actores dentro de la simulación, Auto Ego en color amarillo, un camión en color morado, vehículo particular en verde y una bicicleta en color azul

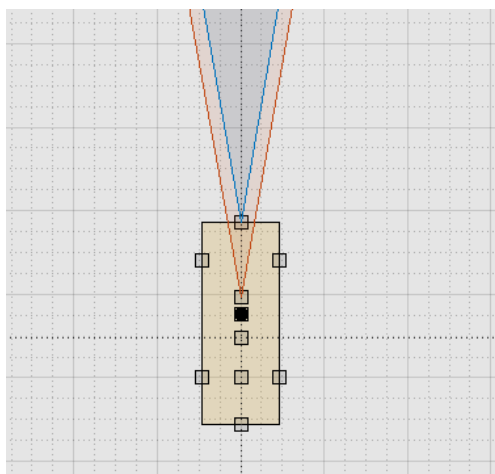


Fig. 5. Auto Ego con el sensor LIDAR de color azul y el sensor RGB-D representado con color naranja

- Vehículo Ego: Se le conoce como vehículo ego al sujeto, objeto o actor principal durante la experimentación. Este vehículo se encontrará equipado con los sensores LiDAR y RGB-D (ver Figura 5). Su trayectoria durante la simulación es sobre un único carril y se encuentra marcada por los puntos amarillos en que se muestran en la Figura 3, la velocidad de desplazamiento es de 30 m/s, recorre todo el circuito

y se encuentra una sola vez con los otros 3 objetos.

- Camión: Este objeto se localiza en la parte inferior derecha de la pista y su trayectoria comienza en el mismo carril que el vehículo ego. Sin embargo, durante su desplazamiento su trayectoria cambiará al carril contrario y su recorrido será más corto. La trayectoria está marcada por los puntos morados que se muestran en la Figura 3, la velocidad de desplazamiento es de 30 m/s y solo se encuentra una sola vez con 2 objetos durante su recorrido.
- Vehículo particular: Este objeto se ubica en la parte superior derecha de la pista, su trayectoria comenzará a unos metros más adelante que el vehículo ego y cambiará de carril durante el desplazamiento. Su trayectoria se encuentra marcada por los puntos verdes en la Figura 3, su velocidad de desplazamiento es de 30 m/s, solo se encuentra una vez con 2 objetos y su recorrido es corto.
- Bicicleta: Este objeto aparece en el centro de la pista, su velocidad de desplazamiento es de 5 m/s y su trayectoria es sobre un solo carril. Los puntos de color azul que se muestran en la Figura 3, son su trayectoria marcada y será de los objetos que tendrá el recorrido más corto, así como también solo se encontrará con el vehículo ego al final de su recorrido.

4. EXPERIMENTACIÓN

Los experimentos realizados se dividieron en 3 partes: la primera es utilizando solamente el sensor LiDAR, la segunda es solo con el sensor RGB-D y la última parte es combinando ambos sensores.

4.1 Experimentación con LiDAR

En el escenario mencionado en la sección anterior y que se puede apreciar en la Figura 3, se colocó el vehículo Ego solo utilizando el sensor LiDAR con las siguientes especificaciones:

- Alcance del escáner 100 m
- Precisión 0.002 m
- Elevación 1.25 m

Durante las pruebas realizadas el vehículo recorrió la ruta establecida. En la Figura 6 se observa como se extiende el escáner del sensor mientras este se encuentra en movimiento e inicia la detección de su entorno a través de los pulsos que emiten del sensor y son representadas por las líneas que se muestran dentro de la Figura 6.

El desplazamiento del vehículo fue constante mientras que se encontraba con los tres objetos colocados, realizando el escaneo de cada uno y obteniendo como resultado un tiempo constante que se registró en un arreglo que contiene los puntos detectados de cada objeto. En la Figura 7 podemos observar el tiempo registrado, mientras

que el auto se encontraba en movimiento, demostrando ser constante.

Ahora bien, el resultado final de la detección de los objetos por medio la nube de puntos aún necesitan de pasar por un proceso de filtración por medio de algoritmos de filtración y depuración, para reconocer cada uno de ellos y disminuir el ruido que pudo ser generado por las partículas en el ambiente.

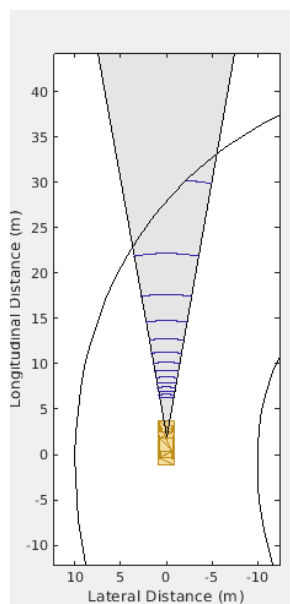


Fig. 6. Auto Ego con el sensor LiDAR

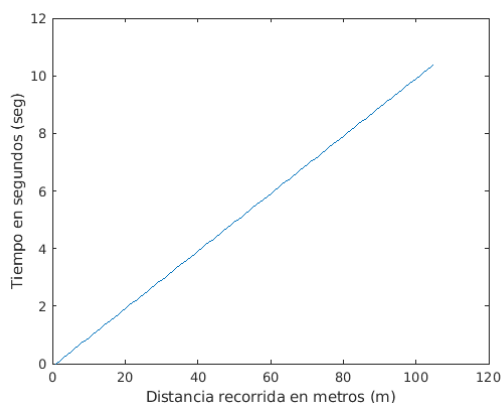


Fig. 7. Gráfica del Tiempo de detección de LiDAR

4.2 Experimentaciones con RGB-D

En este caso el vehículo ego se puso en marcha en el escenario que se aprecia en la Figura 3 de la sección anterior, únicamente con el sensor RGB-B y con las siguientes especificaciones:

- Precisión: 0.9 m
- Alcance 100 m
- Elevación 1.5 m

En la Figura 8 se observa el alcance del sensor mientras el vehículo se encuentra en movimiento y logra percibir que aunque esté en funcionamiento, solo comienza con la identificación al entrar en contacto con un objeto. La identificación de los objetos como se aprecia en la Figura 8, se realiza a través de puntos y líneas que marca el sensor.

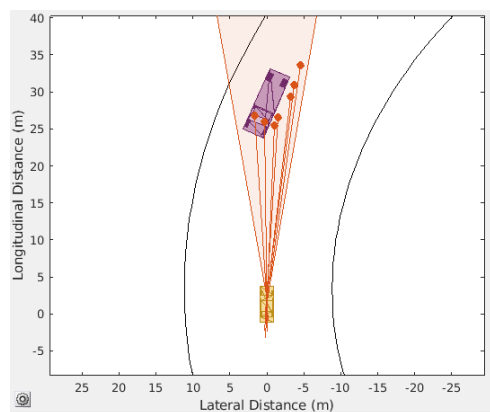


Fig. 8. Auto Ego con el sensor RGB-D

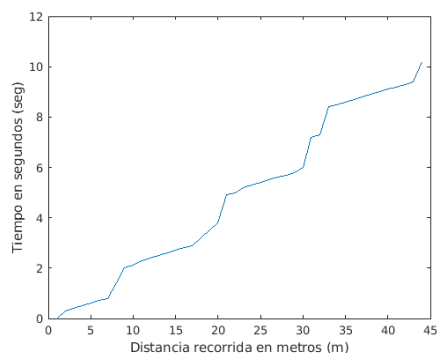


Fig. 9. Gráfica del tiempo con RGB-D

Los resultados obtenidos y que fueron graficados en la Figura 9 al finalizar la simulación, el tiempo es más prolongado que LiDAR y menos constante, pues requiere un poco más de tiempo en marcar con puntos los objetos que detecta en el camino.

El tiempo es mayor y aunque con RGB-D se tienen un poco más detalle de las celdas de los objetos, aún debe aplicarse algoritmos que disminuyan el ruido y aumente la velocidad de la detección de objetos.

4.3 Experimentación con LiDAR y RGB-D

En este último caso se colocó el vehículo ego en la pista que se muestra en la Figura 3 de la sección anterior, con las siguientes especificaciones para el sensor RGB-D y LiDAR:

Especificaciones de LiDAR:

- Alcance del escáner 100 m
- Precisión 0.002 m
- Elevación 1.25 m

Especificaciones de RGB-D

- Precisión: 0.9 m
- Alcance 100 m
- Elevación 1.5 m

En la Figura 10 se puede observar el aumento del alcance de los sensores combinados, pues tanto LiDAR como RGB-D están trabajando constantemente mientras se encuentran en movimiento. Con LiDAR se proporciona una mejor visibilidad y mayor rango de percepción y por el lado de RGB-D se define e identifica mejor el objeto escaneado.

El tiempo de detección, también demostró tener una mejora al ser obtenidos en forma más rápida y eficiente como se muestra en la Figura 11. La línea que se imprime en la Figura 11, si se aprecia con detalle se puede notar pequeñas protuberancias, que son parecidas a la Figura 9, en cambio, estas son más pequeñas, ya que el tiempo para marcar y definir los objetos está siendo compensado por LiDAR, es decir, que el escaneo de LiDAR permite que RGB-D identifique mejor y en menor tiempo los objetos.

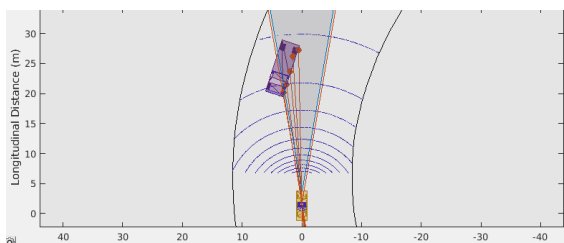


Fig. 10. Auto Ego con el sensor RGB-D y LiDAR

Además de que la información recabada de los objetos por parte de la nube de puntos del sensor LiDAR y las celdas detectadas por el sensor RGB-D, permiten identificar mejor los 3 actores durante la simulación. No obstante, para apreciar datos más precisos y hacer uso de ellos, es necesario aplicar algoritmos de aprendizaje que permitan definir mejor los datos de los objetos y reducir el ruido que podría estar presente.

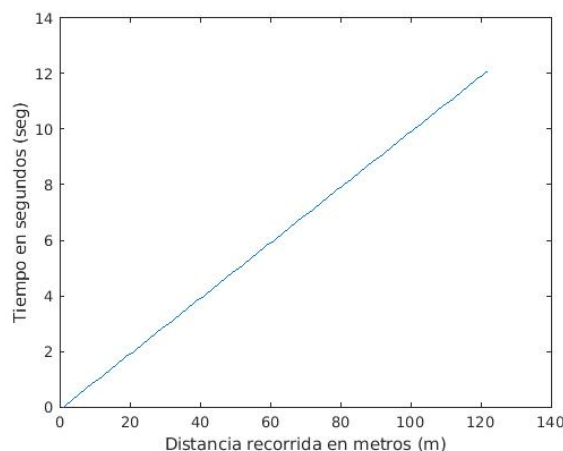


Fig. 11. Tiempo de detección de sensores RGB-D y LiDAR

5. CONCLUSIÓN

En conclusión, después de las experimentaciones realizadas con ambos sensores en una simulación, en cada caso demuestran ser altamente capaces de reconocer los objetos que se encuentran alrededor mientras el vehículo se encuentre en movimiento. No obstante en ambas ocasiones el tiempo y el ruido producido puede ser un gran factor para que la detección de objetos no sea tan precisa y sea necesario la implementación de un algoritmo que reduzca el ruido. Sin embargo, al trabajar ambos sensores en conjunto se demostró que son favorables para contrarrestar fallas y mejorar la calidad de vista, así como perfecciona el tiempo de reacción, que es importante si estos sensores se utilizan en un vehículo en movimiento.

Finalmente ambos son recomendables para ser utilizados en el área de investigación para la detección de objetos en un vehículo, dejando en claro que las experimentaciones fueron solo realizadas a un nivel de simulación virtual, aunque se espera que los resultados obtenidos sean igual de satisfactorios si se llevarán a cabo al campo real.

REFERENCES

- Dussan Narvaez, G.A., Mosquera Victoria, C.A., et al. (2020). Detección y seguimiento de múltiples objetos en tiempo real para vehículos autónomos.
- Gong, Z., Lin, H., Zhang, D., Luo, Z., Zelek, J., Chen, Y., Nurunnabi, A., Wang, C., and Li, J. (2020). A frustum-based probabilistic framework for 3d object detection by fusion of lidar and camera data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 90–100.
- Li, W., Pan, C., Zhang, R., Ren, J., Ma, Y., Fang, J., Yan, F., Geng, Q., Huang, X., Gong, H., et al. (2019). Aads: Augmented autonomous driving simulation using data-driven algorithms. *Science Robotics*, 4(28).

- Li, Y., Díaz, M., Morantes, S., and Dorati, Y. (2018). Vehículos autónomos: Innovación en la logística urbana. *Revista de Iniciación Científica*, 4(1), 34–39.
- Liu, S., Li, L., Tang, J., Wu, S., and Gaudiot, J.L. (2020). Creating autonomous vehicle systems. *Synthesis Lectures on Computer Science*, 8(2), i–216.
- Park, S.W., Patil, K., Wilson, W., Corless, M., Choi, G., and Adam, P. (2020). Creating driving scenarios from recorded vehicle data for validating lane centering system in highway traffic. Technical report, SAE Technical Paper.
- Rozsa, Z. and Sziranyi, T. (2018). Obstacle prediction for automated guided vehicles based on point clouds measured by a tilted lidar sensor. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(8), 2708–2720.
- Tsai, C.Y. and Tsai, S.H. (2018). Simultaneous 3d object recognition and pose estimation based on rgb-d images. *IEEE Access*, 6, 28859–28869.
- Weon, I.S., Lee, S.G., and Ryu, J.K. (2020). Object recognition based interpolation with 3d lidar and vision for autonomous driving of an intelligent vehicle. *IEEE Access*, 8, 65599–65608.
- Zhang, C., Huang, T., and Zhao, Q. (2019). A new model of rgb-d camera calibration based on 3d control field. *Sensors*, 19(23), 5082.

Implementación de Smart Contract para validación de créditos de actividades complementarias en el TecNM

Rafael Zavala López, María Lucía Barrón Estrada, Ramón Zatarain Cabada

Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Culiacán

Maestría en Ciencias de la Computación

Culiacán, Sinaloa, México

Marzo-2021

Resumen: En este artículo se presenta el proceso de desarrollo de una aplicación descentralizada para la validación de créditos de actividades complementarias de alumnos del TecNM a través de un Smart Contract alojado en Ethereum. Actualmente en la institución se utiliza un proceso manual para realizar la validación de créditos de actividades complementarias, lo cual provoca pérdida de información y complica los trámites que los estudiantes realizan para que sean validadas las actividades complementarias y asignados los créditos correspondientes a su expediente académico. Para subsanar este problema, se desarrolló un módulo que genera el certificado para cada crédito complementario el cual se almacena en un contrato inteligente (Smart Contract) que se registra en la cadena de bloques (Blockchain) Ethereum y podrá ser consultado en cualquier momento. Con este proceso, se descentraliza la información y se garantiza la perpetuidad de los créditos de actividades complementarias que los alumnos obtienen durante su formación académica.

Palabras clave: blockchain, smart contract, certificados digitales, actividades complementarias, aplicación descentralizada.

1. INTRODUCCIÓN

El modelo educativo del Tecnológico Nacional de México impulsa a la formación de profesionistas con conocimiento integral; para ello, los programas de estudio contienen créditos académicos tanto para las competencias profesionales como para las competencias genéricas que se adquieren y desarrollan a través de diferentes actividades formativas.

Las instituciones que forman parte del TecNM definen las actividades para que los estudiantes desarrollen las competencias interpersonales. Estas actividades se denominan Actividades Complementarias y se ofrecen durante los primeros semestres de la formación académica de los estudiantes de ingeniería. Las actividades complementarias pueden ser: construcción de prototipos, tutoría, participación en proyecto de investigación, congreso, seminario o concurso académico, edición de artículos científicos, organización de eventos, actividades extraescolares, deportivas y culturales, y programas de apoyo a la formación personal, entre otras.

El propósito de este trabajo de investigación es el de impulsar al cumplimiento de la formación que el TecNM está promoviendo a través de la validación de los créditos de actividades complementarias que se otorgan al finalizar una actividad complementaria a través de un sistema de validación que utilice al blockchain como método de perpetuidad de la información.

2. ANTECEDENTES

En años recientes ha proliferado en múltiples campos del quehacer humano la aplicación de blockchain como tecnología disruptiva y la tendencia hacia la Web 3.0 ha generado muchos proyectos de investigación relacionados con esta área.

2.1 Blockchain

El nombre blockchain viene de su estructura técnica - una cadena de bloques [1]. Cada bloque está relacionado con el bloque previo con un algoritmo de encriptación lo que permite guardar un listado de transacciones. Además, la información es creada e intercambiada por múltiples nodos en una red lo que permite describirla como información distribuida o descentralizada. Por esto, blockchain representa una alternativa en el método de validación de créditos complementarios para los alumnos de la institución.

2.2 Smart Contract

Bitcoin es considerada la primera aplicación de blockchain realizada. Actualmente, existen múltiples frameworks de blockchain que han usado y transformado el concepto del Bitcoin. Ethereum es uno de ellos, y fue el primer framework que permitió a sus usuarios desplegar Smart Contract

habilitando la ejecución de código programable en Blockchain [2].

En Ethereum cada transacción tiene un pequeño costo que llaman “gas”. Este gas representa una unidad de medida para las tareas computacionales que son requeridas en un Smart Contract específico, y es la unidad que sostiene el ecosistema de Ethereum ya que es el pago a los nodos que soportan la red que son conocidos como “mineros”.

Este “ecosistema” fue lo que hizo que los desarrolladores tengan oportunidad de diseñar e implementar las renombradas “aplicaciones descentralizadas”.

2.3 Aplicaciones Descentralizadas (DApp)

Este concepto por simplicidad habla de un Smart Contract conectado a una interfaz de usuario web. Más a fondo una aplicación descentralizada es una aplicación web que se basa en servicios de infraestructura abiertos, descentralizados y de igual a igual. Además, muchas aplicaciones descentralizadas incluyen almacenamiento descentralizado y/o un protocolo y una plataforma de mensajes. [3].

2.4 Blockchain en la educación.

Una de las áreas en las que se ha explorado el blockchain en la educación es el área de la certificación como por ejemplo las aportaciones realizadas por Microsoft e IBM con el proyecto llamado “Blockcerts” [4]; que con este proyecto buscan la homologación de los certificados escolares entre instituciones de forma digital.

Por otra parte, se ha investigado la implementación de blockchain en otras problemáticas como la motivación de los estudiantes en el aprendizaje con proyectos tipo “*learning is earning*” [5] o la posibilidad del uso de Smart Contract entre relaciones profesor - alumno.

3. OBJETIVO DE INVESTIGACIÓN

Desarrollar un sistema para validar los créditos de actividades complementarias implementando un mecanismo de seguridad que utilice blockchain con el fin de conservar un historial de créditos perpetuo e inmutable para los estudiantes durante su formación académica.

4. PROPUESTA

El trabajo de investigación que estamos realizando busca la innovación en un proceso que actualmente se realiza de forma manual. Esto buscando que la propuesta cumpla con ciertos criterios de seguridad para considerarla como aplicable dentro de la institución.

En la búsqueda de opciones para la innovación de un proceso manual a través de un sistema podemos encontrarnos con múltiples alternativas, en este caso compararemos con 3 opciones:

1. **Método actual.** Esta opción busca continuar con el método actual manual para la verificación de los certificados de actividades complementarias de los alumnos de la institución.

2. **Aplicación (cliente-servidor).** Se buscaría crear una aplicación que se encuentre alojada en la nube y que utilice un protocolo de acceso a la información muy seguro.

3. **Aplicación (cliente-servidor) con base de datos distribuida.** Esta opción conlleva desarrollar una aplicación en la que su servidor se conecte a bases de datos que se encuentren distribuidas buscando que los registros de créditos de actividades complementarias no sean alterados fácilmente.

4. **Aplicación descentralizada (blockchain).** Con esta opción se buscaría crear una aplicación descentralizada que guarde la información de forma distribuida y que se registre perpetuamente.

Tras un análisis exhaustivo de las opciones mencionadas llegamos a la conclusión de que deberíamos optar por la opción 4 ya que algunas de las ventajas que nos ofrece la aplicación descentralizada son:

- Registro perpetuo de la información.
- Información distribuida en los nodos del blockchain.
- Reducción de costos de operación.
- Investigación de desarrollo de aplicación descentralizada para múltiples casos de uso internos.

A continuación, se expone más sobre nuestra propuesta hablando sobre el proceso de desarrollo, la operación del sistema y el estado actual del sistema.

5. PROCESO DE DESARROLLO

La aplicación descentralizada de validación de créditos complementarios se desarrolló usando una metodología tradicional de desarrollo de software con las siguientes fases:

1. Análisis de requisitos.
2. Diseño del sistema.
3. Desarrollo de aplicación descentralizada.
4. Implementación del sistema.

A continuación, se describe brevemente cada una de las fases del desarrollo del sistema.

5.1 Análisis de requisitos

Los requisitos funcionales y de calidad se obtuvieron utilizando la metodología QASAR [6], se consultaron diversos documentos como el *Manual de Lineamientos Académico-Administrativos del TecNM* [7] donde se establecen las normas de operación para acreditar las actividades complementarias. Algunos requerimientos que fueron resultado del análisis son los siguientes:

- Gestionar información de actores del sistema (jefes de departamento, maestros y alumnos), así como de actividades complementarias, grupos y certificados.
- Crear certificados y persistencia de información en blockchain.
- Implementar Smart Contract para la validación de créditos de actividades complementarias.

Con el fin de validar la operación del sistema, se diseñaron diagramas de flujo de información, los cuales fueron validados por los usuarios jefes de departamento y profesores encargados de actividades complementarias.

Se identificaron los roles de los usuarios que actuarían dentro del sistema y se definieron las acciones generales que ofrece la plataforma. Los roles de usuario y su semántica se presentan en la tabla 1.

ROL	DESCRIPCIÓN
Administrador	Es el administrador de la información del sistema
Jefe de departamento	Responsable de un departamento que realiza o colabora con el proceso de validación de actividades complementarias
Profesor Responsable de Actividad Complementaria	Es el maestro encargado de administrar una actividad complementaria
Interno	Personal interno que valida los créditos de actividades complementarias que han conseguido los alumnos.
Alumno	Alumno del TecNM que realiza las actividades complementarias y obtiene créditos al realizarlas.

Tabla 1. Roles de usuario.

5.2 Diseño del Sistema

En esta sección se presentan los artefactos generados en la etapa de diseño la arquitectura del sistema. Se identifican los principales componentes y su interacción para el correcto funcionamiento del sistema descentralizado.

5.2.1 Contexto del sistema.

Los actores que interactúan con el sistema se presentan en la figura 1.

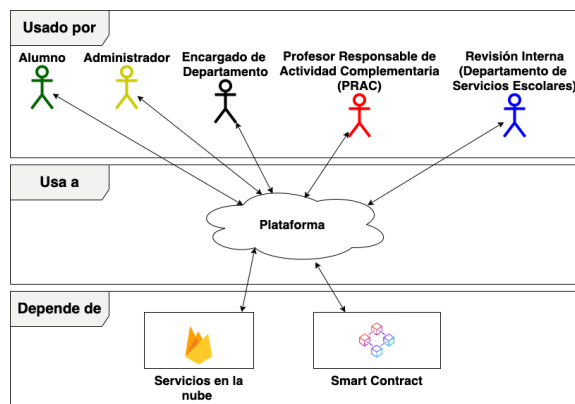


Figura 1. Diagrama de contexto.

5.2.2 Arquitectura del sistema.

Se seleccionó la arquitectura de tres capas para la aplicación descentralizada, la cual se muestra en la Figura 2.

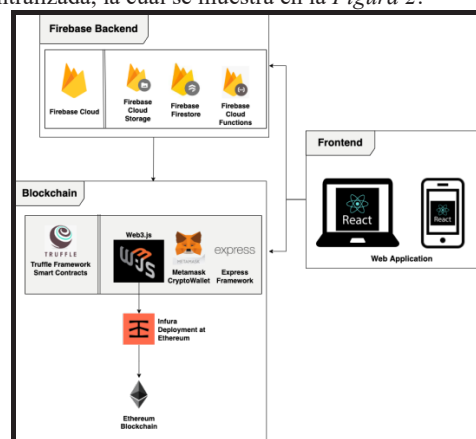


Figura 2. Arquitectura por capas del sistema

- **Capa Frontend.** Es la capa de aplicación donde los usuarios interactúan con el sistema. Contiene una aplicación web adaptativa que permite la adaptación en cualquier dispositivo, garantizando la portabilidad.
- **Capa Firebase Backend.** Es una capa tradicional porque se trata de una infraestructura backend básica con herramientas en la nube de Firebase. Esta capa contiene las estructuras de los datos que se utilizan en el sistema.
- **Capa Blockchain.** Esta capa permite la descentralización de la información importante y contiene al Smart Contract y los componentes que hacen posible la conexión de la aplicación web con la red de pruebas de Ethereum llamada Ropsten.

5.3 Desarrollo de aplicación descentralizada.

La aplicación descentralizada para validación de créditos de actividades complementarias se desarrolló utilizando diversas tecnologías que fueron seleccionadas para cada uno de los elementos del sistema, las cuales se muestran a continuación.

5.3.1 Tecnologías para la implementación.

Definida la arquitectura del sistema se seleccionaron las tecnologías aptas para la implementación de la aplicación descentralizada, las cuales se muestran en la *Figura 3* distribuidas en las capas de la arquitectura.

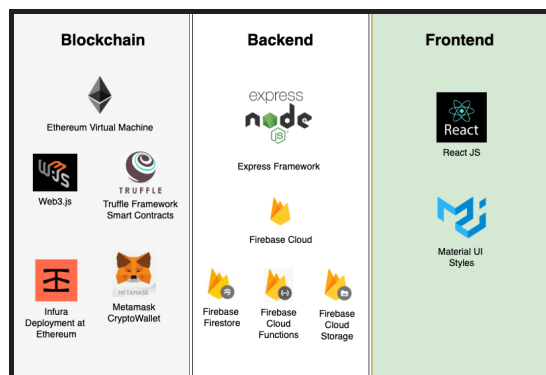


Figura 3. Tecnologías seleccionadas para la implementación de la aplicación descentralizada.

5.3.2 Smart Contract para validación de créditos de actividades complementarias (Blockchain).

Esta capa utiliza una combinación de herramientas que hacen posible la validación de créditos por actividades complementarias a través de un smart contract. Las herramientas utilizadas fueron las siguientes:

Lenguaje: Solidity.

Framework: Truffle.

Herramientas auxiliares:

- ☐ Metamask CryptoWallet.
- ☐ Web3.js.
- ☐ Infura.
- ☐ Remix Web IDE.
- ☐ Ethereum Virtual Machine.
- ☐ Ropsten Testnet.

5.3.3. Creación de estructuras de datos para información de catálogos del sistema (Backend).

Esta capa concentra la información necesaria del modelo de los datos representado dentro de la aplicación descentralizada. Se describen los campos de cada una de las tablas que hacen referencia a los catálogos del sistema.

Para la capa backend se optó por utilizar la nube de Firebase y las estructuras de datos que permiten el acceso con Cloud Firestore. Las tablas que se consideraron para sistema central son las siguientes:

1. Alumnos.
2. Departamentos.
3. Actividades Complementarias
4. Grupos.
5. Certificados.
6. Usuarios.
7. Roles.
8. Firmas.
9. Notificaciones.
10. Alumnos Grupo.
11. Grupos Firma.

5.3.4. Desarrollo de aplicación web para validación de créditos de actividades complementarias (Frontend).

Esta capa contiene la aplicación web descentralizada con la que interactúan los usuarios. Para desarrollarla se utilizaron las siguientes tecnologías:

Lenguaje: Javascript

Framework: React JS

Herramientas Alternativas:

- ☐ Google Firebase Hosting.
- ☐ Material UI.

En la sección de resultados se muestran algunas de las interfaces de usuarios más importantes de la aplicación web.

5.4 Implementación del sistema.

En esta sección se describen los detalles de la implementación de cada una de las capas de la arquitectura del sistema, así como la conexión entre ellas.

5.4.1 Capa Frontend.

Se utilizó Firebase Hosting para la implementación pública de la plataforma web de validación de créditos de actividades complementarias. Firebase Hosting permite alojar de manera segura una aplicación web en un servidor web.

5.4.2 Capa Backend.

La capa backend tradicional se implementó usando estructuras de datos en un proyecto de Firebase Datastore, con el fin de hacer simple y seguro el acceso a la información.

5.4.3 Capa Blockchain.

Para la implementación del Smart Contract que se usará para la validación de créditos de actividades complementarias se utilizaron diversas configuraciones. Primero, el Smart Contract está alojado en la Ethereum Virtual Machine en una red de pruebas llamada Ropsten. A él se puede acceder a través de la API de Infura que proporciona una URL pública que apunta a

la dirección del Smart Contract en la red de nodos. Por último, para que el proyecto de Truffle pueda ser accedido desde la aplicación web (Capa Frontend) fue necesario habilitar una máquina virtual de Google Cloud Platform en la que se ejecuta el proyecto de manera local y cuenta con un protocolo seguro de conexión a la aplicación web.

→ 6. OPERACIÓN DEL SISTEMA

En esta sección se presentan las interfaces que generadas para los flujos definidos en el análisis de requisitos y las acciones que se realizan para que se pueda lograr el objetivo de la plataforma de validación de créditos de actividades complementarias en el TecNM.

6.1 Inicio de sesión.

Un usuario realiza el inicio de sesión tradicional con correo y contraseña, y el sistema autentica a los usuarios registrados previamente por el administrador.

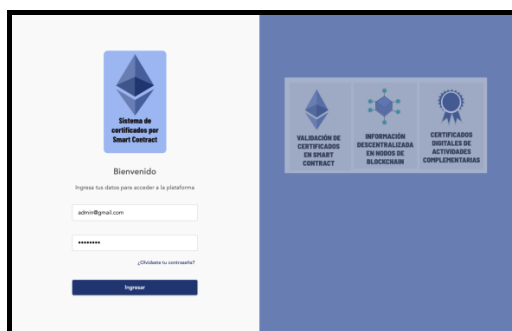


Figura 4. Inicio de sesión general de la plataforma.

6.2 Perfil Ingresado.

El sistema presenta el contenido del rol asignado al usuario que ingreso. El sistema despliega un menú que ofrece el listado de acciones disponibles en el sistema para ese usuario, tal como se muestra en la Figura 5.

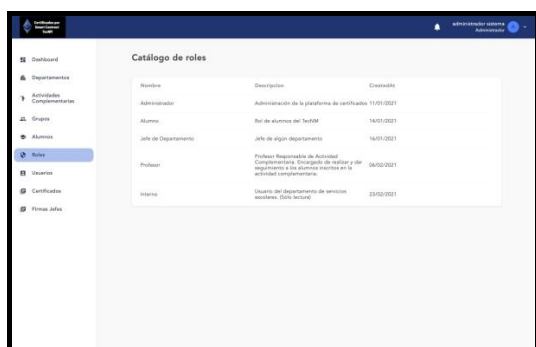


Figura 5. Estructura general de la plataforma.

6.3 Calificación de alumnos de un grupo.

El Profesor Responsable de la Actividad Complementaria evalúa a cada uno de los alumnos que cursaron una actividad complementaria y selecciona a los alumnos que cumplieron con la actividad para otorgarles el crédito de la actividad complementaria. A los alumnos no seleccionados, se les ofrece retroalimentación a través de un comentario. Esta actividad se muestra en la figura 6.

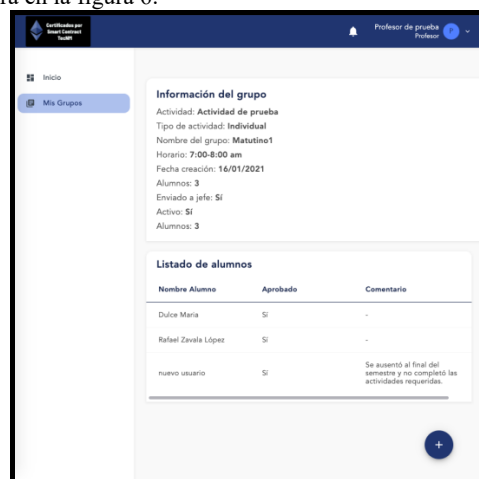


Figura 6. Calificación de grupo.

6.4 Firma de certificados

Esta acción se ejecuta una vez que el Profesor ha evaluado a los estudiantes. El jefe de departamento es el encargado de firmar los certificados del grupo con su contraseña. La contraseña se valida en el Smart Contract y también en el listado de firmas válidas.

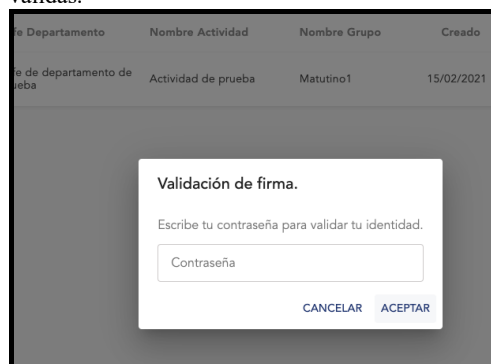


Figura 7. Firma de certificados por el Jefe de departamento.

6.5 Validación de certificados.

El personal con el rol de interno puede realizar una búsqueda de alumnos por su número de control y el sistema responde con la lista de certificados que están almacenados en el sistema central. La acción de validar realiza la búsqueda del Smart Contract para validar que el certificado se encuentre en el listado de certificados válidos.

Actividad	Semestre	Grupo	Validación	Acciones
Actividad de prueba	2021-1	Matutino1	No	...
Actividad de prueba	2021-1	Matutino1	06/03/2021	...

Figura 8. Validación interna de certificados de actividades complementarias.

→ 7. ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA

La fase de pruebas de nuestra aplicación descentralizada ha comenzado, tenemos la información de 3905 alumnos del Instituto Tecnológico de Culiacán, además de la información de 527 registros divididos entre docentes y encargados de departamento de la institución.

El periodo de registro de certificados de actividades complementarias será a partir del mes de junio. Sin embargo, se han realizado pruebas de funcionamiento del sistema que han resultado en algunas mejoras para la interfaz de usuario y funcionamiento del sistema.

→ 8 CONCLUSIONES.

La presente investigación demuestra que la tecnología blockchain representa una excelente alternativa en el desarrollo de aplicaciones que busquen perpetuidad en la información y mitigar riesgos de seguridad.

Los Smart Contract representan una opción para la descentralización de la información de sistemas tradicionales y muy seguramente los usos de estos en aplicaciones reconocidas vendrán a darle un impacto positivo en la seguridad de la información de sus usuarios.

La aplicación de plataformas que soporten la tecnología blockchain darán paso a la formalización de procesos como el de la validación de créditos complementarios en el TecNM y se fortalecerá la credibilidad en los procesos internos.

Como trabajo a futuro de la nuestra propuesta se busca integrar diferentes tipos de consenso a la hora de la firma de los certificados, estamos buscando alternativas para hacer del proceso algo más fuerte en seguridad y si es posible considerar

la aplicación de esta propuesta en todas las actividades curriculares (no sólo en las actividades complementarias).

9 REFERENCIAS

- [1] Wüst, K., & Gervais, A. (2017). Do you need a Blockchain? IACR Cryptology EPrint Archive, i, 375. <https://eprint.iacr.org/2017/375.pdf>
- [2] Christodoulou, P., Christodoulou, K., & Andreou, A. (2018). A decentralized application for logistics: Using blockchain in real-world applications. Cyprus Review, 30(2), 181–193.
- [3] Antonopoulos, A. M., & Wood, G. (2018). Mastering Ethereum: Building Smart Contracts and DApps. O'Reilly Media, Incorporated. <https://books.google.com.mx/books?id=SedSMQAACAAJ>
- [4] Blockcerts: The Open Standard for Blockchain Credentials.
- [5] Sharples M., Domingue J. (2016) The Blockchain and Kudos: A Distributed System for Educational Record, Reputation and Reward. In: Verbert K., Sharples M., Klobučar T. (eds) Adaptive and Adaptable Learning. EC-TEL 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 9891. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45153-4_48
- [6] Bosch, J. (2000). Design and use of software architectures (1st ed.). Harlow: Addison-Wesley.
- [7] TecNM. (2015). Manual de lineamientos académico-administrativos del Tecnológico Nacional de México-planes de estudio para la formación y desarrollo de competencias profesionales. 251.
- [8] Bollini, L. (2017). Beautiful interfaces. From user experience to user interface design. Design Journal, 20(sup1), S89–S101. <https://doi.org/10.1080/14606925.2017.1352649>

Extensión del modelo de negocio CANVAS para proyectos de internet de las cosas

Guadalupe Guerrero-Ruiz*, Javier Ortiz-Hernández**

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
M20ce036@cenidet.tecnm.mx*, javier.oh@cenidet.tecnm.mx**

Resumen: El Internet de las Cosas ha tenido un crecimiento exponencial en los últimos años y su ámbito de aplicación es cada vez más amplio. Con el uso de nuevas tecnologías, ha surgido la necesidad de crear nuevos modelos de negocios que integren estas tecnologías. ya que los modelos que existen actualmente, no las incorporan o no se dan cuenta del valor agregado que puede aportar.

Un modelo de negocio nos permite definir lo se pretende ofrecer al mercado, cómo se va a hacer, a quién va dirigido, cómo se va a vender y de qué manera se van a generar ingresos o beneficios sin indicar las tecnologías se van a utilizar ni cómo se pueden desarrollar las actividades para lograr el éxito del proyecto.

El propósito de este artículo es extender el modelo de negocio CANVAS para su uso a la medida en proyectos de internet de las cosas. Se presenta un caso de estudio que incorpora la extensión propuesta.

Palabras clave: Internet de las Cosas, Modelo de Negocios, Negocios digitales, CANVAS

1.-Introducción

El crecimiento en los negocios digitales, ha facilitado el uso y manejo de datos que pueden ser explorados y manipulados para el desarrollo de los negocios [1].

El internet de las cosas (IoT) con sus dispositivos inteligentes interconectados han potenciado la creación de nuevos desarrollos y nuevas infraestructuras. Estas innovadoras combinaciones de tecnología han dado origen al desarrollo de nuevos modelos de negocios digitales [2].

Los proyectos de IoT permiten incrementar la productividad permitiendo que las actividades se puedan realizar de forma más eficiente atendiendo las expectativas de los clientes. La tecnología IoT permite ajustar las estrategias de servicio para lograr una mayor satisfacción de los usuarios y proporciona la oportunidad de innovar reemplazando la manera tradicional de hacer negocios [3].

En este contexto, definimos un modelo digital como un sistema capaz de entregar valor agregado (bienes y servicios) a un determinado segmento, y al mismo tiempo establecer un mecanismo para obtener beneficios monetarios o no monetarios.

El objetivo principal de un modelo de negocio es proporcionar una ventaja estratégica a la compañía sobre sus competidores [4],[5],[6] y comunicarlo a los diversos grupos de interés.

El presente artículo propone una extensión al modelo CANVAS para adecuarlo a proyectos de IoT. El modelo CANVAS es una herramienta para describir, analizar y razonar acerca de todo tipo de modelos de negocio.

2.- Modelos de Negocio Digitales y IoT

Los modelos de negocio digitales han surgido como una innovación en la manera de ofrecer nuevo valor y servicios utilizando tecnologías digitales. El IoT en ocasiones conjuntamente con el big data, se han convertido en dos de los principales generadores de nuevas propuestas de negocio.

El IoT se refiere a la posibilidad de conectar objetos con objetos e inclusive con personas, lo cual conlleva una serie de ventajas en términos de eficiencia: La recolección centralizada de datos y el control de dispositivos, ahorro de tiempo y mejor toma de decisiones entre otros.

El IoT se caracteriza por la heterogeneidad de los dispositivos y los componentes del software que se integran para ofrecer una solución [1]. El IoT puede determinarse en cuatro categorías principales [7]:

1.-IoT como objetos Inteligentes: cosas que tienen identidad y personalidad virtual que operan en espacios inteligentes para conectarse. Lo cuales podrían ser una televisión inteligente, calefacción,

cocinas, etc.

2.- IoT como extensión del Internet: Una red de objetos (con sensores) los cuales están conectados al internet. Dichos objetos cuentan con hardware especializado que no solo permite conectarse a las redes, sino que posibilita la realización de tareas de forma remota. [8]

3.- IoT como infraestructura de una red global: Una infraestructura de red global que vincula objetos físicos y virtuales mediante la explotación de la captura de datos y capacidades de comunicación.

4.- IoT como la interacción con la información: Una forma de hacer que toda la información interactúe vinculando personas, cosas y objetos de manera autónoma e inteligente, sin cualquier restricción temporal o espacial.

Dentro de los modelos de negocios se eligieron dos los cuales pueden integrar el internet de las cosas.

3.- Desarrollo de una extensión al modelo CANVAS

La extensión propuesta al modelo CANVAS [9] incluye la integración de algunas primitivas del modelo St. Gallen [10] así como algunas especificidades relativos a los proyectos de IoT.

3.1 Modelo de negocios CANVAS

Osterwalder [9] publicó el modelo de negocios de CANVAS en su tesis del 2004 y lo comercializó en 2010.

El Modelo CANVAS es una herramienta para definir y crear modelos de negocio diferenciado el análisis y razonamiento en 4 áreas de interés: clientes, oferta, infraestructura y viabilidad económica en un recuadro con 9 divisiones. [11]

Al día de hoy es uno de los modelos de negocios más utilizado. Fig.1

Cada bloque representa un aspecto clave del negocio:

- 1.- Clientes. A quién va dirigido el producto o servicio.
- 2.- Propuesta de Valor.Cuál es la necesidad que se va a cubrir.
- 3.- Canales. Medios que se utilizan para entregar el producto o servicio desde la empresa hasta el cliente.
- 4.- Relaciones con el cliente. El nivel y tipo de interacción con el cliente.
- 5.- Flujo de Ingresos. Como se ganará dinero o se obtendrán beneficios con el negocio propuesto.

6.- Recursos. Medios que permiten que el producto se posicione.

7.- Socios Claves. Personas y empresas claves que ayudaran a crecer el negocio.

8.- Actividades Claves. Actividades necesarias para que el negocio opere.

9.- Estructura de Costos. Todos los costos que permiten que el negocio opere, costos fijos y operacionales.

El modelo está dividido en dos partes, la parte izquierda se refiere a la eficiencia y la parte derecha se refiere al valor. Esto significa que todos los bloques del lado izquierdo se refieren al valor creado para el cliente y la compañía, mientras que la otra parte se refiere a la eficiencia y mejora de los beneficios para el cliente.

El punto crítico del modelo es la falta de elementos técnicos de la arquitectura del Internet de las cosas.

3.2 Modelo propuesto por St. Gallen

El modelo St. Gallen describe el negocio desde una metaperspectiva utilizando cuatro dimensiones:

- 1.- Quién. Es el centro, indica que el cliente es el punto focal.
- 2.- Qué. Es el servicio o producto.
- 3.- Cómo. Las actividades y recursos que se necesitan para ello.
- 4.- Valor. Como el negocio ofrece beneficios.

El modelo St. Gallen fue publicado en 2013[10]. Es el modelo más popular basado en las menciones de Google Scholar [12]. Puede utilizarse en conjunto con CANVAS para lograr modelos de mayor madurez y usabilidad. Existe una versión comercial del modelo, un kit comercial que contiene tarjetas con preguntas y una lista de 55 tipos de modelos de negocios.

3.3 Integración del Modelo CANVAS y el modelo St. Gallen a proyectos de IoT

En [13], se presenta una propuesta de integración de los modelos CANVAS y St. Gallen. Adicionalmente, a estos modelos se les incorporan conceptos de arquitectura y diseño de sistemas de IoT.

En la parte superior de la figura 2, se muestran las capas que comúnmente se encuentran en la arquitectura de proyectos de IoT. La capa de dispositivos, la capa de conectividad, la nube y la capa de aplicación. Como se muestra en la figura 2.

- 1.- La capa de dispositivos se refiere a las partes digitales tales como sensores, microprocesadores, transductores, etc.
- 2.- La capa de conectividad se refiere a los protocolos que permiten la comunicación entre los dispositivos y la nube.
- 3.- La nube es donde los datos son procesados y almacenados.
- 4.- La capa de aplicación es donde se da la interacción entre los usuarios y los datos de una manera útil y eficiente.

El propósito de este modelo es facilitar el desarrollo de modelos de negocios relacionados con IoT.

Los cuatro bloques del modelo de CANVAS: socios, actividades clave, recursos y costos, los utilizaremos para describir cómo el IoT opera.

Cada una de las capas puede contener subcomponentes basados en las necesidades específicas de los clientes.

4.- Caso de Estudio: Sistema para la detección de caídas en adultos mayores utilizando sensores vestibles

Las caídas se han convertido en una de las causas que provocan más muertes alrededor del mundo, convirtiéndose en la segunda causa de muerte por lesiones accidentales o no intencionales, provocando a nivel mundial 646,000 muertes al año [14].

Este sistema busca desarrollar un método que pueda ser utilizado para la detección de caídas en adultos mayores. Se propone la utilización de distintos sensores vestibles que puedan ser utilizados para la detección de la caída. Lo que se busca es reducir el margen de error, ya que se necesita poder diferenciar entre una caída o algún evento similar (caminar, agacharse) que por sus características pueda ser confundido como alguna caída.

El sistema al detectar alguna caída, envía una notificación por medios digitales a personas previamente determinadas, indicando el tipo de caída y la ubicación GPS.

El dispositivo sensor se portará en alguna parte del cuerpo de la persona monitoreada.

El sistema será funcional en exteriores e interiores a condición de contar con servicio de internet.

La arquitectura del caso de estudio se muestra en la figura 3

- a) Capa de dispositivos. Esta capa está compuesta principalmente por cuatro subcomponentes: el sensor, la batería, emisor de señales y el microcontrolador. El sensor es el dispositivo que recibe y envía los datos a la nube. Cada dispositivo tiene uno o más elementos de sensado de acuerdo a las necesidades de la aplicación IoT. Por ejemplo, en el caso de estudio un sensor vestible con un costo estimado menor de mil pesos debe ser considerado dentro del modelo de negocios. La batería del dispositivo debe ser considerada, ya que, si se requiere una comunicación continua, la vida de la batería disminuye. Algunas aplicaciones de IoT requieren solo algunas transmisiones al día.

El emisor de señales se refiere al protocolo que es utilizado entre el dispositivo y la nube. La mayoría están incorporados a un microcontrolador que coordina la transmisión con la capa de conectividad. Hay varios protocolos de comunicación con sus ventajas y desventajas, por ejemplo. Sigfox y LoRaWan son ideales para dispositivos portables con bajo costo de energía, pocas transmisiones.

El costo de emisión de señales está relacionado directamente con el protocolo y la infraestructura. Es importante considerar que van surgiendo nuevas tecnologías las cuales deben ser tomadas en cuenta en la arquitectura.

- b) Conectividad. La tarea de esta capa es asegurar y facilitar la comunicación entre el dispositivo y la nube.

c) Nube. Comercialmente encontramos tres tipos de nube: la infraestructura como servicio (IaaS por sus siglas en inglés), plataforma como servicio (PaaS, por sus siglas en inglés) y el software como servicio (SaaS, por sus siglas en inglés). La IaaS son los servidores que funcionan en base a peticiones, solo manejan, procesan y almacenan datos. El PaaS ofrece una pre-configuración para utilizar de manera eficiente micro-servicios para el desarrollo de sistemas. La SaaS brinda el uso de aplicaciones a través de un navegador. Hay muchos proveedores de servicio de la nube, los que lideran con Microsoft Azure, Google Cloud, Amazon Web Services e IBM. La elección de la nube depende de las necesidades de la empresa.

- d) Capa de Aplicación. Son los datos que son utilizados para dar valor a los interesados. El diseño de la aplicación es la primera impresión de la empresa [15].

No hay una regla en la cual desarrollar una aplicación, pero el proceso implica las buenas practicas, la innovación y el que haya una buena interacción con los usuarios.

e) Capa de Mantenimiento. Es un nuevo bloque añadido a la arquitectura del IoT. No está relacionado con el aspecto técnico, pero involucra el mantenimiento de los dispositivos o la asistencia en la operación. Puede ser un equipo que detecte fallas en la señal, batería baja o vandalismo.

5.- Aplicación del caso de Estudio.

En la figura 4 se presenta el modelo de negocio del caso de estudio, con la arquitectura del IoT y con los cuatro bloques del CANVAS.

a) Socios. La solución técnica del IoT que proveen el hardware, tal como, Xiaomi, Sigfox y Azure, cumple con los requerimientos del cliente bajo costo y bajo uso de batería.

b) Actividades. Las actividades con las que se va a operar el modelo, utilizando el dispositivo y el software. La conectividad requiere una infraestructura técnica, la integración de Azure con Fiware y los posibles fallos que se puedan encontrar los cuales requieren de entrenamiento técnico.

c) Costos. La estructura de costos, corresponde al costo total de los socios, las actividades y los recursos y pueden ser calculadas para dar un aproximado del costo.

6.- Valoración resultados

Al implementar la extensión del modelo al caso de estudio, se tiene una visión clara del enfoque del proyecto y se visualizan los aspectos clave a considerar para asegurar el éxito del negocio.

Mejora el entendimiento del proyecto por parte de los grupos de interés, promueve una mayor sinergia y colaboración y permite llevar a cabo una mejor planeación de su desarrollo.

7.-Conclusiones

El artículo muestra una integración de la arquitectura del IoT con el modelo de negocios CANVAS que permite un mayor y mejor entendimiento del uso de las tecnologías utilizadas.

Por ejemplo, el integrar la cadena de valor del IoT permite el conocimiento de los costos asociados, así como las ventajas y desventajas de cada tipo de

tecnología utilizada.

8.-Referencias

- [1] Aagaard, A. (2018). Digital Business Models – Driving Transforming and Innovation. Palgrave MacMillan.
- [2] Kiel, D., Arnold, C., Collisi, M., Voigt, K. I. (2016). The impact of the industrial internet of things on established business models. In Proceedings of the 25th International Association for Management of Technology (IAMOT) Conference, Orlando, Florida, USA, May 15- 19.
- [3] Nambisan, S., Lyytinen, K., Majchrzak, A., Song, M. (2017). Digital innovation management: reinventing innovation management research in a digital world. MIS Quarterly, 41(1), 223-238
- [4] Amit, R., Zott, G., (2001). Value creation in e-business. Strategic Management Journal, 22(6-7), 493-520.
- [5] Amit, R., Zott, C. (2012). Creating value through business model innovation. MIT Sloan Management Review, 53(3), 41-49.
- [6] Dodgson, M., Gann, D. M., Phillips, N. (2013). The Oxford handbook of innovation management. OUP Oxford.
- [7] Chan, H.C.Y. (2015) Internet of Things Business Models. Journal of Service Science and Management, 8, 552-568.
- [8] IAT, Internet de las cosas(IoT) y aparatos inteligentes, [en línea], disponible: <https://iat.es/tecnologías/internet-de-las-cosas-iot/>
- [9] Osterwalder, A., Pigneur, Y. (2010). Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers. Wiley
- [10] Gassmann, H., Frankenberger, K., and Csik, M. (2014) The St. Gallen business model navigator. Working paper: University of St. Gallen: ITEM-HSG.
- [11] IEBS, Qué es el Modelo Canvas y cómo aplicarlo a tu negocio, [en línea], disponible: <https://www.iebschool.com/blog/que-es-el-modelo-canvas-y-como-aplicarlo-a-tu-negocio-agile-scrum/>
- [12] Mansour, H. Presser, M. and Bjerrum, T. (2018) Comparison of seven Business Model Innovation Tools for IoT ecosystem. IEEE WF on IoT SingaporeI
- [13] A. Aagaard, M. Presser, M. Beliat, H. Mansour and S. Nagy, "A Tool for Internet of Things Digital Business Model Innovation," 2018 IEEE Globecom

[14] Silva-Fhon,J.R. Partezani-Rodrigues,R., Miyaruma, K., & Fuentes-Neyra, W. (2019). Causas y factores asociados a las caídas del adulto mayor. Enfermería Universitaria.

[15] IAT, Internet de las cosas(IoT) y aparatos inteligentes, [en línea], disponible: <https://iat.es/tecnologías/internet-de-las-cosas-iot/>

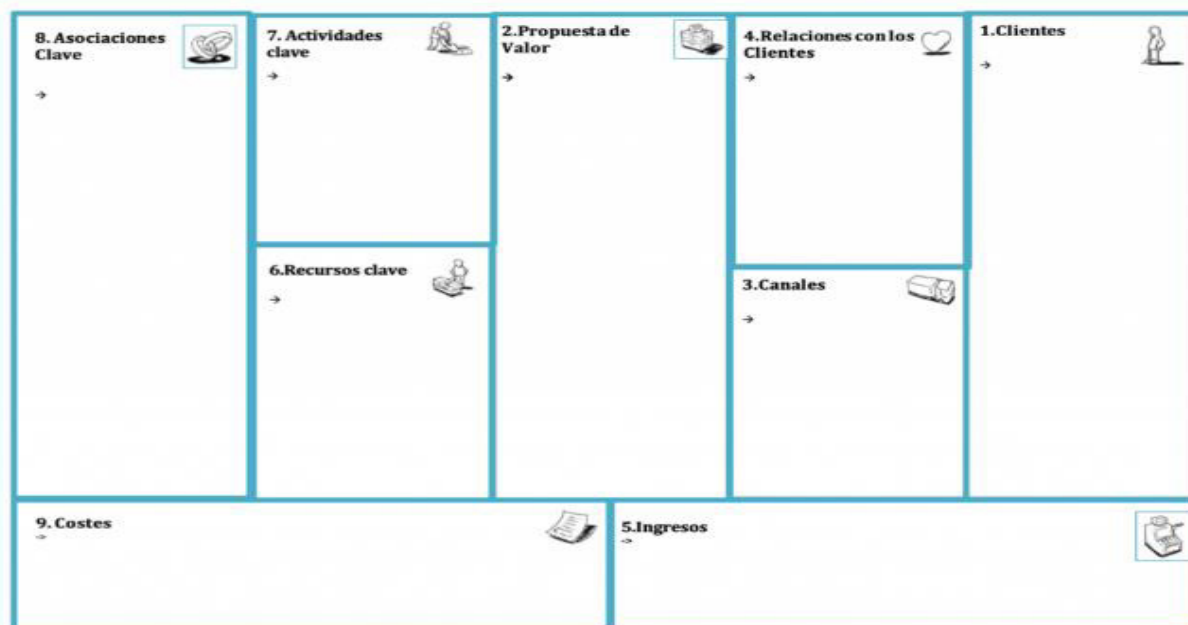


Figura 1 Lienzo de CANVAS

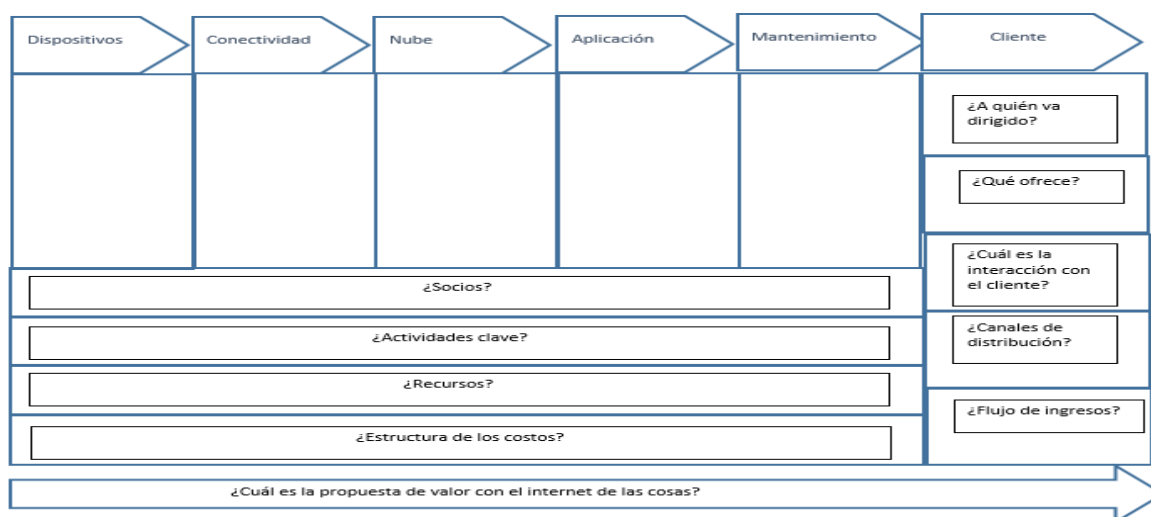


Figura 2 Modelo de negocios de IoT

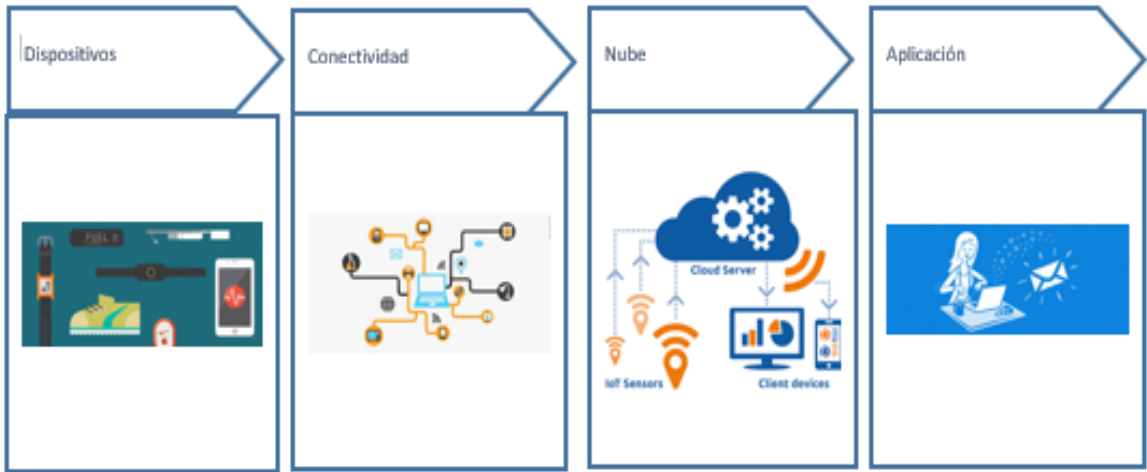


Figura 3 Extensión de CANVAS a proyectos de IoT

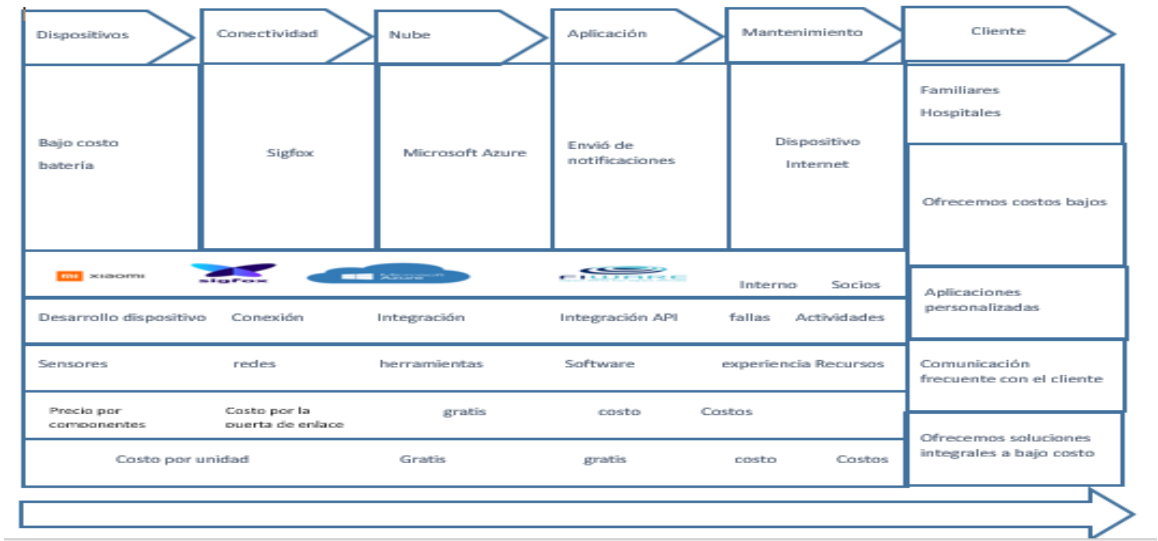


Figura 4 Aplicación del caso de estudio

Modelo de etapas para el pre-procesamiento de datos heterogéneos en proyectos de IoT

Ing. Vanessa Elizabeth Figueroa Goroztieta, Dr. Javier Ortiz Hernández

Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

M20ce032@cenidet.tecnm.mx, javier.oh@cenidet.tecnm.mx

Resumen: Para los desarrolladores de proyectos de internet de las cosas actualmente existen metodologías y modelos de solución que son de apoyo para el desarrollo de proyectos. Sin embargo, el enfoque y la personalización de estas soluciones depende del desarrollador. Usualmente en el desarrollo de proyectos de internet de las cosas se encuentran las siguientes etapas involucradas: adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos. Sin embargo, diversos trabajos señalan la omisión de una etapa de enorme importancia en el desarrollo de proyectos: el pre-procesamiento. Una etapa muy valiosa para el tratamiento o eliminación de datos inconsistentes, faltantes, erróneos etc. Para el pre-procesamiento se han utilizado principalmente: métodos algorítmicos programables o técnicas de instrumentación electrónica apoyadas por alguna herramienta de software. En este trabajo se presenta una propuesta de etapas para el desarrollo de proyectos de internet de las cosas, que incorpora de manera explícita, además de las etapas convencionales el pre-procesamiento de datos, como uno de los procesos clave para el desarrollo de proyectos IoT.

Palabras clave: pre-procesamiento, datos heterogéneos, adquisición de datos, métodos algorítmicos, instrumentación electrónica

1. Introducción

En esta nueva era de desarrollo todo forma parte de un ecosistema tecnológico, con nuevas creaciones para mejoras actualizadas y automatizadas para la sociedad. Una de las creaciones tecnológicas novedosas es el Internet de las Cosas y todos los desarrollos que se están elaborando bajo este paradigma.

Internet de las cosas conocido por las siglas IoT, hace referencia a una red de objetos cotidianos interconectados a través de internet para lograr una comunicación inteligente entre humanos y objetos.

Las tecnologías relacionadas con IoT es un área creciente por parte de la industria y la investigación, abarcando también otras áreas como la gestión de datos, vigilancia o monitoreo y seguridad.

Estas tecnologías también son un elemento indispensable en el desarrollo de ciudades inteligentes. La gran mayoría de proyectos desarrollados bajo esta nueva tecnología se estructura en dos divisiones

importantes: software, donde se concentra todo lo referente a medios de programación intangibles y hardware, que clasifica todos los elementos electrónicos encargados de obtener mediciones de diferentes instrumentos. Cada proyecto tiene diferentes formas de desarrollo sin embargo comparten cuatro diferentes etapas ocasionales: adquisición de datos, almacenamiento de datos, procesamiento y resultados. En estas etapas que se mencionan se omite o se utiliza muy poco una etapa con mucho potencial “El pre-procesamiento”, al ejecutar esta etapa se puede reducir errores en sistemas elaborados con la orientación a internet de las cosas. El propósito del pre-procesamiento de datos es principalmente la corrección de datos heterogéneos, en este caso se clasifican a éstos como aquellos datos que presentan variantes en formato, velocidad de transmisión o provenientes de múltiples fuentes, que presentan inconsistencias y que serán utilizados para diferentes aplicaciones. Con ayuda de

este proceso se pretende que los datos que serán utilizados tengan consistencia y calidad antes de ser involucrados con cualquier tipo de análisis.

2. Etapas convencionales para el desarrollo de proyectos IoT

De acuerdo a la revisión de la literatura, se encontraron diferentes materiales donde los autores sin utilizar alguna metodología ágil o de desarrollo de software realizan proyectos con enfoque o intención de pertenencia a IoT. En estos trabajos la gran mayoría divide implícitamente o de forma explícita el desarrollo en hardware y software, donde el hardware engloba todos los dispositivos que estarán conectados buscando sensor alguna variable, utilizando medios electrónicos programables como alguna tarjeta inteligente de adquisición de datos o un sistemas DAQ que puede consistir en un montaje de microcontroladores y diferentes dispositivos electrónicos, por su parte el software guarda toda la programación de los dispositivos, es aquí donde se subdivide el proceso generado por el software en etapas, en las cuales la mayoría de proyectos suelen coincidir. Las etapas más convencionales utilizadas son: proceso de adquisición de datos, almacenamiento en bases de datos, procesamiento y resultados en apps o medios digitales.

3. Modelo modificado de etapas para el desarrollo de proyectos

Para realizar el proceso de pre-procesamiento de datos heterogéneos, iniciamos definiendo el tipo de datos con los cuales se está trabajando: el término heterogéneo hace referencia a la variedad, en este caso los datos tienen variaciones en cuanto a formato, para comprender mejor se plantea el siguiente ejemplo: cuando se realiza un archivo de texto y se guarda en el almacenamiento de un computador, este se puede guardar en diferentes formatos tales como pdf, txt, zip etc., de acuerdo a esto se presenta una variante heterogénea en los formatos, pero esto no cambia que el contenido del archivo sea texto. En este caso tomando la definición de “variante”, para heterogéneo, se clasifican los datos en diferencia de formato, aunque no dejan de ser números, algunos tendrán que realizar una transformación de su medición original en sistema hexadecimal o binario al sistema decimal de esta forma se logrará que los datos sean homogéneos y se lleve a cabo el proceso de pre-procesamiento para llegar a este punto.

Con la finalidad de poder contar con mayor calidad de datos en proyectos de IoT, se propone la siguiente organización de las etapas convencionales añadiendo la etapa de pre-procesamiento:

1. Ambiente de adquisición de datos
2. Proceso de almacenamiento a nuestra conveniencia
3. Pre-procesamiento
4. Procesamiento
5. Resultados

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo de las etapas del modelo.

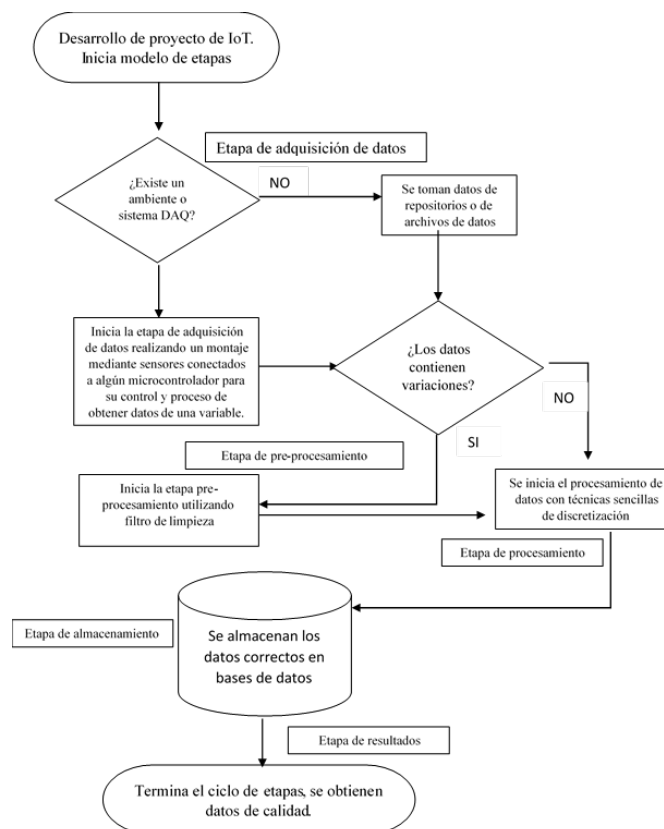


Figura 1. Diagrama de flujo para el modelo modificado de etapas

A continuación, se describe cada una de ellas.

3.1 Ambiente de adquisición de datos

De acuerdo a la definición de uno de los líderes en procesos DAQ este define al proceso de adquisición de datos como: “el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido” [1]. Para IoT este proceso engloba un sinnúmero de variables que se convierten en mensurables, como por ejemplo la aplicación de IoT en emociones o sentimientos donde la depresión, ansiedad y felicidad se vuelven cuantificables, y en otras más populares como los controles de variables de temperatura, vibración, humedad, radiación etc. Otro autor también define al proceso de adquisición de datos como: “el proceso de tomar información de la realidad mediante una señal como entrada, puede ser corriente o voltaje, para su posterior procesamiento y análisis, almacenamiento u otro tipo de manipulación” [2].

Un sistema de adquisición de datos o ambiente de adquisición, se compone por sensores vinculados a una PC con un software desde donde se programa cuál será el uso deseado de toda la información de datos que se adquirió, esta etapa está directamente relacionada con el almacenamiento de datos donde se guarda toda la información adquirida.

Los sistemas DAQ tienen ciertas características que deben cumplir de acuerdo al uso que serán dirigidos tales como la potencia del procesador del computador a utilizar o el procesador con el que debe cumplir la tarjeta o microcontrolador con la que se procesarán los datos de los sensores, la velocidad de escritura y lectura, así como la decodificación de las señales eléctricas para transformarlas en un dato. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales antiguos donde las mediciones se realizaban manualmente, los sistemas DAQ que son basados en PC aprovechan algunas de las características de estas como la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad, proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable. En la figura 2 se puede observar de forma gráfica los componentes de un ambiente de adquisición de datos.

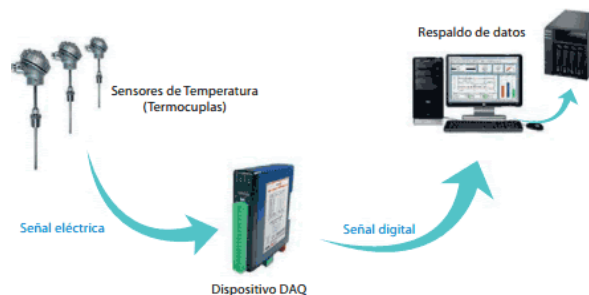


Figura 2. Ambiente de adquisición de datos

3.2 Proceso de almacenamiento de datos

La etapa de almacenamiento de datos es la encargada, como su nombre lo dice, de almacenar o guardar todos los datos que son enviados por los sensores desde el proceso de adquisición de datos. En algunas ocasiones esta etapa integra un almacén de datos. Bill Inon utiliza el término *data warehouse* para esta etapa de desarrollo, en la que encontramos una base de datos que puede o no tener formato, puede o no estar organizada o puede solamente almacenar los datos crudos. De acuerdo a las referencias consultadas para este artículo, la gran mayoría de proyectistas no especifica un tipo de base de datos. En la tabla 1 se presenta una comparativa de tipos de bases de datos utilizadas en el desarrollo de proyectos IoT.

Tabla 1. Comparativas de bases de datos

°	Tipo de almacenamiento	Ventaja	Desventaja
1	Base de datos SQL	Portabilidad: pueden ser utilizadas en computadores o servidores.	Complejidad de instalación, usualmente se diseñan para un solo sistema operativo.
2	Base de datos no SQL	Son más versátiles en cuanto a escritura ya que no están estructuradas y con mayor capacidad de crecimiento.	Software poco documentado, puede provocar que algunas operaciones estén limitadas por la falta de documentación.

El almacenamiento de datos se puede realizar de distintas maneras, la convencional y más antigua es guardando los datos en algún medio de almacenamiento como discos duros o memorias de almacenamiento, actualmente varios desarrolladores de proyectos toman una visión más avanzada por obtener almacenamiento en la nube por medio de servidores en donde se decide alojar la base de datos que se utiliza.

3.3 El pre-procesamiento

El propósito del pre-procesamiento de datos es principalmente corregir las inconsistencias de los datos que serán la base en diferentes tipos de análisis. Se busca que los datos crudos se corrijan principalmente del ruido que es característico en un proceso DAQ, las inconsistencias más comunes se presentan cuando los datos son enviados de múltiples fuentes, es decir varios sensores que, aunque están sensando una misma variable pueden tener un principio de funcionalidad distinto. Tal es el caso de sensores de temperatura que pueden ser digitales o analógicos, cada uno presenta diferentes inconsistencias a pesar de sensar una misma variable “temperatura”.

La etapa del pre-procesamiento es característica por la aplicación de diferentes técnicas para lograr un filtrado o limpieza de datos, esta se puede lograr aplicando diferentes técnicas como los algoritmos o filtros de limpieza, también se pueden utilizar dispositivos electrónicos que por medio de librerías pre programadas realizan la depuración o simplemente utilizando instrumentación electrónica como elaboración de bancos de capacitores para la reducción consistente de ruido en las señales eléctricas. Cada una de estas técnicas se puede aplicar en diferentes circunstancias y dependiendo de las necesidades que se presenten en el proyecto.

3.3.1 Filtros de limpieza

En variadas ocasiones dentro del procesamiento de datos solamente se utilizan técnicas estadísticas, tales como las medidas de tendencia central a los datos obtenidos en el proceso de adquisición. Para tener un valor más común entre todos, basta con realizar una programación dirigida a estas técnicas, y así se pasa de datos crudos a datos discretos. Sin embargo, dentro de estos datos pueden aún existir datos inconsistentes que no han sido

corregidos. Para este tipo de casos se pueden utilizar algoritmos o filtros de limpieza.

Los filtros comúnmente utilizados son elaborados matemáticamente, relacionando ecuaciones o series de Fourier que son de ayuda para lograr una discretización de datos a un sistema que se podría definir como lineal o no lineal. Uno de los algoritmos de limpieza que pueden ayudar en situaciones donde los datos sean inconsistentes es el filtro de Kalman.

Este algoritmo se caracteriza por utilizar ecuaciones de estado y por medio de estas realiza un ciclo de trabajo programado en el cual se lleva a cabo una predicción de los datos y su margen de error, por medio de esta predicción se puede estimar la corrección de un dato faltante o erróneo en el sistema.

En la Figura. 3, podemos observar como el filtro de Kalman puede ser aplicado.

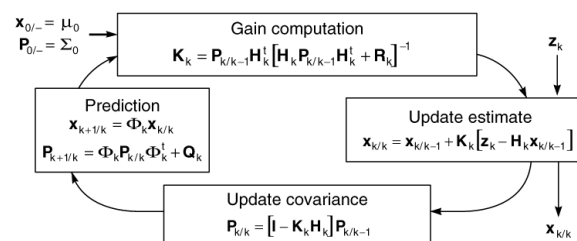


Figura 3. Ecuaciones matemáticas filtro de Kalman [4].

El filtro de Kalman realiza la estimación de una variable a partir de datos que fueron medidos o sensados por algún instrumento electrónico, lo realiza siguiendo dos pasos: por un lado, la predicción de los datos y por otro la incorporación de las observaciones (análisis de datos adquiridos) recogidas una vez corregidas. Así, el objetivo es tener un estimador óptimo en términos del error cuadrático que este filtro maneja. En definitiva, el filtro de Kalman procesa todas las mediciones que se realizan y convierten en datos, independientemente de que tan precisos sean. Este filtro como ya se mencionó antes tiene el objetivo de estimar el valor de las variables de interés, en base al conocimiento del sistema y las observaciones, junto a una descripción de ruido y errores [13].

Este filtro tiene una amplia gama de posibilidades para su aplicación. Es utilizado en varias situaciones, pero las más llamativas suelen ser evaluación de riesgos,

previsión del crecimiento de PIB en algunos países y últimamente es llamado por las aplicaciones de rastreo de la localización de algún elemento por alguna señal GPS desde sensores.

El punto de inicio de este filtro son ecuaciones de transición de estado, que por medio de estas se podrá describir a la evolución de una variable a lo largo del tiempo, junto a esto se tendrán ecuaciones de

observaciones, que describirán las observaciones medidas con la variable de estado. El filtro de kalman busca minimizar el error cuadrático medio y para ello el objetivo debe ser encontrar la ganancia que nos garantiza esta propiedad. En el diagrama de la figura 4 se presenta un diagrama donde se observa cómo aplicar el filtro de Kalman. En la figura 5 se presenta un modelo de bloques y tuberías para filtrar dos diferentes variables.

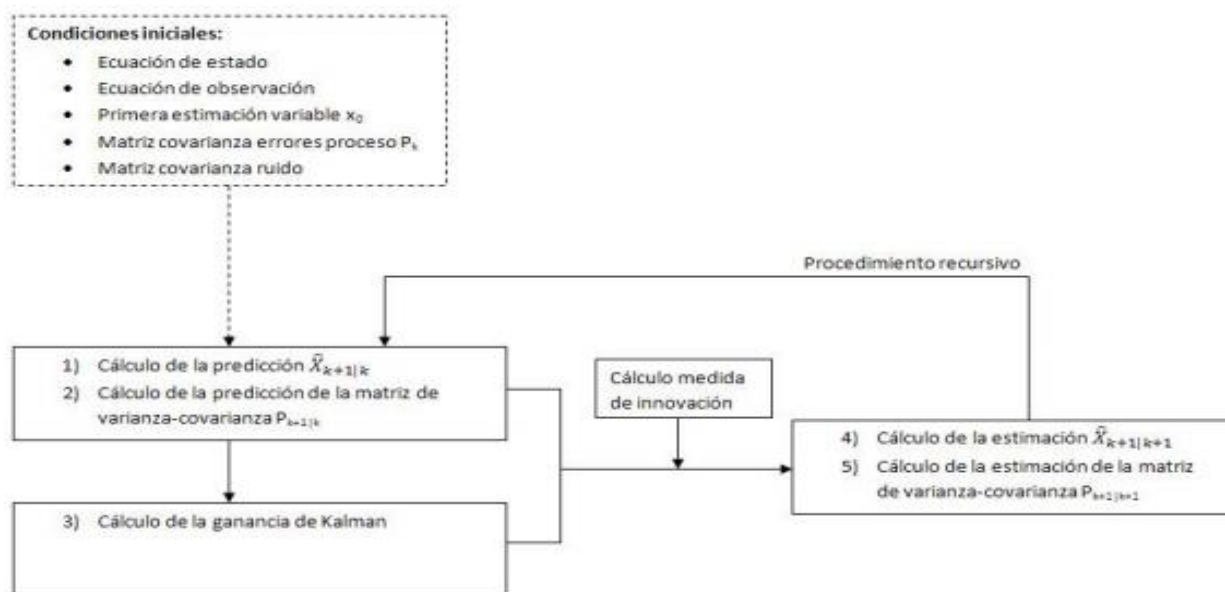


Figura 4. Diagrama para aplicación del filtro de Kalman [13]

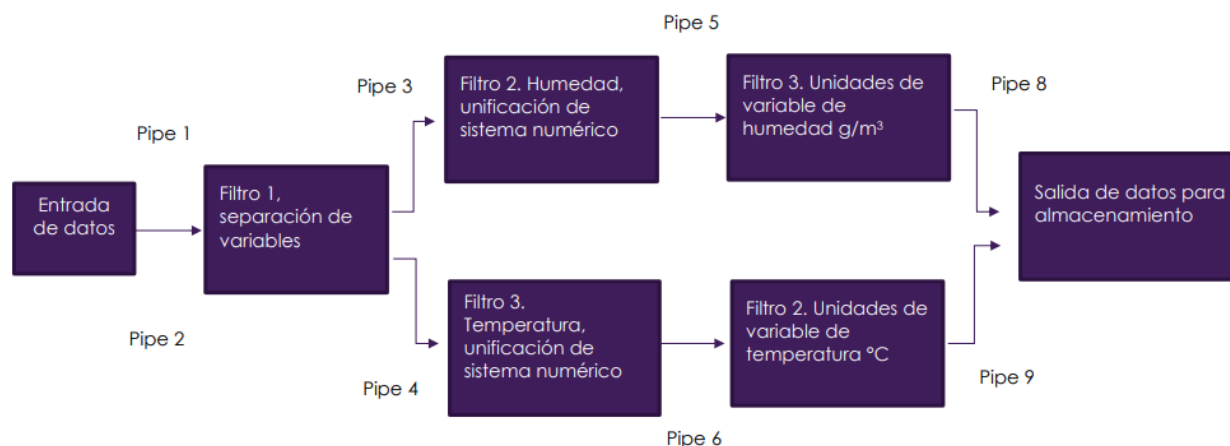


Figura 5. Arquitectura de bloques filtro – tubería para variables de humedad y temperatura

3.4 El procesamiento

Es la etapa destinada a transformar los datos obtenidos en información útil utilizando algoritmos. Los algoritmos son modelos ejecutables de fórmulas matemáticas y pueden programarse o utilizar librerías. Los datos procesados generalmente se envían a una base de datos para ser utilizados en diferentes aplicaciones.

Conclusiones

El modelo modificado de etapas para proyectos IoT que se propone, busca obtener datos consistentes y de calidad. Un dato de calidad se define como aquel que ha sido acondicionado por medio de procesos para eliminar sus variaciones ruidosas es decir de formato o velocidad de transmisión, de acuerdo al ambiente en el que se obtiene.

En la actualidad los proyectos de IoT demandan cada vez más exactitud y confiabilidad. El pre-procesamiento con el filtrado de datos ayuda para tener datos más confiables y evitar varios errores, inclusive para agilizar el almacenamiento en una base de datos.

Hasta el momento el uso de filtros para limpieza de datos se considera funcional, aunque esto no quiere decir que sea un proceso fácil, implica varios factores que a veces se vuelven de alto nivel, por implicar las relaciones de matemáticas avanzadas que primero deben de ser comprendidas por el usuario encargado de la depuración de datos a lo que podría ayudarnos a optimizar los proyectos de IoT. Al menos un porcentaje considerable de personas que desarrollan proyectos de pertenencia IoT, son personas de disciplinas distintas a las tecnologías por esta razón que la adaptación a metodologías informáticas se suele omitir dejándose guiar por la experimentación empírica hasta lograr su objetivo.

Esto provoca tener resultados deficientes en cuanto a calidad de datos debido a que estos solo son almacenados en algún manejador de datos comercial y discretizados por técnicas de probabilidad sencillas que para poder aplicarlas deberían de haberse sometido los datos a un proceso previo para depuración, es por ello

que la etapa del pre-procesamiento en desarrollos de internet de las cosas se vuelve de alta relevancia, por su aporte de convertir datos inconsistentes en homogéneos y de calidad.

Referencias

- [1] National Instruments, Sistemas DAQ, [En línea]. Disponible en: <https://www.ni.com> [Accedido: 23-mayo-2020]
- [2] S. Waidi, M. Areeb, “Desarrollo de DAQ de bajo costo para señales de sistemas de potencia utilizando Arduino”, IEEE 21st International Multi-Topic Conference, Karachi, Pakistán, 2018, pp.1-5 22
- [3] A. Arora, A. Kaur, B. Bhushan, H. Saini. “Preocupaciones de seguridad y tendencias futuras de Internet de las cosas”, 2a Conferencia internacional sobre tecnologías inteligentes de computación, instrumentación y control. New Delhi, India, 2019, pp. 891-896.
- [4] University of North Carolina at Chapel Hill’s Department of Computer Science, “The kalman Filter”, [En línea]. Disponible en: <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalmanLinks.html> [Accedido: 21-febrero-2021]
- [5] P. Rettore, B. Santos, R. Rigollin, G. Maia, L. Villas, A. Loureiro, “Marco de enriquecimiento de datos viales basado en fusión de datos heterogéneos para ITS”, IEEE transactions on intelligent transportation systems, Vol. 21, No. 4, pp. 1751-1766, abril 2020
- [6] S. Nath, S. Sinha, M. Gladence, B. Jinilla, V. Rajalakshmit, “Análisis de salud del ciclista y seguridad de la bicicleta con IoT”, International Conference on Communication and Signal Processing, India, 2017, pp. 0802-0806
- [7] I. López, A. Figueroa, J. Corrales, “Preparación de datos multidimensionales: un proceso para apoyar el análisis de vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático”, IEEE ACCESS, Vol. XX, pp. 1-16, junio 2017

[8] B. Ynzunza, J. Izar, J. Bocarando, F. Aguilar, M. Osorio, “El entorno de la industria 4.0 Implicaciones y perspectivas futuras”, *Conciencia tecnológica* Vol. 1, No.54, pp. 33-45, diciembre 2017

[9] S. Arjmand, C. Sipes. “Making Internet of Things Real”, *IEEE Internet of Things Magazine*, Vol. 9, No. 4, pp.1-3, marzo 2019

[10] J. Edwards, “Signal Processing Opens the Internet of Things to a New World of Possibilities”, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 17, No. 237, septiembre 2018

[11] M. Lu, N. Fang, L. Wang, Z. Huang y X. Sun, “Aplicación DAQ del osciloscopio de PC para el sistema de cerca de fibra óptica del caos basado en LabVIEW”, *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP)*, Shanghai, China, 2015, pp.1-8

[12] F. Li, X. Cheng, X. Zong y L. Li, “Comando algoritmo de detección de corriente basado en el filtro de Kalman”, *IEEE 4a Conferencia de Ingeniería de Tecnología de la Información y Mecatrónica (ITOEC)*, Chongqing, China, 2019, pp. 1048-1053

[13] L. Sánchez, J. Ordoñez, S. Infante, “Filtro de Kalman extendido y filtro de partículas Kalman extendido para problemas de estimación No Lineal”, *Revista Ingeniería UC*, Vol. 20, No. 1, pp. 7-16, abril 2018

[14] C. Chen y Huawei Company, “Un sistema de navegación peatonal basado en Wi- Fi que utiliza el filtro Kalman y el filtro de partículas”, *IEEE 4a Conferencia de Ingeniería de Tecnología de la Información y Mecatrónica (ITOEC)*, Chongqing, China, 2019, pp. 810-81

Comparación de la corriente de salida del convertidor *Buck* 1 vs 5 fases

Gabriel Verde Gómez* Carlos Aguilar Castillo ** Jesus Aguayo Alquicira *** Susana Estefany De León Aldaco ****

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, (e-mail: gabriel.verde19ea@cenidet.edu.mx)

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, (e-mail: carlos.ac@cenidet.tecnm.mx)

*** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, (e-mail: jesus.aa@cenidet.tecnm.mx)

**** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, (susana.da@cenidet.tecnm.mx)

Resumen: En este artículo se presenta una comparación por medio de simulación del comportamiento entre el convertidor reductor (*Buck*) síncrono de una sola fase y el convertidor reductor (*Buck*) síncrono multifase. El estudio consiste en analizar las diferentes características correspondientes a cada topología (rizo de la corriente, ciclo de trabajo y corriente de fase) y como se ve reflejada la corriente de salida en ambos convertidores, ya sea que afecte o beneficie al convertidor dependiendo el número de fases con el que se esté trabajando.

Palabras clave: Convertidor *Buck*, convertidor CD-CD, convertidor síncrono, convertidor multifase.

1. INTRODUCCIÓN

El convertidor es el módulo básico en un sistema de potencia el cual controla y moldea la magnitud eléctrica de entrada V_i , frecuencia f_i , y el número de fases m_o .

Los convertidores CD-CD se pueden utilizar para convertir un voltaje de CD, por lo general no regulado, a un voltaje de salida de CD regulado. La regulación normalmente se consigue mediante la modulación del ancho de pulso de una frecuencia fija, y el dispositivo de conmutación por lo regular es un BJT, MOSFET o IGBT de potencia. Existen cuatro topologías básicas para los reguladores conmutados (Lukic, Ahsanuzzaman, Prodic, & Zhao, 2009; Rashid, 2004).

- Convertidor reductor (*Buck*)
- Convertidor elevador (*Boost*)
- Convertidor reductor/elevador (*Buck/Boost*)
- Convertidor *Cuk*

1.1. Convertidor *Buck* asíncrono

El convertidor *Buck* es una topología que se utiliza ampliamente en aplicaciones donde los requerimientos de voltaje son reducidos y tanto la eficiencia como el tamaño del convertidor son un punto importante (Gordillo & Aguilar, 2017; Rashid, 2004). Esta topología requiere una sola señal de control debido a que el tiempo de conducción complementario está a

cargo de un diodo tal y como se puede apreciar en la Fig. 1.

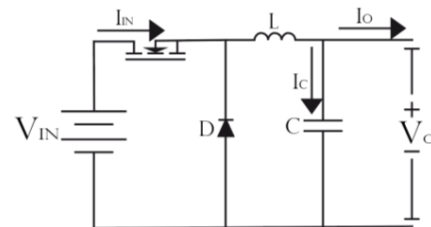


Fig. 1. Convertidor *Buck* con rectificación asíncrona.

A esta topología se le nombra *Buck* con rectificación asíncrona. En la Fig. 2, se aprecian la señal de control del interruptor y la forma de onda correspondiente a la corriente que circula por el inductor (la corriente del inductor en promedio es igual a la corriente de la carga) (Gordillo & Aguilar, 2017; Jiménez, 2012).

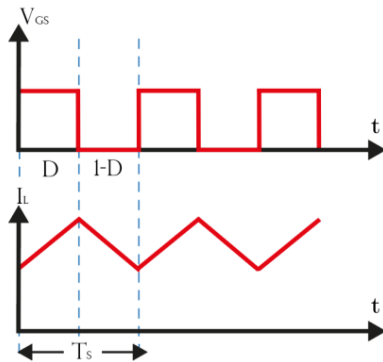


Fig. 2. Señal de control del interruptor (V_{GS}) y corriente en el inductor (I_L).

Esta topología cuenta con un inconveniente principal, el cual es la pérdida de potencia producida en cada uno de los inductores e interruptores, además de las pérdidas que se presentan en las diferentes etapas del convertidor (filtrado, control y rectificación), por lo tanto, las pérdidas se vuelven más significativas mientras más bajo sea el voltaje de salida.

Tomando como ejemplo la influencia de la etapa de rectificación en la eficiencia global del convertidor al ir disminuyendo el voltaje de salida (V_o), la eficiencia (η) del convertidor se calcula tomando en cuenta sólo las pérdidas de la etapa de rectificación (P_r). Tomando en consideración que la corriente de salida circula en todo momento por algún diodo, la eficiencia se puede determinar en (1), en la cual se aprecia que la caída de voltaje directa (V_d) en el diodo rectificador, es más significativa cuanto menor es el voltaje de salida del convertidor (Jiménez, 2012).

$$\eta = \frac{P_o}{P_d + P_o} = \frac{I_o \cdot V_o}{I_o \cdot V_d + I_o \cdot V_o} = \frac{V_o}{V_d + V_o} \quad (1)$$

1.2. Convertidor Buck síncrono

En convertidores CD-CD de bajo voltaje a la salida, es difícil lograr una eficiencia alta mediante el uso de diodos rectificadores. Como solución para mejorar la eficiencia, se recurre a la implementación de la rectificación síncrona. La rectificación síncrona se lleva a cabo, reemplazando el diodo rectificador por un MOSFET (del inglés *Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*) y así disminuir la potencia disipada en la rectificación e incrementar la eficiencia del convertidor (Fig. 3). Gordillo (2016).

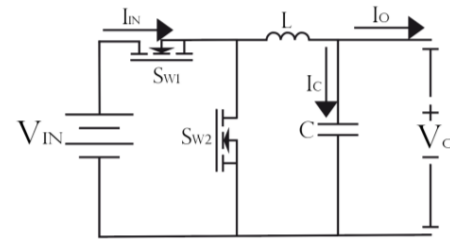


Fig. 3. Convertidor *Buck* con rectificación síncrona.

En la Fig. 4 se pueden observar las señales de control de ambos interruptores y la forma de onda de la corriente del inductor.

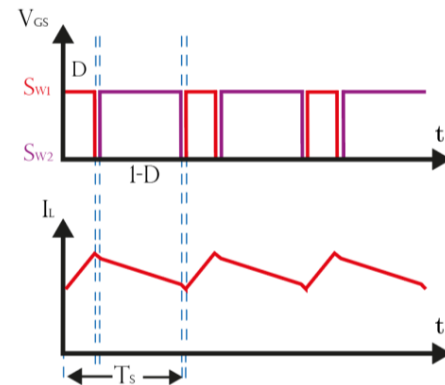


Fig. 4. Señales de control del interruptor (V_{GS}) y corriente en el inductor (I_L).

1.3. Convertidor multifase

Aunque el convertidor *Buck* síncrono llega a reducir en su mayoría las pérdidas por conducción y presentar una eficiencia alta, este debe poseer la habilidad de transferir de forma rápida la energía de la entrada a la salida, esto implica la necesidad de utilizar valores de inductancias pequeñas. Sin embargo, al utilizar inductancias pequeñas provoca que el rizo de corriente sea comparable a los picos de voltaje durante los transitorios de carga y no es recomendable que el convertidor opere de esta forma, de igual forma, es necesaria una capacidad de filtrado grande para reducir los rizados de voltaje a la salida. Para brindar solución a estos inconvenientes se ha optado en los últimos años por implementar los convertidores multifase. (Gordillo, 2016; Gordillo & Aguilar, 2017; Iqbal et al., 2018; Ribeiro, Cardoso, & Boccaletti, 2014).

Un convertidor multifase consiste en varios convertidores con las mismas características, conectadas en paralelo y sus señales de control se

encuentran desfasadas en el tiempo de forma que demanden energía a la entrada y la entreguen a la salida en momentos diferentes (Iqbal et al., 2018).

Al conectarse varios convertidores en paralelo es posible distribuir la corriente entre un mayor número de componentes, lo que conlleva a distribuir las pérdidas de potencia en los dispositivos de conmutación, a diferencia de la topología de una sola fase, cuyos componentes tendrían que soportar toda la corriente (Gordillo, 2016; Gordillo & Aguilar, 2017; Iqbal et al., 2018; Jiménez, 2012; Lukic et al., 2009).

Entre las principales ventajas que presentan los convertidores multifase, se encuentran: distribución de la potencia entre los convertidores, rápida respuesta transitoria, menor rizo en la tensión y corriente de salida, reducción del tamaño de los elementos de filtrado, entre otras (Gordillo, 2016; Gordillo & Aguilar, 2017; Iqbal et al., 2018; Jiménez, 2012).

En la Fig. 5, se muestra el esquema de un convertidor *Buck* con rectificación síncrona de cinco fases y en la Fig. 6, se muestran las respectivas señales de control de los interruptores superiores e inferiores, las corrientes que circulan por cada una de las fases y la corriente total de salida.

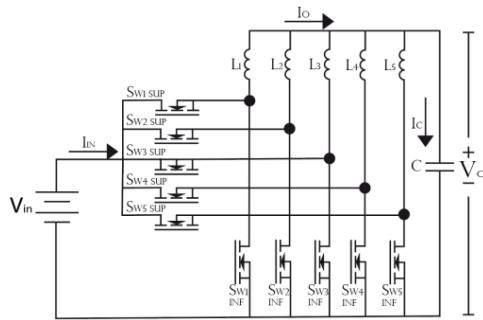


Fig. 5. Convertidor *Buck* multifase con rectificación síncrona.

Como se observa, el rizo de la corriente total de salida se reduce de acuerdo con el número de fases del convertidor (n). Además, las señales de control de los interruptores deben estar desfasadas de acuerdo con (2). Cabe mencionar que las señales de disparo de los interruptores inferiores son señales complementarias a las señales del interruptor superior de la fase correspondiente (García, Zumel, Castro, Alou, & Cobos, 2009; Gordillo, 2016; Gordillo & Aguilar, 2017; Iqbal et al., 2018; Jiménez, 2012; Lukic et al., 2009; Wassinger, Penovi, Retegui, & Maestri, 2019).

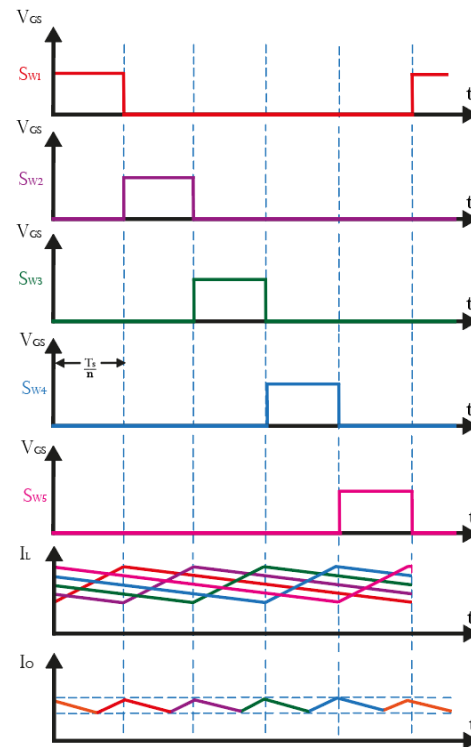


Fig. 6. Señales de control de interruptores (V_{GS}) y corrientes por fase (i_L), además de la corriente total de salida (i_o).

$$\Phi = \frac{360^\circ}{n} \quad (2)$$

2. SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR BUCK DE UNA SOLA FASE

En este apartado se presentan los resultados de la simulación de la topología de una sola fase de un convertidor *Buck* con rectificación síncrona (Fig. 7).

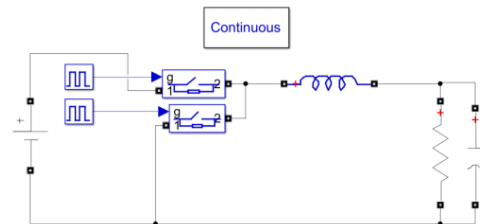


Fig. 7. Diagrama eléctrico del convertidor *Buck* con rectificación síncrona

La simulación se realizó en el software *Matlab®* utilizando el *toolbox Simulink®*. En la tabla 1, se presentan los parámetros tomados en cuenta para el diseño del convertidor a simular.

Tabla 1. Parámetros de diseño del convertidor

Parámetro	Valor y unidades
Tensión de entrada (V_{in})	10 V
Tensión de salida (V_o)	1.5 V
Corriente de carga (I_o)	80 A
Número de fases (n)	1
Frecuencia de conmutación	300 kHz
Rizo de tensión de salida (ΔV_o)	10 %
Rizo de corriente de fase (ΔI_L)	10 %

Por medio de (3) se calcula el ciclo de trabajo, con (4) se calcula el valor del inductor y en (5) se calcula el valor correspondiente al condensador.

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (3)$$

$$L = \frac{V_o(1-D)D}{\Delta_{iL}fs} \quad (4)$$

$$C = \frac{\Delta_{iL}}{8nfs\Delta V_c} \quad (5)$$

En la Fig. 8 se puede apreciar la corriente de salida del convertidor *Buck* con rectificación síncrona, podemos observar que la corriente que tendría que soportar la única fase del convertidor es de 80 A.

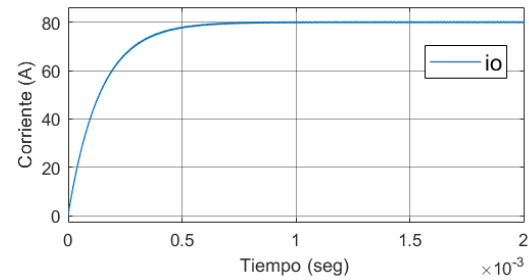


Fig. 8. Corriente de salida del convertidor *Buck* síncrono

3. SIMULACIÓN DEL CONVETIDOR BUCK A CINCO FASES

En este apartado se presentan los resultados de la simulación de la topología multifase de un convertidor *Buck* con rectificación síncrona.

En la Fig. 9 se puede observar el diagrama eléctrico correspondiente a dicha topología.

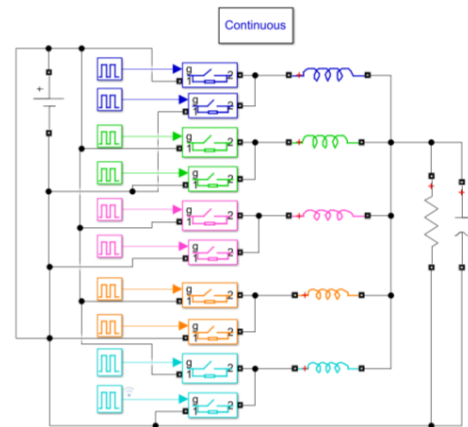


Fig. 9. Diagrama eléctrico del convertidor *Buck* multifase con rectificación síncrona

Los parámetros tomados en cuenta para esta topología son los mismos presentados en la Tabla 1 con la única diferencia de un incremento en el número de fases (n), las cuales ahora son cinco.

Como característica de los convertidores multifase, es que para realizar el cálculo de los elementos de filtrado se pueden utilizar de igual forma en (3), (4) y (5).

En la Figura 10, se puede observar el comportamiento de las corrientes correspondientes a cada una de las cinco fases del convertidor.

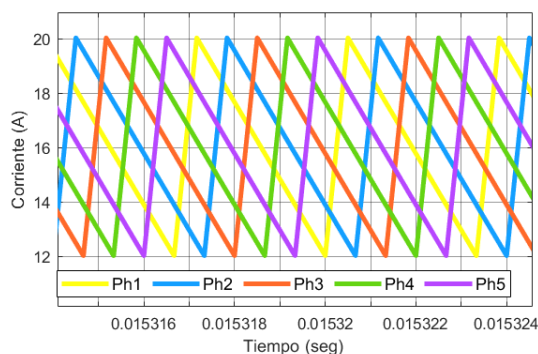


Fig. 10. Corrientes correspondientes a cada una de las cinco fases del convertidor.

En las corrientes de fase, podemos observar que el total de la corriente de salida se encuentra dividido entre cada una de las cinco fases por lo cual ya no circulan 80 A por una única fase, siendo ahora un valor de 16 A por fase.

En la Fig. 11 se puede apreciar la corriente de salida del convertidor *Buck* multifase con rectificación síncrona.

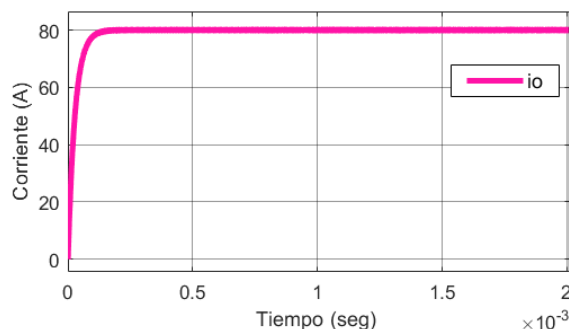


Fig. 11. Corriente de salida del convertidor *Buck* multifase síncrono

En la Fig. 12, se presentan las corrientes de salida correspondientes a la topología multifase comparándose contra la corriente de salida de la topología de una sola fase.

Fig. 12. Corrientes de salida de la topología multifase y la topología de una sola fase.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En las simulaciones anteriormente obtenidas se puede observar el comportamiento de la corriente con una y cinco fases. En la Fig. 11 se puede apreciar la corriente de salida correspondiente al convertidor de cinco fases, mientras que en la Fig. 8 se tiene la corriente de salida correspondiente a al convertidor de una sola fase. Se puede apreciar que ambos alcanzan una corriente nominal de 80 A, pero al compararlos en la Fig. 12, podemos apreciar que el rizo de la corriente del convertidor multifase (gráfica superior) es menor al rizo correspondiente del convertidor de una sola fase (gráfica inferior).

CONCLUSIONES

Al trabajar con la topología multifase y la topología de una sola fase, se puede obtener el mismo resultado. No obstante, si observamos la Fig. 11, se logra percibir que la corriente se estabiliza a 80 A en un menor tiempo que la topología de una sola fase (Fig. 8), en este caso, el multifase cuenta con cinco fases, por lo que alcanza su corriente nominal de salida cinco veces más rápido que la otra topología.

Cabe hacer mención que, al tratarse de una topología multifase, la corriente que circula por cada una de las fases es inferior a la topología de una sola fase, en este caso circula una corriente de 16 A por fase, mientras que en la otra topología circula una corriente igual a la corriente de salida (80 A). Además, se comparan ambos convertidores con los mismos valores en sus componentes para que se aprecié mejor el cambio en el rizo de la corriente.

Al circular una corriente menor por los componentes del circuito, la topología multifase posee la ventaja de que sus componentes se encuentran sometidos a un menor estrés y esto permite que se pueda reducir el tamaño de sus componentes teniendo así un impacto económico positivo, además de poseer un menor rizado en la corriente.

La potencia del convertidor multifase se distribuye entre los convertidores que lo conforman y posee una rápida respuesta transitoria.

REFERENCIAS

García, O., Zumel, P., Castro, A. d., Alou, P., & Cobos, J. A. (2009). Current Self-Balance

- Mechanism in Multiphase Buck Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(6), 1600-1606. doi:10.1109/TPEL.2009.2013859
- Gordillo, J. (2016). *Análisis de Técnicas para Distribución Equitativa de Corriente en Convertidores Multifase CD-CD*. (Doctorado), Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
- Gordillo, J., & Aguilar, C. (2017). A Simple Sensorless Current Sharing Technique for Multiphase DC-DC Buck Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(5), 3480-3489. doi:10.1109/TPEL.2016.2592240
- Iqbal, A., Moinoddin, S., Ahmad, S., Ali, M., Sarwar, A., & Mude, K. N. (2018). 15 - Multiphase Converters. In M. H. Rashid (Ed.), *Power Electronics Handbook (Fourth Edition)* (pp. 457-528): Butterworth-Heinemann.
- Jiménez, J. M. (2012). *Revisión de Técnicas de Control para el Balance de Corriente en un Sistema de Alimentación Multifase Basado en el convertidor Buck*. (Maestría), Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
- Lukic, Z., Ahsanuzzaman, S. M., Prodic, A., & Zhao, Z. (2009, 15-19 Feb. 2009). *Self-Tuning Sensorless Digital Current-Mode Controller with Accurate Current Sharing for Multi-Phase DC-DC Converters*. Paper presented at the 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition.
- Rashid, M. H. (2004). *Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones* (Pearson Ed. 3 ed.).
- Ribeiro, E., Cardoso, A. J. M., & Boccaletti, C. (2014). Open-Circuit Fault Diagnosis in Interleaved DC-DC Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(6), 3091-3102. doi:10.1109/TPEL.2013.2272381
- Wassinger, N., Penovi, E., Retegui, R. G., & Maestri, S. (2019). Open-Circuit Fault Identification Method for Interleaved Converters Based on Time-Domain Analysis of the State Observer Residual. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(4), 3740-3749. doi:10.1109/tpel.2018.2853574

Estudio de capacitores conmutados apilados para el manejo de LED utilizando un esquema unipolar en un convertidor Flyback CA-CD

Omar Rodríguez Benítez*. Mario Ponce Silva **. Alfredo González Ortega.

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
e-mail: (omar.rodriguez19ea@cenidet.edu.mx).

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
e-mail: (mario.ps@cenidet.tecnm.mx).

***Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
e-mail: (alfredo.go@cenidet.tecnm.mx).

Resumen: El uso de capacitores de película o cerámicos a partir de un esquema de capacitores conmutados apilados, aumentan la vida útil de los convertidores CA-CD monofásicos, al optimizar el desacoplamiento de energía realizado por capacitores electrolíticos. Este documento muestra un esquema de capacitor conmutado unipolar para una aplicación LED, utilizando un convertidor *flyback* CA-CD en modo de conducción discontinuo. El estudio presentado consiste en determinar la capacitancia total del esquema propuesto a partir de la variación en la densidad de energía de cada capacitor utilizado. La metodología de diseño presentada se valida en simulación con un modelo de controlador LED de 9.3 W, con un factor de potencia casi unitario.

Palabras clave: conversión CA-CD, capacitor conmutado, capacitores electrolíticos, doble de la frecuencia de red.

1. INTRODUCCIÓN

Los convertidores monofásicos CD-CA y CA-CD requieren de un almacenamiento de energía para amortiguar la diferencia de la potencia instantánea, pues la potencia en el puerto de CA (P_{ca}) varía al doble de la frecuencia de la línea, requiriendo de una potencia constante (P_{cd}) que será igual al valor promedio de P_{ca} como lo muestra la Fig. 1.

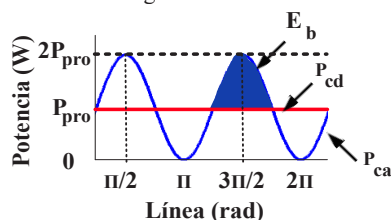


Figura 1. Potencia instantánea en los puertos de CD y CA

De la Fig. 1, la energía almacenada (E_b) se determina a partir de (1) (McHugh et al., 2016; Ni, Pervaiz, Chen, & Afridi, 2016; Tang, Chen, & Ran, 2015).

$$E_b = \frac{P_{cd}}{\omega_{línea}} \quad (1)$$

Donde, $\omega_{línea}$ es la frecuencia de la red eléctrica.

Debido a esto, el componente de almacenamiento de energía, dependerá exclusivamente de la potencia media del convertidor y la frecuencia de la línea, es decir, esta energía no se puede reducir a partir de un incremento en la frecuencia de conmutación del convertidor (f_{sw}).

Uno de los componentes más utilizados para almacenar el desacoplamiento de energía es el capacitor electrolítico debido a su densidad de energía alta y bajo costo. Sin embargo, la reducida vida útil y las limitaciones de temperatura son una preocupación, especialmente en aplicaciones donde se requiere de una vida útil alta como microinversores para sistemas fotovoltaicos y controladores para sistemas LED de potencia. En donde para estos últimos, uno de los retos más importantes es el gestionamiento de la energía que el convertidor CA-CD tiene que hacer (Luz, Cosetín, Bolzan, Maboni, & do Prado, 2015).

Por otro lado, debido a que la sustitución de los capacitores electrolíticos por capacitores de película o cerámicos no es posible debido a la diferencia de densidad de energía que existe entre cada uno de ellos (Afridi, Chen, & Perreault, 2013), es necesario estudiar un esquema que haga posible reducir la cantidad de energía total que debe ser almacenada en el amortiguamiento de energía, con el objetivo de optar por el uso de componentes que en principio ayuden a incrementar la

confiabilidad del sistema completo (M. Chen, Afridi, & Perreault, 2013; Liao et al., 2020).

Una de esas alternativas consiste en utilizar un sistema mediante el uso de convertidores con capacitores conmutados apilados (SCC por sus siglas en inglés), los cuales solamente están constituidos por interruptores y capacitores, mismos que pueden usar componentes cerámicos lo que ayuda no solo a tener un incremento en la confiabilidad del sistema, sino también a tener una resistencia serie muy pequeña, lo que permite utilizar una fracción de su energía mayor y poder cargarse y descargarse a frecuencias bajas (Schimpf & Norum, 2010).

La principal contribución de este documento es el estudio de un sistema LED de potencia CA-CD mediante el uso de una topología *flyback*, utilizando como esquema principal un SCC unipolar. La eficiencia de la metodología presentada se valida mediante resultados de simulación, utilizando un controlador LED de 9.3 W, una frecuencia de conmutación de 100 kHz y un ciclo de trabajo de 0.5.

La estructura del documento es la siguiente: en la Sección 2 se presenta de manera general la estructura y características de un SCC unipolar y bipolar, la Sección 3 muestra el análisis de la topología *flyback*, así como el estudio del convertidor *flyback* en conjunto con el SCC seleccionado, la Sección 4 muestra los resultados de simulación obtenidos y la Sección 5 las conclusiones.

2. SCC UNIPOLARES Y BIPOLARES

Un SSC, se compone de bloques de interruptores y capacitores conectados denominados de “soporte” y de “columna vertebral”. El principio de operación se basa en permitir el paso de voltaje en cada bloque individual para así poder variarlo en un rango amplio, el amortiguador de energía se carga y descarga lo que permite que una gran fracción de la energía almacenada pueda ser utilizada como amortiguador y al mismo tiempo es posible mantener el bus de CD (M. Chen et al., 2014), ya que la variación de voltaje es compensada entre los bloques (Pervaz, Ni, & Afridi, 2015). Existen dos esquemas de SSC, los cuales son los unipolares y bipolares como se muestra en la Figura 2. La principal diferencia entre ambos esquemas es que el bipolar está diseñado para que las conexiones de los bloques de capacitores de soporte pueden cambiar entre serie y anti-serie con los de columna vertebral, mientras que el diseño unipolar permite que entre los bloques de capacitores de columna vertebral y de soporte solo existan conexiones en serie (McHugh et al., 2016). De este modo, el esquema de la Figura 2(a), conocido como diseño unipolar de 1 a m, consta de un capacitor principal (C_{11}), m capacitores de apoyo ($C_{21}, C_{22}, \dots, C_{2m}$) los cuales tienen el mismo valor capacitivo, pero con diferentes clasificaciones de voltaje y (m+1) interruptores ($S_{20}, S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2m}$). Los capacitores $C_{21}, C_{22}, \dots, C_{2m}$ son precargados a los niveles de voltaje apropiados a través de una secuencia de precarga específica, cuyo funcionamiento es el siguiente: al comienzo del ciclo de descarga, todos los capacitores se cargan a sus voltajes máximos y S_{20} está encendido (los demás interruptores están apagados) conectando C_{11} a través del bus de CD y permitiendo que se descargue. Una vez que el voltaje

en el bus de CD (V_{Bus}) alcanza su valor mínimo permitido, S_{20} se apaga y S_{21} se enciende de modo que el voltaje en C_{21} sea la suma del voltaje en C_{11} elevando V_{Bus} a su máximo permitido. En este punto C_{11} y C_{21} se descargan en serie hasta que se alcanza de nuevo el umbral mínimo de tensión del bus y tiene lugar la siguiente transición del interruptor (es decir S_{21} se apaga y S_{22} se enciende) (J. Chen, Wang, & Li, 2018). Este procedimiento continúa hasta que se hayan utilizado todos los capacitores.

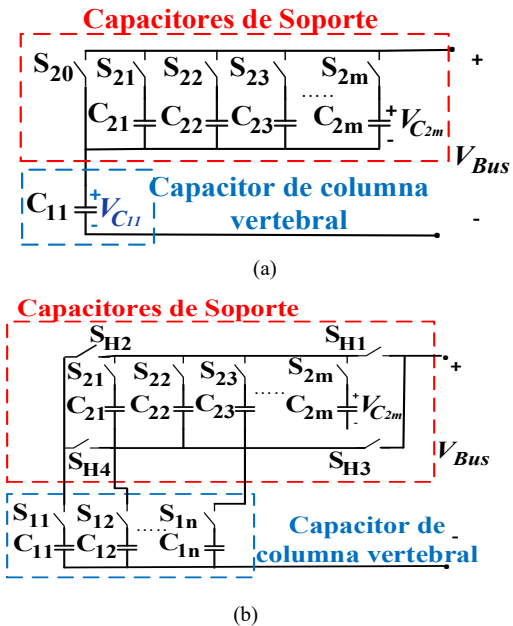


Fig. 2. Arquitectura de capacitores SCC: (a) unipolar, (b) bipolar (Ni et al., 2016).

En el caso del esquema mostrado en la Fig. 2(b), se presenta un diseño bipolar n-m el cual tiene n capacitores de columna vertebral ($C_{11}-C_{1n}$), m capacitores de soporte ($C_{21}-C_{2m}$) e interruptores (n+m+4). El valor de todos los capacitores es el mismo, pero a diferentes clasificaciones de voltaje y su funcionamiento se basa en que un capacitor de soporte sea conectado en serie o anti-serie con un capacitor de columna vertebral a través del bus de CD, este principio de funcionamiento viene dado por las conmutaciones en los interruptores del puente H (S_{H1}, S_{H2}, S_{H3} y S_{H4}).

Otra diferencia entre los dos esquemas mostrados en la Fig. 2, es que en el esquema unipolar se tiene un solo capacitor en el bloque de columna vertebral, en cuanto al diseño bipolar tiene un número ilimitado de capacitores de columna.

El diseño bipolar puede tener una mayor densidad de energía efectiva que los diseños unipolares (Lei & Pilawa-Podgurski, 2014). Sin embargo, debido a su simplicidad, el diseño unipolar es más adecuado para aplicaciones comerciales.

3. USO DE UN SSC UNIPOLAR, APLICADO A UN CONVERTIDOR FLYBACK

Para el análisis del SCC unipolar, se utiliza como convertidor CA-CD una topología *flyback* y un modelo de LED conformado por una fuente de voltaje (V_{led}) el cual es determinado por el voltaje de rodilla y una resistencia características del modelo de LED (R_{led}) bajo un esquema como el mostrado en la Fig. 3. Esta topología se diseña para funcionar en modo de conducción discontinuo (MCD), con el objetivo de conseguir un factor de potencia (FP) casi unitario (Ponce-Silva et al., 2020).

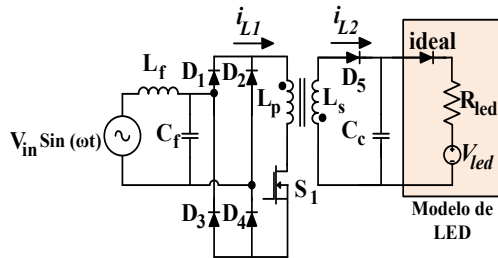


Fig. 3. Convertidor *flyback* (Salazar-Pérez, Ponce-Silva, Aquitapia, García-Guzmán, & Pérez-Cruz, 2020)

La topología de la Fig. 3, presenta un filtro EMI a la entrada para eliminar la componente de alta frecuencia de la forma de onda de corriente causada por la conmutación en alta frecuencia de S_1 , dicho filtro está conformado por los componentes L_f y C_f . Además, de un rectificador de onda completa ($D_1:D_4$), un transformador con su devanado primario (L_p) y secundario (L_s) y un componente de enlace para el desacoplamiento de energía (C_c) [12].

La Fig. 4, muestra los estados de encendido y apagado de la topología *flyback*, para los cuales cuando el convertidor se encuentra encendido (Fig. 4(a)) L_p estará conectado directamente a la fuente de alimentación, provocando un incremento del flujo magnético en el transformador, la tensión en L_s será negativa, por lo que el diodo D_5 estará polarizado inversamente, provocando que el C_c sea el único que proporcione energía a la carga (LED).

Por otro lado, cuando el convertidor se encuentre en el estado de apagado (Fig. 4(b)) la energía almacenada en el transformador es transferida a la carga y al capacitor de salida.

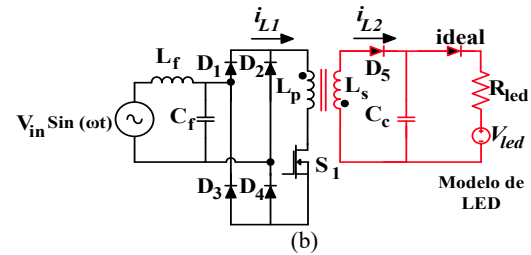
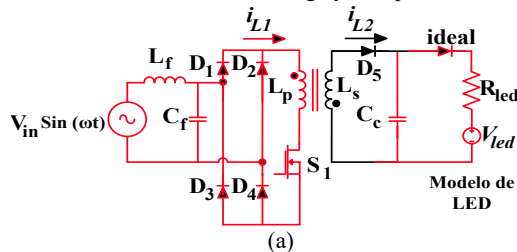


Fig. 4. Modos de operación de convertidor Flyback, (a) modo "ON", (b) modo "OFF".

Para validar el funcionamiento del convertidor se propone en este trabajo una metodología de diseño propuesto para la utilización de un capacitor electrolítico en el enlace. En la tabla 1 se muestran las especificaciones del diseño y en la tabla 2 se presenta la metodología de diseño.

Tabla 1. Especificaciones de diseño

Parámetro	Descripción	Valor
F_{sw}	Frecuencia de conmutación	100000 (hz)
D	Ciclo de trabajo	0.5
V_{ent}	Voltaje entrada	179.605 (V)
R_{led}	Resistencia de LED	7.5 (Ω)
V_{led}	Voltaje de LED	23.75 (V)
P_{led}	Potencia de LED	9.3 (W)

Tabla 2. Metodología de diseño

Parámetro	Descripción	Ecuación	Valor
R_a	Resistencia del arreglo	$R_a = \frac{R_{led}}{3}$	2.5000 (Ω)
V_{prim}	Voltaje promedio del primario	$V_{prim} = \frac{V_{led}}{2} * \left[1 + \sqrt{1 + (4 * P_{led} * R_{led})} \right]$	26.3928 (V)
i_0	Corriente promedio	$I_0 = \frac{V_{prim} - V_{led}}{R_a}$	1.0571 (A)
P_a	Potencia del arreglo	$P_a = 3 * P_{led}$	27.9000 (W)

i_{0max}	Corriente máxima en el LED	$i_{0max} = 2 * I_0$	2.1142 (A)
M	Ganancia	$M = \frac{V_{max}}{V_{ent}}$	0.1617
V_{max}	Voltaje máximo del Led	$V_{max} = (i_{0max} * R_a) + V_{led}$	29.035 5 (V)
n	Número de vueltas	$n = \frac{D}{M * Desc}$	6.8730
L_2	Inductor secundario	$L_2 = \frac{(Desc^2 * V_{max} * T_s)}{(2 * i_{0max})}$	1.3905 e-05 (H)
L_1	Inductor Primario	$L_1 = n^2 * L_2$	6.5685 e-04 (H)
i_{pkprim}	Corriente pico del primario	$i_{pkprim} = \frac{(V_{ent} * D * T_s)}{L_1}$	1.3672 (A)
i_{pksec}	Corriente pico del secundario	$i_{pksec} = \frac{(n * V_{ent} * D * T_s)}{L_1}$	9.3965 (A)
L_{EMI}	Filtro EMI	$L_{EMI} = \frac{1}{(2 * \pi * (\frac{10000}{10})^2 * 1e^{-6})}$	0.0253 (H)

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Con el objetivo de conocer el gestionamiento que tiene la topología completa con componentes reales es necesario mostrar el comportamiento del interruptor presentado en la Fig. 5.

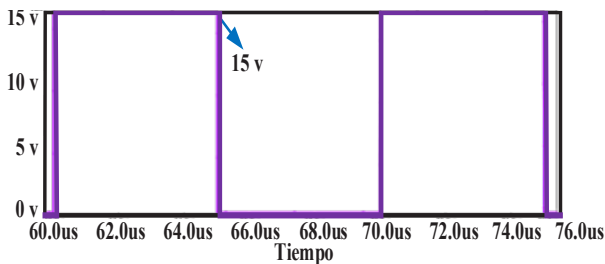


Fig. 5. Disparo del interruptor

La siguiente señal ayuda a identificar el correcto funcionamiento del convertidor completo, se visualiza el voltaje promediado entregado a LED (Fig. 6 a), y el voltaje de entrada al convertidor (Fig. 6 b), teniendo en cuenta esta vez la utilización de componentes reales el voltaje que recibe el LED es de 18.94 V siendo el valor pretendido de 23.75 V.

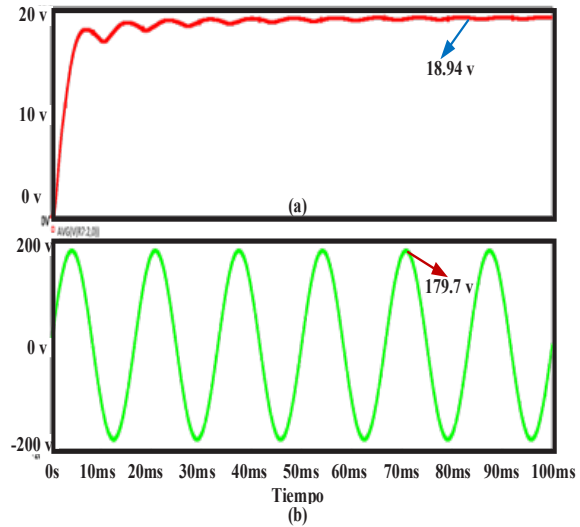


Fig. 6. (a) voltaje promedio entregado al LED, (b) voltaje de entrada al convertidor.

La Fig. 7 representa la potencia entregada al LED, siendo este parámetro muy importante para conocer qué tan eficiente será el sistema. El valor propuesto fue de 9.3 W y al usar componentes reales es de 8.5 W.

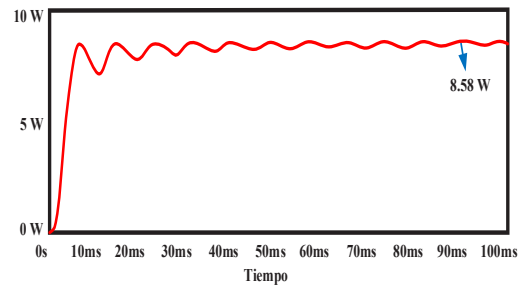


Fig. 7. Potencia de salida

Es posible estimar la eficiencia que el convertidor propuesto presenta, esta estimación se verifica simplemente comparando la potencia de salida con respecto a la potencia de entrada como se muestra a continuación:

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} = \frac{8.58 \text{ W}}{9.3 \text{ W}} = 0.922$$

Una vez validado el funcionamiento del convertidor completo con los elementos reales, se presenta la arquitectura del convertidor utilizando capacitores conmutados. Para ello la Fig. 8, muestra el esquema completo del convertidor *flyback* y el esquema utilizando un SSC unipolar de 1-m.

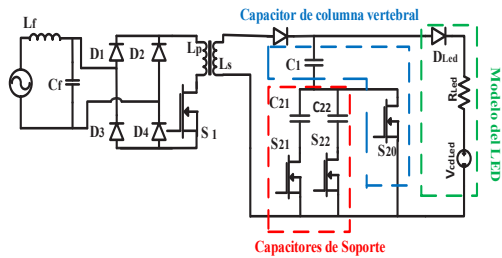


Fig. 8. Convertidor *flyback* con capacitores conmutados unipolares

La Ec.2 representa el valor de la capacitancia requerido para los capacitores conmutados.

$$C_1 = \frac{2 * P_{cd}}{(2 * \pi * 60) V_{nom}^2 * R * R_v \left[1 + 2 \sum_{j=1}^m \frac{\alpha 2 j}{(1 + \alpha 2 j)} \right]} \quad (2)$$

Para el cálculo de los capacitores conmutados apilados se consideran las capacitancias iguales, tanto para el capacitor de columna, como los de soporte, dichas consideraciones se muestran en la tabla 3 (Nakagawa & Koizumi, 2018).

Tabla 3. Consideraciones para el cálculo de los capacitores conmutados

$i_{c11} = (1 - R_v) V_{nom}$	$V_{nom} = \frac{9}{8} - V_{bus} * R_v$
$i_{c21} = (1 + R_v) V_{nom}$	$V_{nom} = \frac{4}{8} - V_{bus} * R_v$
$i_{c23} = (1 - R_v) V_{nom}$	$V_{nom} = \frac{3}{8} - V_{bus} * R_v$

Contemplando las consideraciones de la Tabla 3 y utilizando la metodología de capacitancias iguales, queda definida la ecuación para el cálculo de los capacitores de columna y de soporte.

$$V_{c21} = 2 * R_v * V_{nom} = 2.2 \mu F \quad (3)$$

El valor de los capacitores conmutados es de $2.2 \mu F$ cómo se menciona en (3) por lo que a continuación, se presentan los resultados de simulación para la estructura completa.

Del circuito presentado en la Fig. 9, la Figura 10 muestra la potencia de salida medida en simulación.

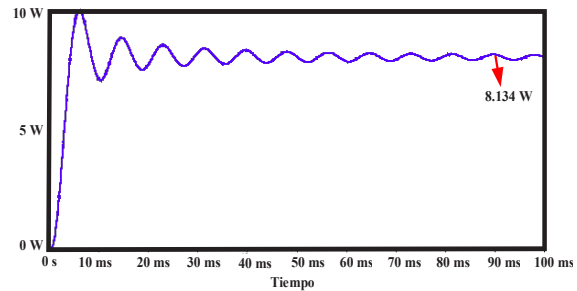


Fig. 9. Potencia de salida

La potencia de salida en la Fig. 9, no presenta ninguna variación que afecte el desempeño en la carga al utilizar el esquema de SSC.

Por otro lado, la Fig. 10 muestra el factor de potencia obtenido en simulación, el cual muestra que gracias al uso del filtro utilizado a la entrada del convertidor *flyback*, es posible obtener un factor de potencia casi unitario.

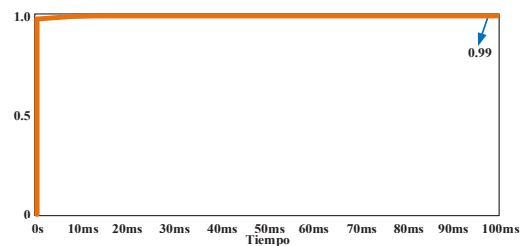


Fig. 10. Factor de potencia utilizando capacitores conmutados apilados

5. CONCLUSIONES

Este documento muestra una metodología para incrementar la densidad de energía efectiva en una aplicación LED, utilizando un esquema de SSC unipolar de 1-m en un convertidor CA-CD *flyback*.

A partir del estudio presentado, se muestra que la mejora en la densidad de energía depende de el rizo de voltaje requerido y del número de capacitores de soporte y vertebra utilizados en el bus de CD, lo que reduce aún más el volumen pasivo de los amortiguadores de energía bajo un esquema de SSC.

La eficacia de la metodología de diseño presentada, se valida en simulación con un modelo de controlador LED de 9.3 W, con un factor de potencia casi unitario.

REFERENCIAS

- Afridi, K. K., Chen, M., & Perreault, D. J. J. I. T. o. I. A. (2013). Enhanced bipolar stacked switched capacitor energy buffers. *50*(2), 1141-1149.
- Chen, J., Wang, C., & Li, J. J. E. (2018). An input-parallel-output-series switched-capacitor three-level boost converter with a three-loop control strategy. *11*(10), 2631.

- Chen, M., Afridi, K. K., & Perreault, D. J. I. T. o. P. E. (2013). Stacked switched capacitor energy buffer architecture. *28*(11), 5183-5195.
- Chen, M., Ni, Y., Serrano, C., Montgomery, B., Perreault, D., & Afridi, K. (2014). *An electrolytic-free offline LED driver with a ceramic-capacitor-based compact SSC energy buffer*. Paper presented at the 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).
- Lei, Y., & Pilawa-Podgurski, R. C. N. J. I. T. o. P. E. (2014). A general method for analyzing resonant and soft-charging operation of switched-capacitor converters. *30*(10), 5650-5664.
- Liao, Z., Lohan, D. J., Brooks, N. C., Allison, J. T., Pilawa-Podgurski, R. C. J. I. J. o. E., & Electronics, S. T. i. P. (2020). A Systematic Design Methodology for Series-Stacked Energy Decoupling Buffers Based on Loss-Volume Pareto Optimization. *8*(3), 2192-2205.
- Luz, P. C., Cosetin, M. R., Bolzan, P. E., Maboni, T., & do Prado, R. N. (2015). *A family of insulated integrated drivers to feed LED's lamps to street lighting with reduced capacitances*. Paper presented at the 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE).
- McHugh, C., Sinha, S., Meyer, J., Pervaiz, S., Lu, J., Zhang, F., . . . Kumar, A. (2016). *A high power density single-phase inverter using stacked switched capacitor energy buffer*. Paper presented at the 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC).
- Nakagawa, Y., & Koizumi, H. J. I. T. o. P. E. (2018). A boost-type nine-level switched capacitor inverter. *34*(7), 6522-6532.
- Ni, Y., Pervaiz, S., Chen, M., & Afridi, K. K. J. I. T. o. P. E. (2016). Energy density enhancement of stacked switched capacitor energy buffers through capacitance ratio optimization. *32*(8), 6363-6380.
- Pervaiz, S., Ni, Y., & Afridi, K. K. (2015). *Improved capacitance ratio optimization methodology for stacked switched capacitor energy buffers*. Paper presented at the 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC).
- Ponce-Silva, M., Salazar-Pérez, D., Rodríguez-Benítez, O., Vela-Valdés, L., Claudio-Sánchez, A., De León-Aldaco, S., . . . Aquí-Tapia, J. (2020). Flyback Converter for Solid-State Lighting Applications with Partial Energy Processing. *Electronics* 2021, 10, 60. In: s Note: MDPI stays neu-tral with regard to jurisdictional clai-ms in
- Salazar-Pérez, D., Ponce-Silva, M., Aquí-Tapia, J. A., García-Guzmán, J., & Pérez-Cruz, J. H. J. I. P. E. (2020). Effects of the LED modelling on the output capacitance of power converters. *13*(15), 3467-3474.
- Schimpf, F., & Norum, L. (2010). *Effective use of film capacitors in single-phase PV-inverters by active power decoupling*. Paper presented at the IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society.
- Tang, Y., Chen, M., & Ran, L. J. I. T. o. P. E. (2015). A compact MMC submodule structure with reduced capacitor size using the stacked switched capacitor architecture. *31*(10), 6920-6936.

Análisis y Evaluación de la Capacitancia de Salida en Rectificadores con Filtro RC Monofásicos

N. D. Paniagua Peñaloza* M. Ponce Silva**
D. Salazar Pérez***L. G. Vela Valdés ***

Tecnológico Nacional de México: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Mor., México

* e-mail: nancy.paniagua19ea@cenidet.edu.mx

**e-mail: mario.ps@cenidet.tecnm.mx

*** e-mail: daniel.salazar@cenidet.edu.mx

**** e-mail: luis.vv@cenidet.tecnm.mx

Resumen: En la búsqueda de reducir el capacitor de salida en los convertidores CA-CD se ha olvidado el punto de partida y el origen del problema, el cual surge antes que las fuentes conmutadas con los rectificadores sencillos de diodos. Es por eso que en este trabajo se busca determinar matemáticamente el porque es necesaria una capacitancia tan grande para obtener bajos rizados de voltaje a la salida. Se realizó un análisis matemático a detalle de las principales topologías de rectificadores, media onda, onda completa y onda completa con filtro RC. Se destaca la obtención de ecuaciones precisas para el cálculo del capacitor de salida en el rectificador de onda completa con el filtro RC, además de una ecuación que predice la corriente demandada a fuente de voltaje durante los instantes de conducción. Finalmente, se pusieron a prueba las ecuaciones comparando los cálculos con una simulación de Spice.

Palabras clave: Corriente Alterna CA, Corriente Directa CD, Media Onda, Onda completa, Puente de Diodos, Filtro RC, Corriente del capacitor, Convertidores CA-CD.

1. INTRODUCCIÓN

El control de la energía eléctrica requiere una conversión de energía de CA a CD y viceversa (Aparna & BABU, 2018), la conversión de CA a CD se conoce típicamente como rectificación. El propósito del rectificador es proporcionar una salida de voltaje constante, se desarrollan utilizando arreglo de diodos y tiristores para la conversión controlada y no controlada (Singh et al., 2003).

En la actualidad hay muchos trabajos que buscan la reducción de la capacitancia de salida en convertidores CA-CD, con tal de evitar el uso de los capacitores electrolíticos, que acortan la vida de las fuentes conmutadas, sin embargo, ninguno hace énfasis en porque dicha capacitancia suele ser tan grande en los rectificadores convencionales (Salazar-Pérez, Ponce-Silva, Aquí-Tapia, García-Guzmán, & Pérez-Cruz, 2020), como los presentados en este trabajo, por eso es importante hacer un análisis que describa de forma matemáticamente correcta del comportamiento de la capacitancia y su función con el rizo de voltaje de salida para que sirva como punto de comparación con las nuevas topologías que vayan surgiendo (Eshkevari, Mosallanejad, & Sepasian, 2019).

Un rectificador de diodos es un dispositivo con flujo de energía unidireccional no controlada, que rectifica el voltaje y corriente alterna para aplicaciones en fuentes de alimentación de voltaje directo, carga de baterías, el proceso electromecánico, entre otros (Ghosh, Acharya, & Halder, 2016). Las topologías

monofásicas y trifásicas de los rectificadores se adaptan a altos y bajos niveles de voltaje, la generación de energía eléctrica a gran escala se genera mediante máquinas trifásicas de CA y su aplicación implica cargas de CD (Arvindan, Ashwin, & Murthi, 2018). Además, en las cargas de CD es importante obtener un bajo rizado de voltaje de salida para su correcto funcionamiento (Gupta, Vamanan, & John, 2017).

El rectificador media onda se emplea en aplicaciones de baja potencia, el cual es adecuado para alimentación desde la red monofásica y se emplea con un solo diodo. El diodo es un interruptor que solo permite el flujo de corriente en un sentido. En un semiciclo positivo, el diodo se polariza en directo, el voltaje en el diodo es igual a cero y la corriente positiva. Cuando el semiciclo es negativo el diodo se polariza en inversa y la corriente es igual a cero.

El rectificador con transformador de derivación central y el puente de diodos son dos topologías básicas monofásicas de onda completa. El rectificador onda completa presenta menos rizado en comparación al de media onda y el semiciclo negativo de la señal se convierte en positivo. El rectificador tipo puente tiene aplicaciones en alto voltaje debido al menor voltaje pico de los diodos. El rectificador con transformador con derivación central proporciona aislamiento galvánico y es adecuado en aplicaciones de bajo voltaje y alta corriente.

La estructura de un rectificador convencional consta del arreglo de diodos, un condensador de carga y una resistencia de carga

ondulaciones de voltaje, al añadir un condensador en paralelo con una carga resistiva produce un menor rizo a la salida (Maulik & John, 2019). El condensador reacciona a cualquier cambio de voltaje del circuito y el tiempo de carga del capacitor y la resistencia es muy corto. Cuando el voltaje del rectificador llega a cero, el capacitor tarda en descargarse completamente, la energía almacenada en el capacitor se descarga cuando el rectificador no suministra energía. Después de que el capacitor se descargue, no hay flujo de corriente hasta que la tensión de salida del rectificador se mayor a la tensión en el condensador (Aparna & BABU, 2018), esto genera una salida de voltaje casi constante.

El principal aporte de este trabajo es el análisis del rectificador onda completa con filtro RC de tal modo que se obtienen ecuaciones para el cálculo de capacitancia y de la corriente demandada a la fuente de una manera fácil y precisa.

En este artículo se presenta un estudio exhaustivo sobre los rectificadores. El trabajo se divide de la siguiente manera: la sección 2 muestra el análisis matemático del rectificador de media onda, rectificador onda completa y el rectificador onda completa con filtro RC. En la sección 3 se muestran los resultados de simulación en Spice del rectificador de onda completa con filtro RC.

2. ANÁLISIS DE LOS RECTIFICADORES MONOFÁSICOS

En esta sección se realiza un análisis matemático de los tres rectificadores básicos, media onda, onda completa y onda completa con filtro RC.

2.1 Rectificación Media Onda

El rectificador de media onda monofásico es el rectificador más sencillo. En la Fig. 1 a) se observa el diagrama del circuito con carga resistiva, está conformado únicamente por un diodo. Durante el semiciclo positivo del voltaje de entrada, el diodo se polariza directamente y la corriente fluye de la fuente a la carga. El voltaje en una carga resistiva se expresa de la siguiente manera (1), considerando al diodo ideal:

$$V_R = \begin{cases} V_p \sin(\omega t) & 0 < \omega t < \pi \\ 0 & \pi < \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

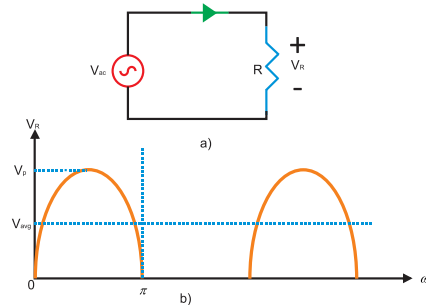


Fig. 1 a) Rectificador de media onda con carga resistiva. b) Voltaje de salida.

El voltaje pico de la fuente menos la caída de voltaje del diodo es igual al voltaje pico en la carga, como se observa en Fig. 1 b). El voltaje promedio (\$V_{avg}\$) es la componente continua del voltaje de salida del rectificador media onda, y se puede calcular como:

$$V_{avg} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_p \sin(\omega t) dt = \frac{V_p}{\pi} \quad (2)$$

Mientras que el valor RMS de una forma de onda periódica se define como:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_p^2 \sin^2(\omega t) dt} = \frac{V_p}{2} \quad (3)$$

2.2 Rectificación Onda Completa Con Puente De Diodos.

El rectificador onda completa consta de un puente de cuatro diodos, el cual se observa en Fig. 2. Durante el semiciclo positivo los diodos \$D_{a1}\$ y \$D_{a4}\$ se polarizan directamente y fluye la corriente a la carga. Durante el semiciclo negativo \$D_{a2}\$ y \$D_{a3}\$ se polarizan directamente y suministran corriente a la carga.

En este caso el voltaje en una carga resistiva se puede expresar de la siguiente manera:

$$V_R = \begin{cases} V_p \sin(\omega t) & 0 < \omega t < \pi \\ -V_p \sin(\omega t) & \pi < \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (4)$$

La componente continua en el voltaje de salida se calcula:

$$V_{avg} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi V_p \sin(\omega t) dt = \frac{2V_p}{\pi} \quad (5)$$

El voltaje RMS de salida es:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi V_p^2 \sin^2(\omega t) dt} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

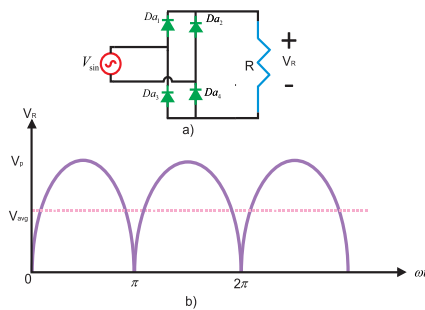


Fig. 2 a) Rectificador onda completa con puente. b) Voltaje de salida.

Para este caso el voltaje de entrada es igual al voltaje pico en la carga considerando los diodos ideales, como se observa en Fig. 2.

2.3 Rectificación Puente Completo Con Filtro RC

El rectificador de onda completa tiene una gran ondulación de voltaje a la salida; sin embargo, al conectar un condensador de una alta capacitancia en paralelo a la resistencia de carga, el rizo de voltaje disminuye, este efecto se observa en la Fig. 3. Esta configuración es la más utilizada de los rectificadores convencionales.

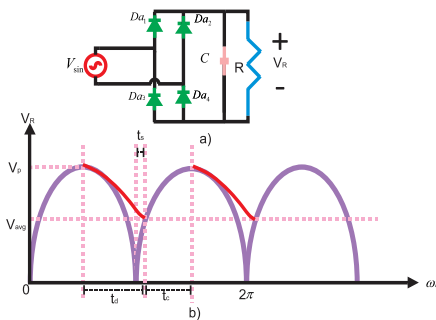


Fig. 3 a) Rectificador puente completo con filtro RC. b) Voltaje de salida

En esta configuración existen estados transitorios causados por la carga y descarga del capacitor. Durante el periodo \$t_d\$ el capacitor se descarga de acuerdo a (7) y se detendrá hasta que el voltaje de capacitor iguale al voltaje del rectificador. A este punto se le denomina voltaje mínimo (\$V_{min}\$) que se define en (8).

$$v_c(t) = V_p e^{-\frac{t}{RC}} \quad (7)$$

$$V_{min} = V_p e^{-\frac{t_d}{RC}} \quad (8)$$

Para obtener el valor del capacitor C se despeja de (8) y se obtiene:

$$C = \frac{-t_d}{R \ln \left(\frac{V_{min}}{V_p} \right)} \quad (9)$$

El tiempo \$t_s\$ es el tiempo que tarda la forma de onda del voltaje de CA rectificado en alcanzar el voltaje mínimo \$V_{min}\$ después del cruce de voltaje por cero.

$$V_{min} = V_p \sin(\omega t_s) \quad (10)$$

Despejando \$t_s\$ de (10) se obtiene:

$$t_s = \frac{\sin^{-1} \left(\frac{V_{min}}{V_p} \right)}{\omega} \quad (11)$$

De la Fig. 3 se observa que \$t_s\$ y \$t_c\$ son suplementarios de modo que:

$$t_s + t_c = \frac{T}{4} \quad (12)$$

Sustituyendo \$t_s\$ de (11) en (12), el tiempo de carga \$t_c\$ se puede calcular con:

$$t_c = \frac{T}{4} - t_s = \frac{T}{4} - \frac{\sin^{-1} \left(\frac{V_{min}}{V_p} \right)}{\omega} \quad (13)$$

Volviendo a la Fig. 3 se observa que \$t_d\$ y \$t_c\$ son complementarios de modo que:

$$t_d + t_c = T / 2 \quad (14)$$

Despejando \$t_d\$ de (14) y sustituyendo (13) obtenemos una expresión para el tiempo de descarga en función de los voltajes involucrados, como se muestra en (15).

$$t_d = \frac{T}{2} - t_c = \frac{T}{2} - \left(\frac{T}{4} - t_s \right) = \frac{T}{4} + \frac{\sin^{-1} \left(\frac{V_{min}}{V_p} \right)}{\omega} \quad (15)$$

Para simplificar más, se puede expresar el rizo de voltaje normalizado \$V_r\$ de la siguiente manera:

$$V_r = \frac{V_p - V_{min}}{V_p} \quad (16)$$

Despejando la razón del voltaje pico y el voltaje mínimo de (16) se obtiene:

$$\frac{V_{min}}{V_p} = 1 - V_r \quad (17)$$

Sustituyendo (17) en (15) se obtiene

$$t_d = \frac{T}{4} + \frac{\sin^{-1}(1 - V_r)}{\omega} \quad (18)$$

Finalmente obtenemos la ecuación para el cálculo del capacitor C al sustituir (18) en (9) y se obtiene:

$$C = \frac{-\left[\frac{T}{4} + \frac{\sin^{-1}(1-V_r)}{\omega}\right]}{RLn(1-V_r)} = \frac{-\left[\frac{\pi}{2} + \sin^{-1}(1-V_r)\right]}{2\pi fRLn(1-V_r)} \quad (19)$$

De (19) la constante de tiempo RC estará dado por:

$$\tau = RC = \frac{-\left[\frac{\pi}{2} + \sin^{-1}(1-V_r)\right]}{2\pi fLn(1-V_r)} \quad (20)$$

Si regula el valor del rizo normalizado de (20) y se grafica contra la constante de tiempo se obtiene la Fig. 4. De ella se puede observar que, a menor rizo, mayor constante de tiempo y por lo tanto se necesitará una mayor capacitancia.

Para el analizar la corriente del capacitor en el rectificador, se aplica la ley de voltajes de Kirchoff a la malla sombreada, como se observa en Fig. 5, se obtiene:

$$v_{ac} = i_c R_s + v_c = i_c R_s + \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (21)$$

Derivando (21) obtenemos (22) y despejando i'_c se obtiene la ecuación diferencial lineal de primer orden con coeficientes constantes:

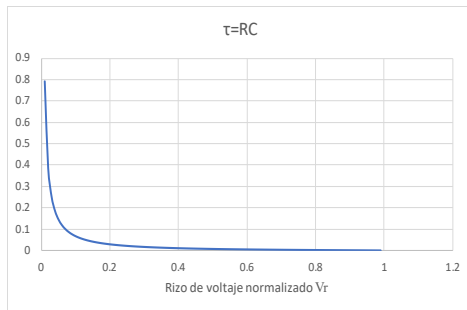


Fig. 4. Grafica de rizo de voltaje normalizado vs constante de tiempo.

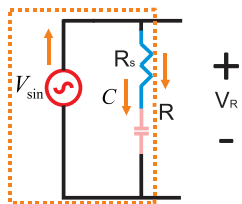


Fig. 5 Filtro RC

$$v'_{CA} = i'_c R_s + \frac{i}{C} \quad (22)$$

$$i'_c + \frac{i}{R_s C} = \frac{v'_{CA}}{R_s} = \frac{\omega V_p \cos(\omega t)}{R_s} \quad (23)$$

La solución general de la ecuación diferencial de (23) es:

$$i_c = e^{-\frac{t}{R_s C}} \left[\int \frac{\omega V_p}{R_s} \cos(\omega t) e^{\frac{t}{R_s C}} dt + k \right]$$

$$i_c = \frac{\omega V_p}{R_s} e^{-\frac{t}{R_s C}} \int \frac{\omega V_p}{R_s} \cos(\omega t) e^{\frac{t}{R_s C}} dt + k e^{-\frac{t}{R_s C}} \quad (24)$$

Donde k es la constante de integración. Resolviendo la integral correspondiente se obtiene:

$$i_c = \frac{\omega V_p}{R_s} e^{-\frac{t}{R_s C}} \left[R_s C e^{\frac{t}{R_s C}} \frac{R_s C \omega \sin(\omega t) + \cos(\pi \omega t)}{(\omega R_s C)^2 + 1} \right] + k e^{-\frac{t}{R_s C}} \quad (25)$$

La impedancia del capacitor está dada por (26), se sustituye en (25) y se obtiene (27).

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (26)$$

$$i_c = \frac{V_p}{X_C} \left[\frac{\frac{R_s}{X_C} \sin(\omega t) + \cos(\pi \omega t)}{\left(\frac{R_s}{X_C}\right)^2 + 1} \right] + k e^{-\frac{t}{R_s C}} \quad (27)$$

Simplificamos el argumento entre corchetes de (27):

$$\frac{\frac{R_s}{X_C} \sin(\omega t) + \cos(\pi \omega t)}{\left(\frac{R_s}{X_C}\right)^2 + 1} = \frac{\frac{1}{X_C} [R_s \sin(\omega t) + X_C \cos(\pi \omega t)]}{\frac{R_s^2}{X_C^2} + 1} = \frac{\frac{1}{X_C} [R_s \sin(\omega t) + X_C \cos(\pi \omega t)]}{\frac{R_s^2 + X_C^2}{X_C^2}}$$

$$= \frac{X_C}{\sqrt{R_s^2 + X_C^2}} \left[\frac{R_s}{\sqrt{R_s^2 + X_C^2}} \sin(\omega t) + \frac{X_C}{\sqrt{R_s^2 + X_C^2}} \cos(\pi \omega t) \right]$$

$$= \frac{X_C}{\sqrt{R_s^2 + X_C^2}} \sin(\omega t + \theta) \quad (28)$$

La corriente en el capacitor queda como:

$$i_c = \frac{V_p}{\sqrt{X_C^2 + R_s^2}} \sin(\omega t + \theta) + k e^{-\frac{t}{R_s C}} \quad (29)$$

Para encontrar el valor de la constante k se utilizan las condiciones iniciales al momento que se aplica v_{CA} a la carga, lo cual sucede en t_s , en ese momento el capacitor se está descargando a través de R , por lo tanto:

$$i_c(t_s) = \frac{-v_{CA}(t_s)}{R} = \frac{V_{\min}}{R} \quad (30)$$

Sustituyendo este valor en la ecuación de corriente:

$$\frac{-V_{\min}}{R} = \frac{V_p}{\sqrt{X_C^2 + R_s^2}} \sin(\omega t_s + \theta) + k e^{-\frac{t_s}{R_s C}} \quad (31)$$

Despejando k se obtiene:

$$k = \frac{\frac{-V_{\min}}{R} - \frac{V_p}{\sqrt{X_C^2 + R_s^2}} \sin(\omega t_s + \theta)}{e^{\frac{t_s}{R_s C}}} \quad (32)$$

Finalmente, la corriente en el capacitor se puede expresar como:

$$i_C = \frac{V_p}{\sqrt{X_C^2 + R_s^2}} \sin(\omega t + \theta) + k e^{\frac{X_C \omega t}{R_s}} \quad (33)$$

La corriente entregada a la carga durante el tiempo de conducción de los diodos es:

$$i_R = \frac{V_p}{R} \sin(\omega t) \quad (34)$$

La corriente demandada a la fuente de voltaje en todo el periodo estará dada por la siguiente expresión:

$$i_{Ca} = i_C + i_R = \begin{cases} 0 & 0 < t < t_s \\ \frac{V_p}{R} \sin(\omega t) + \frac{V_p}{\sqrt{X_C^2 + R_s^2}} \sin(\omega t + \theta) + k e^{\frac{X_C \omega t}{R_s}} & t_s < t < \frac{T}{4} \\ \frac{T}{4} < t < \frac{T}{2} + t_s \\ \frac{-V_p}{R} \sin(\omega t) + \frac{-V_p}{\sqrt{X_C^2 + R_s^2}} \sin(\omega t + \theta) + k e^{\frac{X_C \omega t}{R_s}} & \frac{T}{2} + t_s < t < \frac{3T}{4} \\ 0 & \frac{3T}{4} < t < T \end{cases} \quad (35)$$

3. DISEÑO Y SIMULACIÓN RECTIFICADOR ONDA COMPLETO CON FILTRO RC

En esta sección se muestran las simulaciones para verificar la veracidad de los análisis matemáticos presentados anteriormente pero solamente se hará con el rectificador puente completo con filtro RC. Todas las simulaciones realizadas en este trabajo se realizaron con OrCAD Lite v17.2-2016.

En la Tabla 1 se observa los valores propuestos para calcular los elementos que conformaran el circuito de la simulación. Mientras que en la Fig. 6 se observa el circuito simulado en Spice.

Tabla 1. Valores propuestos para cálculo del circuito.

Parámetro	Símbolo	Valor
Frecuencia	f	60 Hz
Voltaje pico	Vp	180 V
Carga	R	180 Ω
Voltaje de rizo normalizado	Vr	0.11
Capacitancia	C	337.4 μF
Voltaje mínimo	Vmin	160.2 V

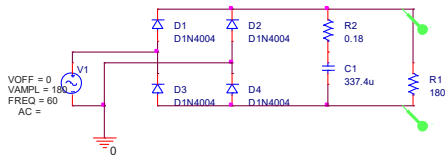


Fig. 6. Circuito simulado.

El primer punto a considerar es el cálculo de voltaje de salida de acuerdo a las ecuaciones se espera un Voltaje mínimo de 160.2 V, lo cual es el cálculo ideal, pero si consideramos la caída de voltaje en los diodos que sería: $0.7 \text{ V} \times 2 = 1.4 \text{ V}$, resultado es: $160.2 \text{ V} - 1.4 \text{ V} = 158.8 \text{ V}$, igual al medido en la simulación que se observa en la Fig. 7.

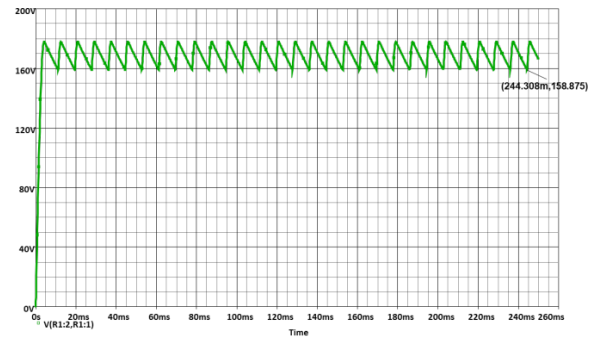


Fig. 7. Voltaje de salida en el rectificador puente completo con filtro RC

Para el cálculo de la corriente demandada por la carga se utilizan los datos de la Tabla 2

Tabla 2. Parámetros para el cálculo de la corriente demandada a la fuente.

Parámetro	Símbolo	Valor
Resistencia interna del capacitor	R_s	0.18Ω
Ángulo de desfase	θ	1.54 rad
Reactancia Capacitiva	X_C	7.87Ω
Ángulo de conducción	θ_C	0.473 rad
Ángulo en que empieza a conducir	θ_s	1.097 rad
Constante k	k	-8.148×10^{21}

A partir de los valores de la Tabla 2 se puede graficar la corriente demandada a la fuente en Matlab con (35), esta se observa en la figura Fig. 8. Por otra parte, se observa la forma de onda de la misma corriente demandada a la carga en la Fig. 9 esta vez obtenida de Spice. Prácticamente las formas de onda son idénticas lo cual valida las ecuaciones realizadas en el trabajo.

4. CONCLUSIONES

El análisis matemático realizado para el rectificador de onda completa con filtro RC resultó ser muy preciso en cuanto a la predicción de la capacitancia, voltajes de salida en la carga y la corriente del capacitor. Las formas de onda obtenidas en la simulación presentan un error nulo en cuanto al voltaje mínimo y la corriente demandada a la carga. En la corriente demandada a la fuente se obtuvo valor pico teórico de 9.74A y en los resultados de simulación se obtuvo una corriente de 9.26A, dado un error de 4.92%, esto se debe a las pérdidas generadas al momento de simular, puesto que no se utilizaron componentes ideales. Cabe aclarar que las ecuaciones presentadas en este

trabajo no se reportan en ningún otro pese a la simplicidad de estas.

Finalmente, también se desarrolló una ecuación en la cual se relaciona el rizo normalizado de voltaje de salida con la constante de tiempo creada por el filtro RC a la salida del rectificador de onda completa, dicha ecuación tiene una forma de exponencial negativa y explica el porque de la necesidad de utilizar capacitancias de gran tamaño para poder obtener rizados de voltaje pequeños. Dos parámetros importantes para la elección del capacitor de filtrado son: el voltaje de trabajo debe ser mayor que el voltaje de salida sin la carga del rectificador y la capacitancia. Considerando que este esquema de filtrado es el mismo, tanto para rectificadores sencillos, como para fuentes conmutadas, la desventaja del uso de capacitores para atenuar los rizados de voltaje es su corta vida útil con respecto a los demás componentes del circuito. Los principales factores que afectan a la vida útil de los capacitores es la temperatura, el rizo de corriente, la tensión de funcionamiento y la carga-descarga del capacitor, este problema se sigue replicando en las topologías actuales.

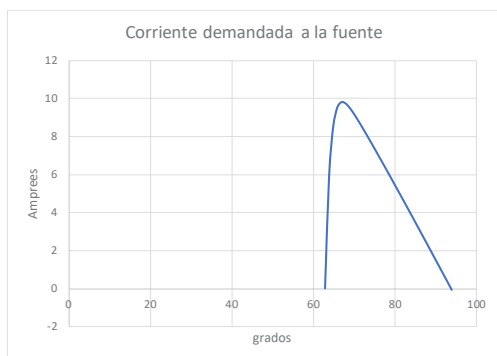


Fig. 8. Corriente demandada a la fuente obtenida en Matlab con las ecuaciones.

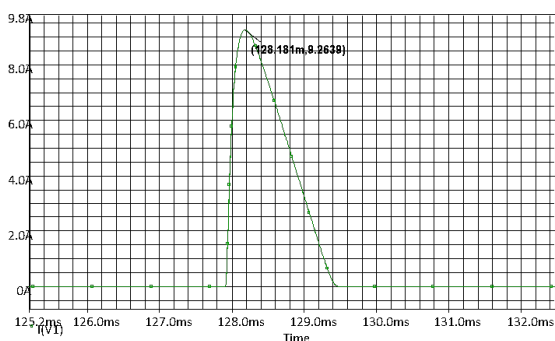


Fig. 9. Corriente demandada a la fuente obtenida en simulación.

REFERENCIAS

- Aparna, G., & BABU, G. S. (2018). *Simulation and analysis of single phase full bridge diode rectifier with different passive power factor correction techniques*. Paper presented at the 2018 International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering (ICRIEECE).
- Arvindan, A., Ashwin, R., & Murthi, M. K. (2018). *Multipulse Diode Rectifiers: Power Quality Perspective Based On Experimental Data*. Paper presented at the 2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE).
- Eshkevari, A. L., Mosallanejad, A., & Sepasian, M. (2019). Design, modelling, and implementation of a modified double-switch flyback-forward converter for low power applications. *12*(4), 739-748. doi:https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5788
- Gao, S.-P., & Zhang, H. (2019). *Topology Comparison of Single-diode Rectifiers: Shunt Diode vs. Series Diode*. Paper presented at the 2019 12th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo).
- Ghosh, R., Acharya, S., & Halder, T. (2016). *An improved performance parameters evaluation of the diode rectifiers*. Paper presented at the 2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT).
- Gupta, S., Vamanan, N., & John, V. J. I. t. o. I. a. (2017). A diode bridge rectifier with improved power quality using the capacitive network. *54*(2), 1563-1572.
- Maulik, S., & John, V. (2019). *Diode Bridge Rectifier with low THD for Weak Grids*. Paper presented at the 2019 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India).
- Salazar-Pérez, D., Ponce-Silva, M., Aquí-Tapia, J. A., García-Guzmán, J., & Pérez-Cruz, J. H. (2020). Effects of the LED modelling on the output capacitance of power converters. *13*(15), 3467-3474. doi:https://doi.org/10.1049/iet-pel.2020.0181
- Singh, B., Singh, B. N., Chandra, A., Al-Haddad, K., Pandey, A., & Kothari, D. P. J. I. T. o. i. e. (2003). A review of single-phase improved power quality AC-DC converters. *50*(5), 962-981.

Detección y diagnóstico de fallas basado en señales en un sistema de inyección electrónica de combustible.

J.J. López-Díaz * R. F. Escobar-Jiménez **
F.L. Torres-Ortiz *** J. F. Gómez-Aguilar ****
V.M. Alvarado-Martínez †

* Posgrado del Tecnológico Nacional de México / CENIDET. Int. Internado Palmira S/N, Palmira C.P.62490, Cuernavaca, Morelos, Mexico

** Tecnológico Nacional de México / CENIDET. Int. Internado Palmira S/N, Palmira C.P.62490, Cuernavaca, Morelos, México

*** Catedrático CONACYT, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Coyoacán, Edificio 1, Escolar 3000, Ciudad de México, D.F.

**** Catedrático CONACYT, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Tecnológico Nacional de México. Internado Palmira S/N, Palmira C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México

† Tecnológico Nacional de México / CENIDET. Int. Internado Palmira S/N, Palmira C.P.62490, Cuernavaca, Morelos, México

Abstract: Este trabajo muestra el uso de la Transformada Wavelet en combinación de la transformada Stockwell para el desarrollo de un esquema de detección y diagnóstico de fallas en un sistema de inyección electrónica (EFI) aprovechando de sus propiedades como lo es la representación de tiempo-escala por parte de las Wavelets y la transformada de Stockwell que es una modificación de la transformada de Fourier con ventana, utiliza una ventana variable según la distribución de la frecuencia analizada. Al combinar ambas transformadas y aplicarlas a una máquina de aprendizaje extremo (Extreme Learning Machine) por sus siglas en inglés, para clasificación y aprendizaje de las fallas en los diferentes inyectores del EFI.

Keywords: Transformada Wavelet, Transformada Stockwell, Extreme Learning Machine, EFI, FDD.

1. INTRODUCCIÓN

Un motor de combustión interna es una máquina que transforma energía química a energía mecánica de un combustible debido a una explosión. Esta explosión se genera por medio de una chispa dentro de una cámara de combustión. Para que esta explosión se lleve a cabo de manera eficiente debe existir una relación estequiométrica en este caso para el aire y el combustible; para el caso de la gasolina se debe tener una relación estequiométrica de 14.7 kilogramos de aire por 1 kilogramo de combustible Alippi et al. (2003) . En un automóvil, la mezcla homogénea entre aire y gasolina depende del sistema de inyección.

Dicho sistema tiende a fallar debido a sobre calentamientos en otras partes del motor, fallas en la regulación de alimentación, impurezas en gasolina, separación de los cables de alimentación y su propio desgaste, lo que provoca taponamientos y desconexión en algunos casos derivando en un desempeño incorrecto del automóvil. En el trabajo presentado por Filipczyk (2013) se realizó una investigación sobre las fallas más comunes en los motores de combustión interna. Dicha investigación la llevo a cabo

en el departamento de mantenimiento de motores automotrices de la Facultad de Transporte de la Universidad Politécnica de Silesia en Polonia. En dicha investigación se recopiló información de 628 motores a partir del año 2000 hasta el 2012. El resultado de esta recopilación permitió determinar la existencia de al menos 16 fallas comunes, y además las colocó según el porcentaje de ocurrencia; de las cuales destacó en primer lugar el sistema de control eléctrico y de ignición, en segundo lugar, el sistema de enfriamiento y en tercer lugar el sistema de inyección de combustible.

En la literatura se encuentra gran diversidad de estudios sobre el EFI, tal es el caso de Gao et al. (2021) en el cual estudió la estabilidad de inyección, basado principalmente en la varianza de datos, del cual determinó que el momento de mayor estabilidad es en el estado de ralentí, por otra parte Zhao et al. (2021) investigó sobre la caída de presión del riel de inyección debido al calentamiento del combustible y en consecuencia el calentamiento del inyector, la investigación de Dhanji and Zhao (2020) realizó un análisis del comportamiento de un inyector activado por solenoide para la administración correcta de combustible

y la disminución de contaminación, finalmente Aleiferis and Papadopoulos (2021) analizó los asentamientos de combustible y la consecuencia del mismo.

En el trabajo que presentó Namigtle-Jiménez et al. (2020) se desarrolló un esquema de detección y diagnóstico de fallas basándose en un red neuronal artificial en línea, mientras que Taghizadeh-Alisaraei and Mahdavian (2019) se basaron en vibraciones y utilizaron la prueba de Welch, Transformada de Fourier a Corto Plazo, Distribución de Wigner-Ville y Distribución de Choi-Williams obtuvieron las vibraciones generadas para los casos planteados, en Wang et al. (2018) mostraron los 4 principales métodos para la detección de fallas en rieles de inyección para motores Diesel, en el caso de Xie et al. (2018) partieron de los sensores del automóvil y las emisiones, determinaron diversas fallas en el motor, en Nadeer et al. (2018) se desarrolló un modelo, de espacio de estado híbrido no lineal del sistema completo de motor de gasolina de combustión interna desde el acelerador hasta el silenciador en el cual aplicaron ecuaciones para de balance de masa y la energía, en el trabajo que presentó Sean (2018) se desarrolló un nuevo sensor inalámbrico que se realizó específicamente para su uso en FDD para ICE el cual a pesar de presentar un desempeño del cien por ciento también comenta que el costo de producción es bastante elevado.

En este trabajo de investigación, el objetivo es detectar y aislar uno de los cuatro inyectores que pudieran fallar. Considerando que la bomba de gasolina puede fallar, así como el filtro puede estar tapado, además de que el sistema puede auto regula su presión la diferencia de presión solo se puede observar en estado ralenti.

Las aportaciones que se presentan en este trabajo son:

- El diseño de un esquema FDD basado en señales de presión del riel de inyección,
- Visualización de fallas mediante el uso de las transformadas.
- El esquema FDD es capaz de detectar y aislar el inyector que presente anomalías.
- El sistema de discriminación se basa en ELM de dos dimensiones.
- El esquema FDD fue validado en línea en un sistema EFI de un motor de cuatro cilindros con el uso de un sistema embebido.

2. METODOLOGÍA

En esta sección se explica primero los materiales y métodos utilizados para después relacionarlos con el uso que se le dio al sistema empleado.

2.1 Materiales y Métodos

El material para la adquisición de las señales es el siguiente:

- Un riel de inyectores: el cual está constituido por los cuatro inyectores y un sensor de vacío.

- El sensor de vacío se encuentra conectado a una pistola de presión la cual realiza la función del vacío del motor.
- Un medidor de presión mecánico, el cual sirve para garantizar que la medida sea correcta.
- Juego de cuatro relevadores, estos están conectados a la salida de la tarjeta MyRio®, debido a que la tarjeta no cuenta con la salida suficiente para activar en sistema nominal a los inyectores.
- Una fuente de alimentación para los inyectores, la bomba de gasolina, y los relevadores.
- Filtro de gasolina a este se le hace limpieza cotidiana debido a que se considera ideal.
- Bomba de gasolina, esta se encuentra dentro de los parámetros normales de presión por lo que también se le considera ideal.
- Recipiente con gasolina, este generalmente se encuentra por debajo de la mitad de llenado, pero logra cubrir completamente la bomba de gasolina.
- La computadora que se utiliza para las pruebas fuera de línea cuenta con: 12 GB de RAM, 1024 GB en el disco duro, un procesador Intel i7® a 2.0 GHz con uso de software Windows 10 student®, LabVIEW® 2017 así como sus complementos y Matlab® R2017a.

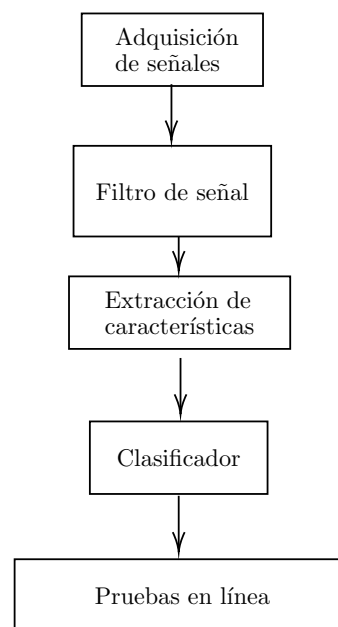


Fig. 1. Algoritmo de solución

El algoritmo de solución se muestra en 1.

Adquisición de señales. Para la adquisición de señales se utilizó el sensor MPX5700dp conectado a la tarjeta MyRio®. El cual mediante un programa de adquisición recupera las señales para cada uno de los eventos, cabe destacar que las señales obtenidas presentan bastante ruido.

Filtro de señal Para el filtro se utiliza la transformada Wavelets, dicha Transformada es altamente eficiente para

realizar análisis local de señales no estacionarias y además de rápida transitoriedad.

Las Wavelets, son generadas partiendo de una función Wavelet madre, utilizando traslaciones y dilataciones. Permitiendo así reconstruir la señal real a través de la Transformada Wavelet inversa.

Esta Transformada no es solamente local en tiempo, también lo es en frecuencia. Dentro de los diversos usos de esta herramienta en el presente trabajo se enfocará solo para la compresión y el procesar las imágenes y reconocimiento de patrones.

En la ecuación (1) se muestra a las wavelets creadas partiendo de la wavelet madre $\Psi(t)$ por las traslaciones y las dilataciones discretas

$$\Psi_{i,k}(t) = 2^{-\frac{i}{2}} \Psi(2^{-i}t - k) \quad (1)$$

Una vez que la transformada de Fourier $\Psi(w)$ que proviene de la wavelet madre satisface la condición de ortogonalidad, las traslaciones discretas de las wavelet madre $\Psi(2^{-i}t - k)$ generan una base ortonormal para cada una de la escala 2^i en (2).

$$(\phi_{i,k}, \Psi_{i,n}) = 2^{-i} \int \phi_i(t - k) \Psi_i(t - n) dt = 0 \quad (2)$$

para todo k y $n \in \mathbb{Z}$.

El análisis multiresolución realiza la expansión de una señal para obtener una base de funciones de las cuales sus propiedades tiempo-frecuencia se adecúan a la estructura local de la señal. Esta Transformada permite al usuario obtener el desarrollo de una señal dando una base ortonormal de funciones wavelets, estas tienen propiedades de localización en tiempo y frecuencia, en trabajos como, Grispino et al. (2013), Monteiro et al. (2018), H. Barizão et al. (2020) el uso de esta herramienta ofrece una mejor lectura de los datos.

En este caso particular se realizó un filtro de 1000 muestras por segundo, debido a son 164 muestras por ciclo y el utilizar 6 permite detectar las anomalías presentadas, su rango de trabajo se encuentra entre [7.8125 – 500] resintonizando se encuentra una mejor representación en los rangos de frecuencia de [10 – 80] de ello se obtienen una mejor señal. En la cual se pueden observar las caídas de presión continuas que corresponden a la salida de gasolina del inyector a diferencia de cuando se presenta una falla, en la cual se muestran des continuidades.

Extracción de características Para extraer las características se utilizó la Transformada Stockwell misma que en el trabajo que presentaron Čurović et al. (2021), Lala and Karmakar (2021) dio resultados adecuados. Esta transformada es una modificación de la transformada de Fourier con ventana, utilizando una ventana variable según la distribución de la frecuencia analizada como se muestra en (3).

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}} e^{-i2\pi ft} dt$$

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) w(\tau - t) e^{-i2\pi ft} dt$$

$$w(\tau - t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2}{2\sigma^2}}$$

$$\int \sigma = \frac{1}{|f|} \quad (3)$$

la matriz de Stockwell es obtenida como en (4).

$$\int s(kt, \frac{n}{NT}) = \begin{bmatrix} S(0,0) & S(T,0) & \cdots & S(kT,0) \\ S(0,\frac{1}{NT}) & S(T,\frac{1}{NT}) & \cdots & S(kT,\frac{1}{NT}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S(0,\frac{n}{NT}) & S(T,\frac{n}{NT}) & \cdots & S(kT,\frac{n}{NT}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde T es el intervalo de tiempo entre dos muestras consecutivas, N la longitud de la señal analizada y $(k, n) = 0, 1, \dots, N - 1$.

Clasificador Las máquinas de aprendizaje extremo (Extreme Learning Machine) por sus siglas en inglés son redes neuronales avanzadas para clasificación, regresión, agrupamiento, aproximación dispersa, compresión y aprendizaje de características con una sola capa o múltiples capas de nodos ocultos.

Dada una sola capa oculta de ELM suponiendo que la función de salida del i -th el nodo oculto es $h_i(X) = G(a_i, b_i, x)$ donde a_i y b_i son los parámetros ocultos del i -th nodo oculto.

Dado N muestras de entrenamiento, la matriz de salida de la capa oculta, H de ELM se da como en (5).

$$H = \begin{bmatrix} h(x1) \\ \vdots \\ h(xN) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G(a1, b1, x1) & \cdots & G(aL, bL, x1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ G(a1, b1, xN) & \cdots & G(aL, bL, xN) \end{bmatrix} \quad (5)$$

y T es la matriz objetivo de datos de entrenamiento en (6).

$$T = \begin{bmatrix} t1 \\ \vdots \\ tN \end{bmatrix} \quad (6)$$

En este trabajo se utiliza para la clasificación por lo cual, dada una función de activación por partes $f(x)$ luego del mapeo aleatorio de capas ocultas $h(x)$ puede separar regiones no juntas arbitrarias de cualquier forma. Sin embargo, la entrada a utilizarse será de doble dimensión, por lo cual se debe, calcular la matriz de salida de la capa oculta como en (7).

$$H_{ij} = g(U_i^T A_j v_i + b_i) \quad (7)$$

donde H_{ij} es la salida de i -th nodo oculto de la entrada j -th. Por lo tanto, cada nodo oculto obtiene la información de la matriz A_j manteniendo varios a través de diferentes pesos aleatorios U_i, V_i y b_i .

Esto se resuelve considerando (8).

$$\beta^* = H^\dagger y \quad (8)$$

donde $H^\dagger$ es el inverso generalizado Moore-Penrose de la matriz de H .

2.2 Procedimiento Experimental

El método de solución está dividido en dos partes, en la primera, una vez extraídos los datos de presión del sistema se analizan por medio del software de Matlab®, para posteriormente realizar el programa en LabVIEW® y realizar las pruebas pertinentes en línea.

Adquisición de señales En la adquisición de las señales se utiliza el sensor MPX5700dp conectado en la tarjeta MyRio® el cual mediante el uso del programa que se presenta en 2 se extraen los datos guardándolos en un script.

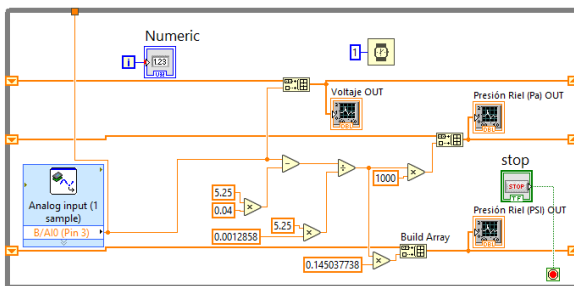


Fig. 2. Programa en LabVIEW®

Filtro de señal Usando la transformada de Wavelet y su inversa se puede realizar un filtro, esto se puede realizar reconstruyendo solo las frecuencias entre las cuales trabaja el sistema, en este caso la lectura es de 1000 muestras por segundo su rango de trabajo se encuentra entre $[7.8125 - 500]$ sintonizando se encuentra una mejor representación en los rangos de frecuencia de $[10 - 80]$ de ello se obtienen

una mejor señal, la importancia de este filtro se debe a que si no se realiza este tratamiento a las señales los tratamientos posteriores no tienen una buena respuesta, además de que se puede observar en 3 donde se notan las caídas de presión continuas que corresponden a la salida de gasolina del inyector a diferencia de cuando se presenta una falla, en la cual se muestran descontinuidades como en 4.

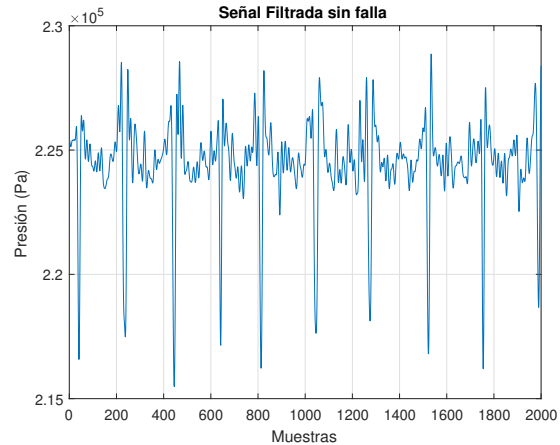


Fig. 3. Sin falla

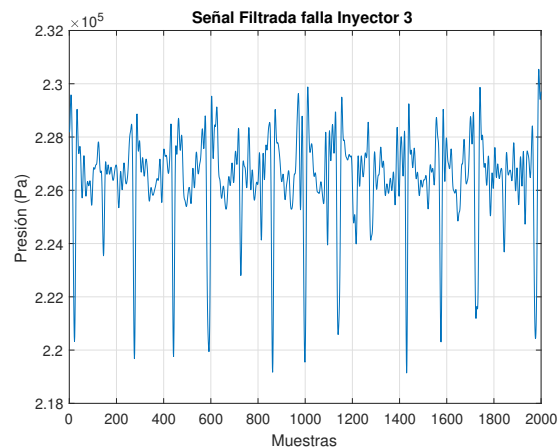


Fig. 4. Falla 3

Extracción de características La transformada de Stockwell para la clasificación de eventos. En este trabajo se utiliza la matriz de Stockwell como entrada de una red neuronal para realizar la clasificación de las fallas. En la figura 5 se presenta la señal con poca percepción que se observa con la transformada de Stockwell y en 6 se muestra la mejora significativa para la extracción exitosa de la matriz de Stockwell, misma que servirá como elemento característico de la señal.

Two-Dimensional Extreme Learning Machine Para este trabajo no se puede utilizar la metodología convencional,

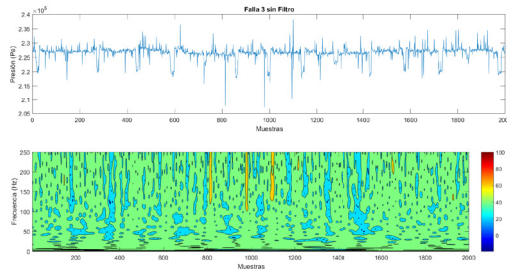


Fig. 5. Falla 3

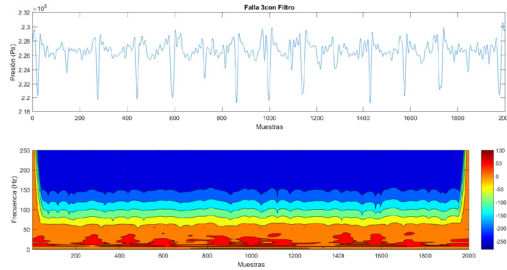


Fig. 6. Falla 3

por lo que se deberá utilizar la red Two-Dimensional Extreme Learning Machine siendo la única diferencia que a la entrada tiene una matriz y no un vector, el algoritmo de clasificación se determina como se muestra en 7, las salidas de las neuronas están dentro de un rango de $1a - 1$, por lo cual, se utiliza un algoritmo on-off para la toma de decisión sobre cuál, es la falla y mandar la correcta señal, dicho algoritmo realiza las tareas de la siguiente forma: considerando la salida 1 $s1 > s2$ así como $s1 > s3$, $s1 > s4$ y $s1 > s5$ si esto se cumple la tarea se termina, si no se considera la salida 2 $s2 > s1$, $s2 > s3$, $s2 > s4$ y $s2 > s5$ si esto se cumple se manda la señal a encender el led 0 correspondiente a la falla 1, si no $s3 > s1$, $s3 > s2$, $s3 > s4$ y $s3 > s5$, de cumplir ello se manda a encender el led 1 correspondiente a la falla 2 y así consecutivamente con las otras dos restantes salidas si no se detecta con anterioridad, cabe destacar que este sistema solo mapea la falla una sola vez, por lo que se debería iniciar nuevamente el sistema para volver a aplicar el esquema de detección y diagnóstico de fallas.

La estructura de la red neuronal se puede representar como se puede observar en 8 la cual muestra que solo cuenta con una capa oculta y las salidas corresponden a los eventos considerados en este trabajo, siendo así las entradas correspondientes a las diversas clases las cuales se introducen en forma de matriz.

3. RESULTADOS

Las primeras pruebas se han realizado en Matlab® fuera de línea en la cual los tiempos transcurridos para cada falla se muestran a continuación en la tabla 1.

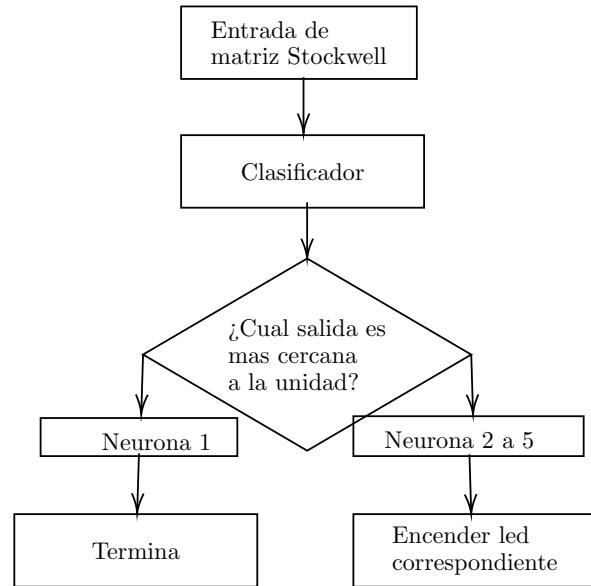


Fig. 7. Algoritmo del esquema de detección y diagnóstico de fallas.

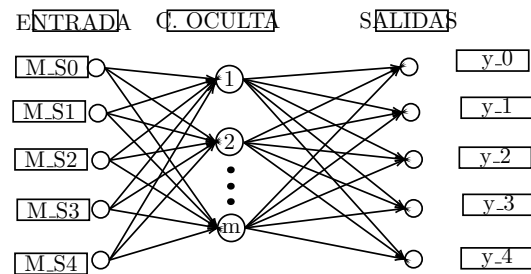


Fig. 8. Arquitectura de la red neuronal.

Falla	Transformada Stockwell	Red Neuronal	Tiempo	Porcentaje de eficiencia
0	0.130130 s	44.3609 s	44.491030 s	95
1	0.18070 s	39.69825 s	39.87895 s	100
2	0.0985 s	45.26523 s	45.36373 s	98
3	0.2358 s	41.3658 s	41.6016 s	98
4	0.1638 s	40.2036 s	40.3674 s	90

Table 1. Tabla de pruebas a nivel simulación

En dicha tabla se muestran los resultados de diez pruebas para cada caso en el cual el tiempo y el porcentaje de eficiencia fue promediado. En base a esta tabla se puede observar que el porcentaje promedio para la detección de fallas es de 96.2%, además de que el tiempo promedio que se requiere para realizar las simulaciones es de 42.34s.

3.1 Pruebas en Línea

Una vez completado el programa dentro del embebido de la tarjeta myRio® se realizaron las pruebas realizando el conteo de tiempo desde un dispositivo externo y verificando si la falla detectada correspondía a la falla generada.

Cabe destacar que en este caso se realizó el ajuste de aumento de neuronas de 700 a 900 esto se debió a que con la primer cantidad la eficiencia se encontraba por abajo de

las expectativas y se aumentó un poco para mejorar y no saturar la tarjeta.

Para el caso en el que no existe falla se esperaron 5 minutos para observar si ocurría algún cambio o detectaba mal una falla, para este caso el resultado fue positivo al 100%.

Para el caso de la falla en el inyector uno el tiempo promedio para detectar la falla fue de 150s con una eficiencia del 95% esto debido a que en una ocasión detecto la falla en inyector equivocado.

En cuanto al inyector 2, el tiempo promedio para detectar la falla fue de 180 s además de que tuvo un desempeño menor que fue de 85%.

Por otra parte el inyector 3, tuvo un tiempo promedio de 120s y un desempeño del 95% esto se debió a que en una ocasión no detecto la falla.

En el ultimo inyector, el tiempo promedio fue de 150s y en este caso la eficiencia también fue del 100%.

En la figura 9 se muestra la visualización de la tarjeta cuando existe una falla, encendiendo el foco correspondiente al inyector que este fallando.

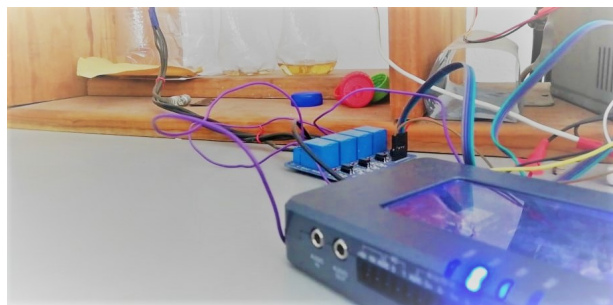


Fig. 9. Falla presente en Inyector 3

4. CONCLUSIONES

El trabajo presentado da como principal aporte el uso de la transformada Stockwell con la red neuronal Extreme Learning Machine de doble dimensión además de que se realizó la aplicación del algoritmo a un sistema real.

Como complemento también fue la aplicación de la transformada Wavelet para el mismo sistema, siendo esta complementaria para su posterior análisis.

Además, de que el sistema se hizo más compacto, esto gracias al embebido de la tarjeta MyRio®.

Aunque los tiempos fueron mayores relativamente a algunas investigaciones anteriores el trabajo logro una eficiencia en línea del 95% siendo un desempeño que logro las

expectativas de la investigación.

Por otra parte, el programa se puede optimizar, esto daría pauta a un probable mejor desempeño del sistema. Esto sería restringiendo la matriz de Stockwell ya que los valores significativos se encuentran en el rango de $[1Hz - 50Hz]$, por lo que al depurar esa carga innecesaria se podría disminuir la cantidad de neuronas utilizadas, tanto a nivel simulación como en la aplicación al sistema real.

REFERENCES

- Aleiferis, P.G. and Papadopoulos, N. (2021). Heat and mass transfer effects in the nozzle of a fuel injector from the start of needle lift to after the end of injection in the presence of fuel dribble and air entrainment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Alippi, C., Russis, C.D., and Piuri, V. (2003). A neural-network based control solution to air-fuel ratio control for automotive fuel-injection systems. 33, 259–268.
- Čurović, L., Murovec, J., Novaković, T., Prislán, R., and Prezelj, J. (2021). Stockwell transform for estimating decay time at low frequencies. *Journal of Sound and Vibration*.
- Dhanji, M. and Zhao, H. (2020). Investigations of split injection properties on the spray characteristics using a solenoid high-pressure injector. *International J of Engine Research*, 02.
- Filipczyk, J. (2013). Causes of automotive turbocharger faults. *Transport Problems*, 8, 5–10.
- Gao, Z., Li, G., and Li, H. (2021). Experiment investigation of injection parameters effects on injection stability of a high pressure common rail system. 104, 1–16.
- Grispino, A.S., Petracca, G.O., and Dominguez, A.E. (2013). Comparative analysis of wavelet and emd in the filtering of radar signal affected by brown noise. *IEEE Latin America Transactions*, 11, 81–85.
- H. Barizão, A., H. Yoshizumi, V., H. Spatti, D., E. Dajer, M., and A. Flauzino, R. (2020). Estimacão inteligente do grau geral de desvio vocal utilizando transformada wavelet packet.
- Lala, H. and Karmakar, S. (2021). A stockwell transform-based approach for the detection and classification of high-impedance arc in leaning tree and sphere gap.
- Monteiro, D.D.A., Zvietcovich, W.G., and Braga, M.F. (2018). Detection and classification of power quality disturbances with wavelet transform, decision tree algorithm and support vector machines. *SBSE 2018 - 7th Brazilian Electrical Systems Symposium*, 1–6.
- Nadeer, E.P., Patra, A., and Mukhopadhyay, S. (2018). Hybrid state space modeling of a spark ignition engine for online fault diagnosis. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*.
- Namigtle-Jiménez, A., Escobar-Jiménez, R.F., Gómez-Aguilar, J.F., García-Beltrán, C.D., and Téllez-Anguiano, A.C. (2020). Online ann-based fault diagnosis implementation using an fpga: Application in the efi system of a vehicle. *ISA Transactions*.
- Sean, H.B. (2018). A wireless sensor for fault detection and diagnosis of internal combustion engines a wireless sensor.

- Taghizadeh-Alisarai, A. and Mahdavian, A. (2019). Fault detection of injectors in diesel engines using vibration time-frequency analysis. *Applied Acoustics*.
- Wang, Z., Zhao, Y., Yan, J., and Xu, J. (2018). The common fault diagnosis method of diesel engine. 143, 390–392.
- Xie, C., Wang, Y., MacIntyre, J., Sheikh, M., and Elkady, M. (2018). Using sensors data and emissions information to diagnose engine's faults. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 11, 1142–1152.
- Zhao, J., Lu, X., and Grekhov, L. (2021). Experimental study on the fuel heating at the nozzle of the high pressure common-rail injector. *Fuel*, 283, 119281.

Control vectorial para inversor trifásico conectado a red para manejo de energía con funciones de compensación

Ma. Del Carmen Toledo Pérez*. Abraham Claudio Sánchez **. Luis Gerardo Vela Valdez***.
Leonardo Francisco Olán Valdivieso****.

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
México (Tel: 7341028023; e-mail: carmen.toledo19ea@cenidet.edu.mx).

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
México (e-mail: abraham.cs@cenidet.tecnm.mx).

***Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
México (e-mail: luis.vv@cenidet.tecnm.mx).

****Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
México (e-mail: leonardo.olan18ea@cenidet.tecnm.mx).

Resumen: La administración de potencia activa y reactiva en un sistema de distribución es de suma importancia, ya que este es uno de los parámetros que determinan la calidad de la energía suministrada a la red eléctrica. Por ello en este documento se presenta un algoritmo de control para un inversor trifásico conectado a la red con capacidad de inyección de potencia activa y reactiva. El control se realizará en un inversor de dos niveles VSI mediante la técnica de modulación por vectores espaciales (SVM) para generar la señalización de control de dicho inversor. Las pruebas son realizadas mediante el software Matlab/Simulink.

Palabras clave: SVM, potencia activa, potencia reactiva, transformada de Clarke, transformada de Park.

1.INTRODUCCIÓN

Años atrás la red de distribución no requería considerar la estabilidad, ya que esta era pasiva (los generadores inyectaban energía, la red la transmitía y los usuarios la consumían) y el flujo de potencia era unidireccional, siendo ahora una entidad activa, es decir, que cada dispositivo que conforma el sistema es capaz de actuar mediante las condiciones propias del sistema a fin de obtener una generación y consumo óptimo, agregando a esto un almacenamiento de energía que permita almacenar y entregar dicha energía. A partir de que se introduce la generación distribuida (GD) mediante las energías renovables, valores de impedancia de red y el efecto de las cargas no lineales, se agregaron factores como la intermitencia de la generación, flujos de potencia bidireccional, desbalance de fases, variaciones de voltaje y frecuencia, así como alto contenido armónicos, entre otros. Lo anterior genera problemas de estabilidad en la operación de la red eléctrica (Celanovic & Boroyevich, 2000).

La administración de potencia activa (P) y reactiva (Q) es de suma importancia en este tipo de convertidores, ya que al controlarlas es posible garantizar la estabilidad de la red, por

ello este artículo estará enfocado en realizar la compensación de estas potencias.

Debido a la necesidad de controlar la producción de potencia, coordinarla con la demanda de las cargas, con fuentes de alimentación de alta calidad, se requiere de un control de la corriente del inversor fuente de tensión, por sus siglas en inglés VSI (Voltage Source Inverter) conectado a la red, el cual juega un papel importante ya que será el encargado de mantener dichos niveles requeridos.

El esquema general para realizar la interconexión a la red está dado por la Fig. 1. En donde se muestran cada una de las etapas que lo conforman.

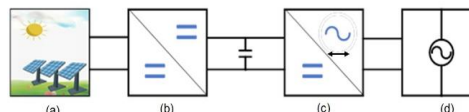


Fig. 1. Diagrama a bloques de un sistema interconectado a la red eléctrica. (a) generación (b) convertidor (c) inversor (d) red.

En el bloque (a) se lleva a cabo la generación de la energía, la cual puede ser proveniente de fuentes renovables o no. En el inciso (b) se encuentra la etapa del convertidor CD-CD encargado de transformar los niveles de voltaje recibidos de la generación a los requeridos por la red. El inversor está ubicado seguido del convertidor, siendo este el encargado de transformar la corriente continua en alterna, brindándole soporte a la red eléctrica mediante la compensación de potencia activa y reactiva, impactando directamente a la calidad de la energía. Para este artículo se analizará el sistema a partir del inversor trifásico.

2. INVERSOR TRIFÁSICO CONECTADO A RED

La Fig. 2 muestra la estructura del sistema del inversor trifásico conectado a la red con estrategia de control de modulación SVPWM estudiado en este artículo.

Este sistema consta de una fuente en CD de entrada al sistema, un VSI trifásico, una carga no lineal, un filtro LCL de salida y la red eléctrica.

Un inversor de dos niveles del tipo VSI trifásico, está conformado por seis interruptores de potencia, dos por cada fase o rama (Rashid, 2004). Este se encarga de transformar la energía del lado de continua V_{dc} en alterna trifásica $v_{a,b,c}$, mediante las señales de control de los interruptores de potencia $v_{a,b,c}$.

Las señales de control $v_{a,b,c}$ se aplican a los interruptores de cada una de las ramas superiores y en las inferiores las complementarias a cada una de las mismas. De esta forma hace posible que a la salida de los interruptores haya tensiones con valores $V_{dc}/2$ y $-V_{dc}/2$ en función de las señales introducidas.

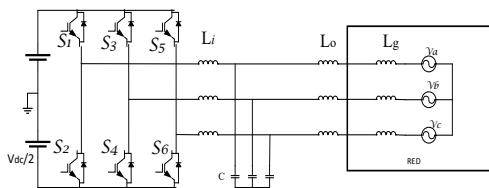


Fig. 2. Diagrama de inversor trifásico con filtro LCL y carga no lineal, conectado a red.

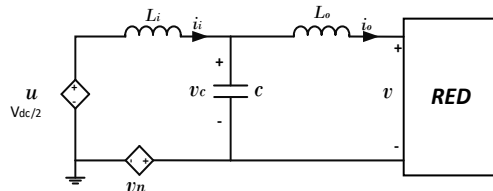


Fig. 3. Circuito equivalente por fase.

A partir del circuito de la fig. 2, se obtiene el circuito equivalente de cada fase (figura 3), en donde De esta forma es posible obtener las ecuaciones que caracterizan el circuito trifásico de la forma siguiente:

$$L_i \frac{di_i}{dt} = \frac{V_{dc}}{2} u - v_c - u_n \quad (1)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_i - i_0 \quad (2)$$

$$L_0 \frac{di_0}{dt} = v_c - v \quad (3)$$

Donde:

$i_i = [i_{ia} \ i_{ib} \ i_{ic}]^T$ es la corriente de salida del inversor.

$i_0 = [i_{0a} \ i_{0b} \ i_{0c}]^T$ es la corriente que se entrega a la red.

$v_c = [v_{ca} \ v_{cb} \ v_{cc}]^T$ es la tensión del condensador del filtro.

$v = [v_a \ v_b \ v_c]^T$ son las tensiones generadas por la red.

$u = [u_a \ u_b \ u_c]^T$ son las señales de control.

$u_{a,b,c} \in \{\pm 1\}$ representan las señales de control de cada una de las fases del inversor (ON/OFF).

Estos cálculos deciden los tiempos de encendido / apagado para los interruptores (IGBTs) del inversor.

Los estados de conmutación son mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Estados de conmutación del inversor de dos niveles.

Vector espacial	Estado de conmutación	Interruptores (S) encendidos
Vectores nulos	V_7	[111] 1,3,5
	V_0	[000] 4,6,2
Vectores activos	V_1	[001] 4,6,5
	V_2	[010] 4,3,2
	V_3	[011] 4,3,5
	V_4	[100] 1,6,2
	V_5	[101] 1,6,5
	V_6	[110] 1,3,2

3. MODULACIÓN POR VECTORES ESPACIALES

La técnica de modulación empleada en el inversor determina el aprovechamiento de los recursos de tensión de su bus de CD (Celanovic & Boroyevich, 2000), la calidad y linealidad de la tensión de salida, el rizado de la corriente, las pérdidas de potencia de conmutación, etc.

El objetivo principal de cualquier técnica de modulación es obtener una salida variable que tenga un componente fundamental máximo con armónicos mínimos.

La modulación por anchura de pulsos (PWM – Pulse Width Modulation) es la técnica básica de procesamiento de energía empleada en estos convertidores VSI (Edison Roberto, Silva, & Dos Santos, 2011).

Para este artículo se abordará la técnica de modulación SVM (Space Vector Modulation).

Esta técnica está basada en el hecho de que solo un vector es capaz de representar las tres fases del sistema trifásico, y este vector es creado a partir de los estados de conmutación del inversor.

4. CONTROL PROPUESTO

En este artículo se propone usar un control en modo corriente, haciendo posible la entrega de potencia activa y reactiva a la red eléctrica. Para este tipo de control se toma una muestra de las corrientes del inversor y las tensiones de red.

Al sensar las tensiones se obtienen las corrientes de referencia, para así, realizar una comparación (figura 4) entre la corriente que existe en la salida y la que debería haber.

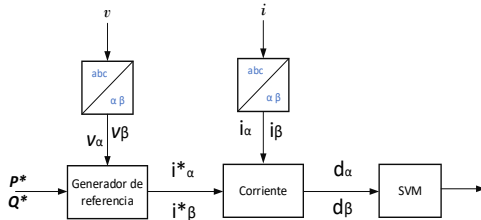


Fig. 4. Diagrama del sistema de control

Para poder obtener las referencias de corriente se deben sensar las tensiones de red $v_{a,b,c}$, y posteriormente transformarlas en sus componentes $\alpha\beta$ mediante la transformada de Clarke (Rodríguez et al., 2010), mostrada en el sistema de ecuaciones (4). Esta transformación se hace con la finalidad de reducir el número de variables, obteniendo toda la información de las tres fases.

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

Posteriormente se requieren las corrientes de referencia que se generan a partir de las tensiones V_α y V_β , utilizando también las potencias de referencia P^* y Q^* (Twining & Holmes, 2003).

$$P = \frac{3}{2}(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \quad (5)$$

$$Q = \frac{3}{2}(-v_\alpha i_\beta + v_\beta i_\alpha) \quad (6)$$

Las ecuaciones anteriores permiten calcular las potencias tanto activa como reactiva a la salida del inversor dentro del marco $\alpha\beta$.

Posteriormente con las potencias obtenidas de las ecuaciones anteriores y aislando las variables de corriente, mediante las ecuaciones 7 y 8 obtenemos las corrientes de referencia en función de la potencia activa y reactiva.

$$i_\alpha^* = \frac{2}{3} P^* \frac{v_\alpha}{(v_\alpha)^2 + (v_\beta)^2} + \frac{2}{3} Q^* \frac{v_\beta}{(v_\alpha)^2 + (v_\beta)^2} \quad (7)$$

$$i_\beta^* = \frac{2}{3} P^* \frac{v_\beta}{(v_\alpha)^2 + (v_\beta)^2} + \frac{2}{3} Q^* \frac{-v_\alpha}{(v_\alpha)^2 + (v_\beta)^2} \quad (8)$$

Sin embargo, para que pueda darse un buen seguimiento de las corrientes reales respecto a las corrientes de referencia, deben ser sensadas las corrientes a la salida del inversor para después transformarlas al marco $\alpha\beta$.

Posteriormente las señales i_α e i_β son comparadas con las corrientes de referencia i_α^* e i_β^* , esto se hace con la finalidad de obtener la compensación necesaria para que estas sean iguales (Zeng, Chang, & Song, 2004).

En el marco d-q de rotación síncrona, las potencias activas y reactivas de un VSI trifásico conectado a la red vienen dadas por:

$$p = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \quad (9)$$

$$q = \frac{3}{2}(u_d i_q - u_q i_d) \quad (10)$$

Dado que la velocidad angular del marco d-q se ajusta a la frecuencia angular de la red, las cantidades transformadas se vuelven invariables en el tiempo en estado estacionario (Schonardie & Martins, 2008), lo que simplifica el diseño del controlador. Esto se consigue mediante un PLL cuyo diagrama de bloques se muestra en la Fig. 6.

La entrada al bloque PLL es la tensión variable sinusoidal y la salida es el ángulo para la transformación abc a d-q mediante la transformación de Park.

La tensión se regula a cero mediante un controlador PI.

Su potencia activa depende de la corriente del eje d, que es proporcional y puede ser controlada por la corriente del eje d, y la potencia reactiva depende de la corriente del eje q, es decir cuando se requiere inyectar potencia activa $i_q = 0$ y viceversa.

$$p = \frac{3}{2} u_d i_d \quad (11)$$

$$q = \frac{3}{2} u_d i_d \quad (12)$$

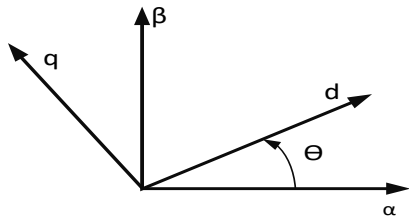


Fig. 5. Cambio de ejes en la transformada de Park.
A partir del ángulo de rotación de los ejes d-q, (Fig. 5) se puede definir la ecuación 13 que permite el cambio del plano $\alpha\beta$ al plano d-q.

$$V(d, q) = \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & \sin\theta_0 \\ -\sin\theta_0 & \cos\theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (13)$$

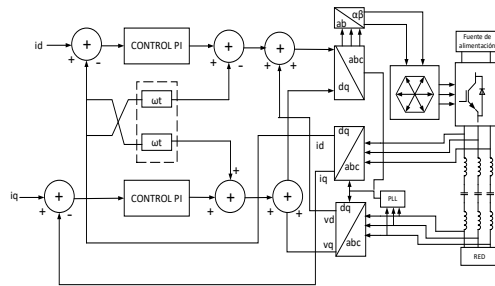


Fig. 6 Diagrama de bloques del sistema del inversor trifásico SVPWM

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN.

La implementación se realizó en el software Matlab/Simulink, mediante los parámetros de la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del sistema.

Descripción	Valor	Unidades
Voltaje de la red	220	VRMS
Frecuencia de la red	60	Hz
Voltaje en el Bus de CD	400	V_{CD}
L del filtro LCL de lado del inversor	9	mH
C del filtro LCL	3	μF
L del filtro LCL de lado de la red	7	mH
Frecuencia de conmutación	100	kHz

En la Fig. 7 se muestra el esquema a bloques de simulación, del cual se obtuvieron las señales de las figuras 8,9,10,11,12 y 13.

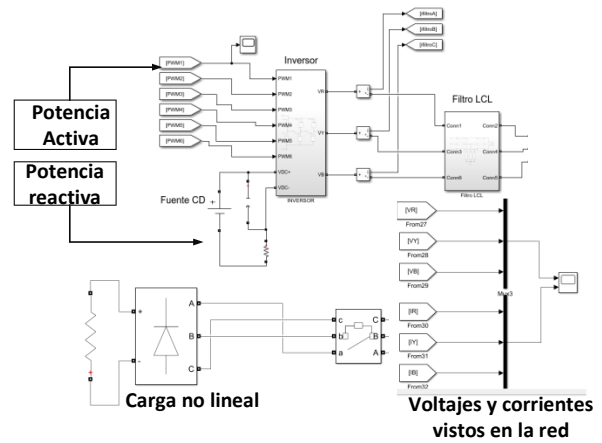


Fig. 7. Esquema a bloques en Simulink.

La potencia activa es la componente de la potencia que pulsa a 90° respecto a la tensión.

En la Fig. 8 se observa el desfase de las señales de corriente al momento de la inyección de esta potencia reactiva, compensando la fluctuación de corriente que se pudiera presentar, observando el desfase que esta componente presenta ante el voltaje.

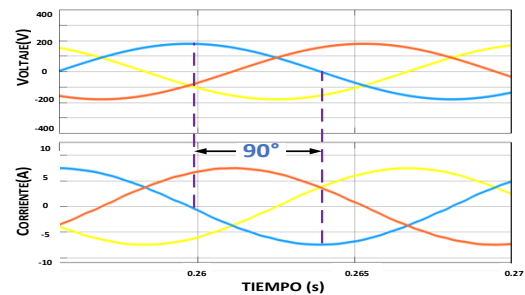


Fig. 8. Desfasamiento de la potencia reactiva entre señales de voltaje y corriente.

Dentro del sistema el controlador se programó para que en el instante 0.3 segundos del periodo se introdujera la carga no lineal, los resultados se muestran en la fig. 9, en ella se presenta el instante en que se agregó la carga y se observa una pequeña distorsión en los voltajes, la cual fue estabilizada por el controlador.

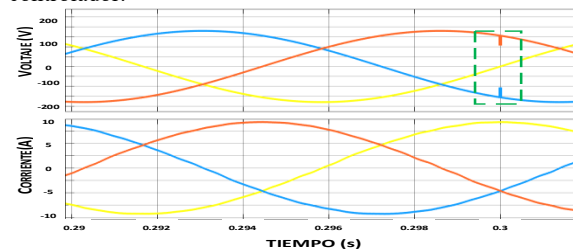


Fig. 9. Corriente y voltaje visto desde la red con carga no lineal

Las cargas no lineales introducen armónicos a la red los cuales causan una mala calidad de la energía, estos pueden observarse en la Fig. 10.

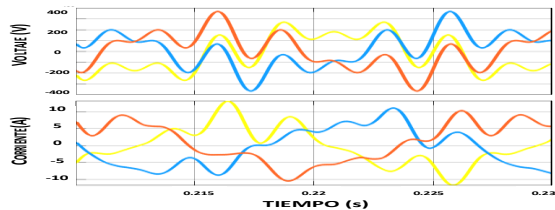


Fig. 10. Armónicos presentes en las señales de voltaje y corriente.

Debido a estos armónicos, las formas de onda de ambas señales son distorsionadas y afectan la calidad de la energía que es entregada a la red, en la Fig. 11 se presenta la distorsión armónica total sin compensación de potencias y armónicos en la red.

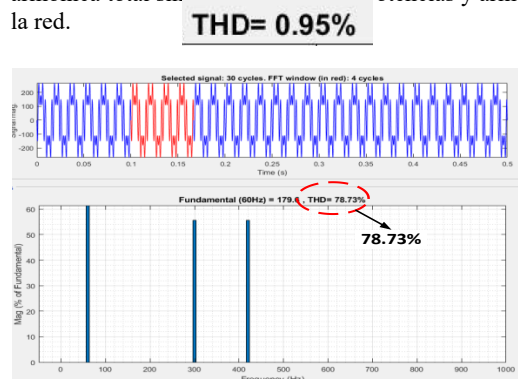


Fig. 11. THD en el sistema sin compensación.

Los sucesos mostrados anteriormente en las figuras 8, 9 y 10 son acontecimientos que afectan directamente la calidad de la energía, para ello se emplea un controlador que ayude al sistema a mitigar estos problemas.

En la siguiente Fig. se presenta el funcionamiento general del sistema integrando la compensación de potencia activa.

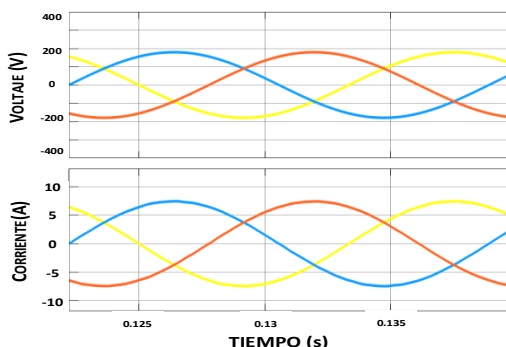


Fig. 12. Inversor trifásico conectado a red con compensación de potencia activa.

La Fig. 12 muestra cómo se encuentran correctamente desfasadas 120° cada una de las señales senoidales tanto de voltaje como de corriente, inyectando potencia activa al sistema, compensando la potencia activa, reactiva y armónicos atenuados, para corroborar esto y apegados a la norma IEE 519 en donde se establece que la distorsión armónica total de sistemas interconectados a la red eléctrica no deberá exceder el 5% se hace un análisis de las señales obtenidas, para corroborar lo antes mencionado respecto al contenido armónico que presentan, y este es mostrado en la Fig. 13.



Fig. 13. THD del sistema con compensación

Observando en la Fig. 13 que el porcentaje de contenido armónico está por debajo del estipulado por la norma IEEE519.

6. CONCLUSIONES

El principal objetivo de este documento es diseñar el control de un inversor conectado a red, con capacidad de inyectar potencia activa y potencia reactiva. Por lo anterior se ha diseñado y realizado un control vectorial.

Con el fin de validar dicho control en un entorno real, se desarrolló una simulación en el software Matlab/Simulink, en donde se integra un sistema de sensado, un inversor trifásico, un filtro LCL, una carga no lineal y la emulación de la red eléctrica.

Mediante los resultados obtenidos de las pruebas de simulación se puede concluir que el algoritmo de control funciona correctamente, obteniendo una buena calidad de la energía que es entregada a la red, así como poder compensar la potencia activa y reactiva del sistema.

7. REFERENCIAS

- Celanovic, N., & Boroyevich, D. J. I. T. o. p. e. (2000). A comprehensive study of neutral-point voltage balancing problem in three-level neutral-point-clamped voltage source PWM inverters. *15*(2), 242-249.
- Edison Roberto, C., Silva, D., & Dos Santos, E. C. J. I. I. E. M. (2011). Hr and Cursino Brandao Jacobina "Pulse width Modulation Strategies: Non sinusoidal Carrier Based PWM and space vector Modulation

- Techniques” IEEE Industrial Electronics Magazine. 37-45.
- Rashid, M. H. (2004). *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*: Pearson Educación.
- Rodríguez, P., Luna, A., Candela, I., Mujal, R., Teodorescu, R., & Blaabjerg, F. J. I. T. o. I. E. (2010). Multiresonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions. *58*(1), 127-138.
- Schonardie, M. F., & Martins, D. C. (2008). *Three-phase grid-connected photovoltaic system with active and reactive power control using dq0 transformation*. Paper presented at the 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference.
- Twining, E., & Holmes, D. G. J. I. t. o. p. e. (2003). Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter. *18*(3), 888-895.
- Zeng, Q., Chang, L., & Song, P. (2004). *SVPWM-based current controller with grid harmonic compensation for three-phase grid-connected VSI*. Paper presented at the 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551).

Modelo Dinámico Convexo de una Grúa Mecánica con 3 Grados de Libertad

Rodríguez-Sánchez, F. * López-Estrada, F. R. *
Gómez-Peñate, S. * Valencia-Palomo, G. **
Dominguez-Zenteno, J. *

* *Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tuxtla
Gutiérrez, TURIX-Dynamics Diagnosis and Control Group, Carretera
Panamericana Km 1080, CP 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
(e-mail: gatesoft@hotmail.com).*

** *Tecnológico Nacional de México/ IT Hermosillo*

Resumen: En este artículo se desarrolla principalmente el modelo dinámico y el planteamiento de un control convexo de un sistema mecánico tipo grúa aérea de tres grados de libertad constituido por un carro sobre una plataforma horizontal y un péndulo. El enfoque y derivación matemática del modelo no lineal está basado en la formulación de Euler - Lagrange y en el enfoque del sector no lineal de sistemas Takagi-Sugeno (también denominados cuasi-LPV). El aporte principal de este modelo convexo es de referencia para la implementación de diferentes esquemas de control que contemplen estos tipos de modelado, donde los esfuerzos están dirigidos a mejorar el rendimiento de los sistemas de control ante no linealidades, variabilidad de los parámetros entre otros. La validación del modelo no lineal con respecto al modelo convexo se presenta mediante simulaciones en MATLAB. Finalmente se presenta un control de oscilaciones de la carga.

Palabras claves: Convexo, Sector no lineal, Modelado dinámico. Takagi - Sugeno.

1. INTRODUCCIÓN

Una grúa es un sistema mecatrónico con el potencial de levantar y transportar materiales pesados de un punto a otro los cuales son usadas en fábricas, almacenes, sitios de construcción, astilleros, entre otros. Debido a su estructura, la carga tiende a oscilar durante las operaciones de transporte por lo que el control de estas oscilaciones es importante. Para garantizar la eficiencia en el transporte de las cargas se requiere de modelos dinámicos lo más fiel posible al sistema físico real, que permitan el diseño de sistemas de control, seguros y precisos, Smoczek and Szpytko (2014). Una grúa es un sistema no lineal subactuado, es decir tiene más grados de libertad que actuadores, debido a ello el control de estos sistemas no es trivial.

Diversos autores han abordado la problemática de modelado y control de la grúa con diferentes enfoques. En Mota and Guevara (2020) proponen un modelo matemático descrito por ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales, para representar la dinámica de la grúa aérea de doble péndulo; este modelo se linealiza alrededor de un punto de equilibrio, sin embargo, el desempeño del sistema dinámico es evaluado utilizando el modelo no lineal original. Los modelos subactuados son inciertos, en estos casos, los modelos lineales ya no representan la dinámica real, lo que generalmente degrada el desempeño del control Wu et al. (2020a). Por otra parte, todos los sistemas están sujetos a perturbaciones y

ruido de medición, con lo que un control linealizado presenta un desempeño pobre ante esas señales exógenas. Además de la importancia práctica de las grúas aéreas, también es teóricamente interesante porque cuatro variables (posición del carro y viga, dos ángulos de oscilación) deben controlarse utilizando dos entradas de control (fuerza en el carro y viga). Algunos trabajos que estudian este problema de modelado se pueden consultar en Rivillas et al. (2019); Zhang et al. (2019). Por su parte en Wu et al. (2020b) proponen un modelo del sistema subactuado el cual recibe dos entradas externas, es decir, una fuerza que permite el movimiento del puente a lo largo del eje x y una fuerza que permite el movimiento del carro a lo largo del eje y ; las ecuaciones dinámicas linealmente aproximadas son obtenidas mediante la formulación de Lagrange. No obstante, gran parte de las investigaciones reportadas están centradas considerando modelos lineales; por lo que en este trabajo se propone un modelo dinámico exacto de la grúa considerando técnicas convexas lineales de parámetros variantes (LPV) obtenidas a través del método del sector no lineal.

Los modelos LPV están conformados por un conjunto de sistemas lineales los cuales son interpolados por funciones de peso que en conjunto representan más fielmente al sistema físico, López-Estrada et al. (2019). En Ngabesong and Yilmaz (2018) investigan un sistema de grúa tipo torre con incertidumbre variable, el enfoque propuesto LPV aborda de manera efectiva las incertidumbres, lo que implica un

problema complejo de estabilización y rendimiento. En el trabajo de Abdullahi et al. (2018) diseñan un controlador utilizando la carga útil bajo la influencia de perturbaciones externas desconocidas formulan un algoritmo adaptativo, los experimentos se llevan a cabo utilizando una grúa aérea de laboratorio. Santos-Estudillo et al. (2020) desarrollarán el diseño de un controlador usando compensación paralela distribuida con desempeño robusto H_∞ ante perturbaciones para la estabilización del sistema de una grúa de tres grados de libertad (3 DOF por sus siglas en inglés) representado por un modelo Takagi-Sugeno (TS), se presentan resultados de simulación que demuestran la aplicabilidad y el desempeño del controlador obtenido en presencia de perturbaciones externas en la entrada. Aktas et al. (2019) proponen un procedimiento alternativo de ajuste de un controlador PID de ganancia programada para un sistema de control (LPV) de una grúa tipo pórtico, consideran como parámetro de programación la longitud del cable. Un controlador de rechazo activo de perturbaciones (ADRC) basado en datos de segundo orden fusionado con un controlador lógico Takagi-Sugeno Fuzzy (PDTSF) proporcional derivativo fue abordado por Roman et al. (2019). En Zhang et al. (2020) es estudiado un control de modo deslizante integral adaptativo (AISMC), para la reducción del balanceo de la carga útil de una grúa tipo torre 4-DOF, el método AISMC propuesto es esencialmente continuo y libre de chattering. Shao et al. (2020) basado en el modelado difuso Takagi-Sugeno y en desigualdades matriciales lineales, presentan un esquema de control de posición y anti-swing para una grúa tipo puente. Proponen un modelo dinámico no lineal, el modelo difuso Takagi-Sugeno se construye utilizando el sector no lineal.

En este trabajo esta dedicado al desarrollo y obtención del modelo no lineal de una grúa del tipo aérea con 3 DOF, este modelo es utilizado para derivar un modelo convexo que represente fielmente al sistema físico. La validación o comparación se lleva a cabo por medio de simulación en MATLAB/SIMULINK. También es útil como referencia para el diseño de esquemas de control basado en técnicas convexas, el esquema planteado en este trabajo es un estabilizador del tipo PDC.

Este artículo está estructurado de la siguiente manera. Las secciones 2 y 3 están relacionadas con el modelo dinámico no lineal y la obtención del modelo convexo del sistema de grúa aérea y las variables que intervienen. La sección 4 se propone un esquema de control PDC. Los resultados y validación del modelo no lineal, convexo y el esquema de control PDC son presentados mediante simulación en las secciones 5 y 6. Por último, en la sección 7 concluye el documento con comentarios útiles y sugerencias para futuros trabajos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El diagrama de fuerzas mostrado en la Fig. 1 muestra todas las variables que intervienen en una grúa aérea de 3 DOF, donde:

- F_x , F_l fuerzas de control aplicadas al carro y cable respectivamente.
- l longitud del cable de la carga.

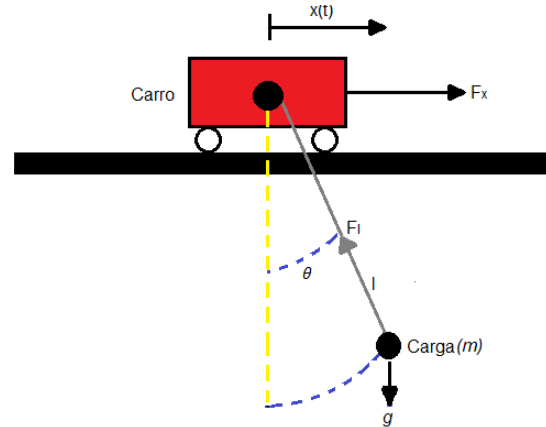


Fig. 1. Sistema de grúa aérea con 3 DOF.

- m masa de la carga.
- g gravedad.
- θ componente x del ángulo de oscilación de la carga.
- $x(t)$ desplazamiento del carro.

Por lo que considerando la formulación de Euler-Lagrange como se menciona en el trabajo de Chwa (2009), x_m , z_m , quedan definidas por (1) y (2):

$$x_m = x + l \sin \theta_x; \quad (1)$$

$$z_m = -l \cos \theta_x. \quad (2)$$

Las coordenadas generalizadas que describen el sistema están definidas como x , l , θ_x .

Por definición P es la energía potencial dada de la forma $P = mgh$, donde h es la altura o posición de la carga con respecto a su eje coordenado. La energía potencial total en la carga estaría dada por (3):

$$P = mgl(1 - \cos \theta_x); \quad (3)$$

K es la energía cinética de la carga m , donde v_m es la velocidad de la carga respectivamente está dada de la forma (4):

$$K = \frac{1}{2} \left[M_x (\dot{x})^2 + M_l (\dot{l})^2 \right] + \frac{1}{2} m (v_m)^2. \quad (4)$$

Se designan como M_x , M_l las componentes de la masa de la grúa y las masas equivalentes de las partes rotatorias como motores y sus trenes de engranes. Derivando cada una de las posiciones de la carga dados por (1) y (2) para obtener la velocidad v_m , se tiene (5):

$$v_m = (\dot{x})^2 + (\dot{l})^2 + l^2 (\dot{\theta}_x)^2 + 2 \left[\sin \theta_x \dot{l} + l \cos \theta_x \dot{\theta}_x \right] \dot{x}. \quad (5)$$

La función F de disipación de Rayleigh's está definida como (6):

$$F = \frac{1}{2} \left[D_x (\dot{x})^2 + D_l (\dot{l})^2 \right]; \quad (6)$$

donde D_x , D_l , denotan los coeficientes de viscosidad de amortiguamiento asociado con x , y el movimiento de l , respectivamente. El Lagrangiano está definido como (7):

$$L = K - P. \quad (7)$$

Sustituyendo (3) y (4) en (7) y realizando las operaciones correspondientes, se obtiene (8):

$$L = \frac{1}{2} \left[M_x (\dot{x})^2 + M_y (\dot{y})^2 + M_z (\dot{l})^2 \right] + \frac{1}{2} m (v_m)^2 + mgl (\cos\theta_x \cos\theta_y - 1). \quad (8)$$

La formulación de Euler - Lagrange se define como (9), sustituyendo (6) y (8):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = F_i = f(t). \quad (9)$$

Obteniendo las derivadas y realizando las operaciones correspondientes.

$$f_x = (M_x + m) \ddot{x} + m \sin\theta \ddot{l} + ml \cos\theta \ddot{\theta} + 2m \cos\theta \dot{l} \dot{\theta} - ml \sin\theta (\dot{\theta})^2 + D_x \dot{x}; \quad (10)$$

$$f_l = m \sin\theta \ddot{x} + (M_l + m) \ddot{l} - ml (\dot{\theta})^2 - mg \cos\theta + mg + D_l \dot{l}; \quad (11)$$

$$ml \cos\theta \ddot{x} + ml^2 \ddot{\theta} + 2ml \dot{\theta} + mgl \sin\theta = 0. \quad (12)$$

(10), (11) y (12) representan el modelo dinámico no lineal de la grúa aérea 3D con tres grados de libertad, Fig. 1, siendo el movimiento a lo largo del eje X (Almutairi and Zribi, 2009) y es la base para la obtención del modelo convexo.

3. MODELO CONVEXO DE LA GRÚA

Aplicando la fuerza F_x sobre el carro esta le provoca un desplazamiento x , lo que induce un desplazamiento angular θ sobre la carga de masa m suspendida por un cable de longitud l . El modelo no lineal puede ser reescrito de la forma (13) (López-Estrada et al., 2020):

$$M(q) \ddot{q} + D\dot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = F. \quad (13)$$

Donde:

- q , vector de variables generalizadas (x, l, θ).
- F , entradas de control ($f_x, f_l, 0$).

- $M(q)$, matriz simétrica de masas.
- D , matriz de amortiguamiento.
- $G(q)$, vector de fuerzas gravitacionales.

Resolviendo (13) en términos de $\ddot{q}$ realizando los productos matriciales indicados y definiendo las siguientes variables de estado: $x_1 = x, x_2 = \dot{x}, x_3 = l, x_4 = \dot{l}, x_5 = \theta, x_6 = \dot{\theta}$ se tiene el modelo en el espacio de estados dado por (14):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -m_2 D_x & 0 & m_1 x_5 D_l & m_4 g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 x_5 D_x & 0 & -m_3 D_l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{m_2 D_x}{x_3} & 0 & -\left(\frac{m_1 x_5 D_l}{x_3} + \frac{2x_6}{x_3}\right) & -\frac{m_5 g}{x_3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ m_2 & -m_1 \\ 0 & 0 \\ -m_1 x_5 & m_3 \\ 0 & 0 \\ -\frac{m_2}{x_3} & \frac{m_1 x_5}{x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_l \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Estas no linealidades presentes se agrupan en un vector cuya dimensión es p (número de no linealidades diferentes en el sistema) denominado vector premisa. De (14), tomar los términos no lineales $p = 4$, estos se consideran los siguientes parámetros variables representados en (15):

$$\rho(t) = \left[x_5, \frac{1}{x_3}, \frac{x_5}{x_3}, \frac{x_6}{x_3} \right]. \quad (15)$$

El modelo no lineal se puede representar en términos de los parámetros variables como se muestra en (16).

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -m_2 D_x & 0 & m_1 D_l \rho_1 & m_4 g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 D_x \rho_1 & 0 & -m_3 D_l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & m_2 D_x \rho_2 & 0 & -(m_1 D_l \rho_3 + 2\rho_4) & -m_5 g \rho_2 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ m_2 & -m_1 \rho_1 \\ 0 & 0 \\ -m_1 \rho_1 & m_3 \\ 0 & 0 \\ -m_2 \rho_2 & m_1 \rho_3 \end{bmatrix} u(t). \quad (16)$$

Para obtener el modelo convexo a través del enfoque del sector no lineal, cada término no lineal debe estar acotados como se muestra en la Fig. 2, $x_3 \in [0.1, 0.72] \text{ m}$, $x_5 \in [-0.35, 0.35] \text{ rad}$, $x_6 \in [-3.467, 3.467] \text{ rad/s}$ dados por la forma física de nuestro sistema o por la experiencia del diseñador con el equipo físico. Por ejemplo $x_5 = \theta$ podría tomar un valor diferente al propuesto en su acotamiento, $(-0.37, 0.37) \text{ rad}$ o $(-0.4, 0.4) \text{ rad}$, esta es la región donde θ sería estable o incluso hasta $(-\pi, \pi)$, sin embargo en este caso ya no sería práctico porque se consideraría que la carga podría oscilar sin ninguna restricción, prácticamente hasta

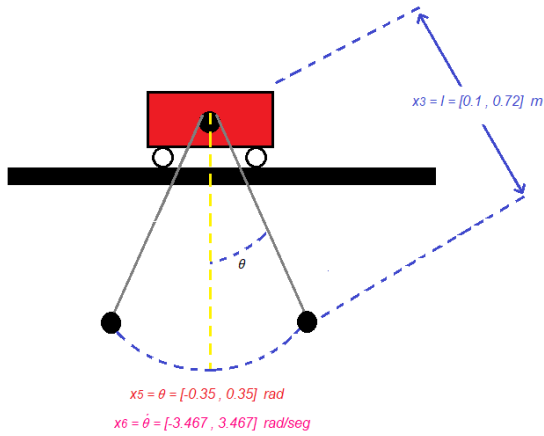


Fig. 2. Acotamientos de los parámetros.

golpear con la viga. Por lo que ρ_1, ρ_2, ρ_3 y ρ_4 están acotadas de la siguiente manera.

$$\begin{aligned}\rho_1 &= x_5 \in (\overline{\rho_1} = -0.35, \underline{\rho_1} = 0.35); \\ \rho_2 &= \frac{1}{x_3} \in (\overline{\rho_2} = 1, \underline{\rho_2} = 10); \\ \rho_3 &= \frac{x_5}{x_3} \in (\overline{\rho_3} = -3.5, \underline{\rho_3} = 3.5); \\ \rho_4 &= \frac{x_6}{x_3} \in (\overline{\rho_4} = -34.67, \underline{\rho_4} = 34.67).\end{aligned}$$

Basándonos en el valor mínimo y máximo de cada parámetro variable ρ_i , $\overline{\rho_i}$ es posible realizar p reescrituras, construyendo los siguientes pares de funciones denominadas pesos descritas como (17) y (18):

$$w_0^1 = \frac{\overline{\rho_1} - \rho_1}{\overline{\rho_1} - \underline{\rho_1}}; \quad (17)$$

$$w_1^1 = 1 - w_0^1. \quad (18)$$

De modo que cada término no lineal podrá entonces escribirse por (19):

$$\rho_1 = \underline{\rho_1} w_0^1 + \overline{\rho_1} w_1^1. \quad (19)$$

De manera similar para ρ_2, ρ_3 y ρ_4 .

El número de modelos locales es $2^4 = 16$, con $p = 4$ como el número de parámetros variables, las funciones de membresía son calculadas como el producto de las funciones de peso correspondiente a cada modelo local, como en (20):

$$h_i(\rho(t)) = \prod_{j=1}^p w_i^j(\rho_j), \quad j = 1, 2, \dots, p. \quad (20)$$

Con $i \in (0, 1)$ para denotar la variación de un valor mínimo a un valor máximo de las funciones de peso. Las funciones

de membresía son convexas, lo cual significa que (21) y (22) se cumplen.

$$h_i(\rho(t)) \geq 0; \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^{16} h_i(\rho(t)) = 1. \quad (22)$$

De esta manera llegamos a un modelo el cual no es nada más que una reescritura algebraica del modelo no lineal original, válida en todo R^n y convexa dentro de la región de modelado C. El modelo convexo qLPV queda definido de la forma (23) y (24):

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{16} h_i(\rho(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)]; \quad (23)$$

$$y(t) = Cx(t). \quad (24)$$

Debido a limitaciones de espacio no se incluyen las 16 matrices resultantes del par (A_i, B_i) ; sin embargo con fines ilustrativos para $i = 1$, se tiene:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -60.423 & 0 & -8.671 & 2.964 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -10.574 & 0 & -82 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 60.423 & 0 & 156.041 & -12.774 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.604 & 0.106 \\ 0 & 0 \\ 0.106 & 1 \\ 0 & 0 \\ -0.604 & -1.057 \end{bmatrix}.$$

Note que los estados medidos del sistema son $x_1(t)$ posición del carro, $x_3(t)$ longitud de la cuerda y $x_5(t)$ ángulo de oscilación de la carga.

4. ESTABILIZACIÓN DEL MODELO CONVEXO

El modelo convexo no forzado es cuadráticamente estable si existe una función de Lyapunov definida positiva que decrece y tiende a cero cuando t tiende a infinito para todas las trayectorias de $x(t)$.

$$V(x) = x^T P x > 0, \quad P = P^T > 0;$$

$$V(x) = x^T P x > 0, \quad P = P^T > 0.$$

Presenta estabilidad global asintótica si existe una matriz $P = P^T$ tal que la siguiente LMI (25) sea un problema factible.

$$A_i^T P + P A_i < 0. \quad (25)$$

Para estabilizar un sistema convexo usando retroalimentación de estados; la ley de control $u = -K_j x(t)$, mostrada en la Fig. 3, puede ser usada. Una solución mas general es el esquema Parallel Distributed Compensation (PDC, por sus siglas en ingles).

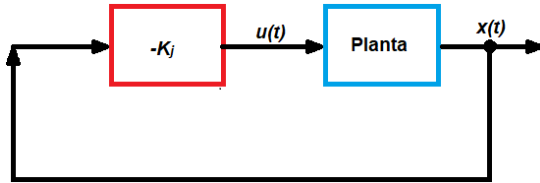


Fig. 3. Esquema de control.

Donde $r(t)$ es la referencia deseada, $e(t)$ es el error entre la diferencia deseada y la salida real $x(t)$. En el inicial de control se considera que $r(t) = 0$, se tiene la siguiente ley de control

$$u = - \sum_{i=1}^m w_j(\rho) K_j x(t);$$

sustituyendo en (23) y realizando las operaciones correspondientes se tiene:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^m w_i(\rho) \left[A_i x + B_i \left(- \sum_{j=1}^m w_j(\rho) L_j x \right) \right].$$

El modelo convexo (23) con la ley de control PDC es GAS si existe una matriz $Q > 0$ $M_j = 1, 2, \dots, m$, tal que (26):

$$(Q A_i^T + A_i Q - B_i M_j Q - M_j^T B_i^T) < 0. \quad (26)$$

5. VALIDACIÓN DEL MODELO CONVEXO

Los parámetros de la grúa se tomaron de Abdullahi et al. (2018) citado por de los Santos Estudillo (2020) y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de la grúa.

Parámetro	Valor
g	9.81 m/s^2
m	0.5 kg
M_x	1.655 kg
M_l	0.5 kg
D_x	100
D_l	82

El modelo matemático de la grúa aérea desarrollado, para su validación le fue aplicado un pulso en la entrada del actuador que controla la posición del carro sobre la viga, como se muestra en la Fig. 4 en la que se presenta un pulso de duración de 1 segundo y de amplitud 1N.

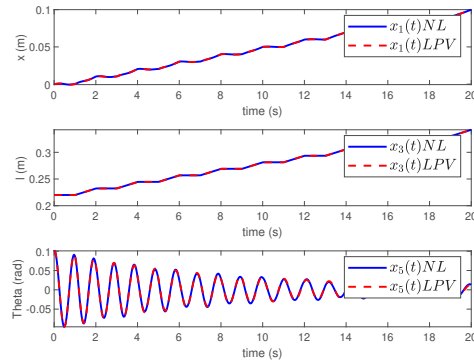


Fig. 4. Validación del MNL y LPV de la grúa.

El comportamiento del modelo convexo es idéntico al del modelo no lineal para los estados de interés.

- Se aprecia el cambio de la posición del carro mientras es aplicado un tren de pulsos de magnitud 1N en F_x con un periodo de 2 s, siendo 1 s el tiempo que tarda en alto; el carro está en reposo en $t = 0$ s, en $t = 1$ s recibe el primer pulso y arranca se mueve durante 1 s al terminar el primer pulso por inercia el carro no se detiene completamente y vuelve a recibir el segundo pulso y realiza otro movimiento y así seguirá mientras dure el tren de pulsos aplicado, es decir el carro avanza por pasos.
- La respuesta que se obtuvo por parte de la cuerda la cual se mantiene en su mayor parte constante (el cambio de longitud que presenta es despreciable) ya que no se le aplica una fuerza para que cambie su longitud.
- Se aprecia una mayor respuesta en θ ya que el movimiento del carro tiende a imprimirle una oscilación a la carga durante el movimiento, al momento del arranque del carro la oscilación presente en la carga es brusca, sin embargo, conforme pasa el tiempo la oscilación tiende a reducir su magnitud pero no desaparece.

Esta similitud se debe a que la técnica del sector no lineal representan de manera exacta al modelo no lineal en los sectores seleccionados.

6. CONCLUSIONES

Este documento ha presentado un modelo convexo que representa las no linealidades para una grúa mecánica con 3 grados de libertad. El cual consiste de un conjunto de modelos lineales interpolados por funciones de ponderación. El modelado de los sistemas dinámicos es una de las partes más importantes en la ingeniería de control. Este modelo ayuda a entender teórica y físicamente el comportamiento de la dinámica de la grúa aérea, así como diseñar el esquema de control apropiado con base en el problema que se quiere resolver. Las grúas presentan propiedades interesantes para el control desde el punto de vista del modelado representa un desafío; para simplificar las complejidades de tratar con

el modelo no lineal de la grúa, en muchos trabajos se opta por aproximaciones lineales. Las simulaciones numéricas muestran la efectividad del modelo convexo propuesto y su posible utilidad en trabajos futuros en el diseño e implementación de esquemas de control no lineales.

REFERENCIAS

- Abdullahi, A.M., Mohamed, Z., Selamat, H., Pota, H.R., Abidin, M.Z., Ismail, F., and Haruna, A. (2018). Adaptive output-based command shaping for sway control of a 3d overhead crane with payload hoisting and wind disturbance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 98, 157–172.
- Aktas, A., Yazici, H., and Sever, M. (2019). Lmi-based design of an i-pd+ pd type lpv state feedback controller for a gantry crane. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(6), 1640–1655.
- Almutairi, N.B. and Zribi, M. (2009). Sliding mode control of a three-dimensional overhead crane. *Journal of vibration and control*, 15(11), 1679–1730.
- Chwa, D. (2009). Nonlinear tracking control of 3-d overhead cranes against the initial swing angle and the variation of payload weight. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17(4), 876–883.
- de los Santos Estudillo, O.R. (2020). *Control tolerante a fallas de una grúa de tres grados de libertad mediante técnicas Takagi-Sugeno*. Ph.D. thesis.
- López-Estrada, F.R., Rotondo, D., and Valencia-Palomo, G. (2019). A review of convex approaches for control, observation and safety of linear parameter varying and takagi-sugeno systems. *Processes*, 7(11), 814.
- López-Estrada, F.R., Santos-Estudillo, O., Valencia-Palomo, G., Gómez-Peñate, S., and Hernandez-Gutiérrez, C. (2020). Robust qlpv tracking fault-tolerant control of a 3 dof mechanical crane. *Mathematical and Computational Applications*, 25(3), 48.
- Mota, G.B. and Guevara, E. (2020). Modelado y control de una grúa móvil con tres grados de libertad. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 12(1), 127–137.
- Ngabesong, R. and Yilmaz, M. (2018). Parametric and linear parameter varying modeling and optimization of uncertain crane systems. *International Journal of Dynamics and Control*, 7(2), 430–438. doi:10.1007/s40435-018-0466-3.
- Rivillas, A.C.C., Páez, D.C., Ospina-Henao, P.A., et al. (2019). Displacement dynamics and simulation for overhead gantry crane using servo control system. In *Workshop on Engineering Applications*, 114–125. Springer.
- Roman, R.C., Precup, R.E., Petriu, E.M., and Dragan, F. (2019). Combination of data-driven active disturbance rejection and takagi-sugeno fuzzy control with experimental validation on tower crane systems. *Energies*, 12(8), 1548.
- Santos-Estudillo, O., López-Estrada, F., Gómez-Peñate, S., Domínguez-Zenteno, J., and Molina-Domínguez, S. (2020). Estabilización robusta de una grúa de 3dof mediante técnicas takagi-sugeno. (1), 43–57.
- Shao, X., Zhang, J., Zhang, X., Zhao, Z., and Chen, Z. (2020). A novel anti-swing and position control method for overhead crane. *Science Progress*, 103(1), 3–5.
- Smoczek, J. and Szpytko, J. (2014). Evolutionary algorithm-based design of a fuzzy tbf predictive model and tsk fuzzy anti-sway crane control system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 28, 190–200.
- Wu, X., Xu, K., Lei, M., and He, X. (2020a). Disturbance-compensation-based continuous sliding mode control for overhead cranes with disturbances. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(4), 2182–2189.
- Wu, Y., Sun, N., Chen, H., and Fang, Y. (2020b). Adaptive output feedback control for 5-dof varying-cable-length tower cranes with cargo mass estimation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(4), 2453–2464.
- Zhang, M., Zhang, Y., Chen, H., and Cheng, X. (2019). Model-independent pd-smc method with payload swing suppression for 3d overhead crane systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 129, 381–393.
- Zhang, M., Zhang, Y., Ouyang, H., Ma, C., and Cheng, X. (2020). Adaptive integral sliding mode control with payload sway reduction for 4-dof tower crane systems. *Nonlinear Dynamics*, 1–15.

Control de Posición de Robots Manipuladores Mediante un Esquema PD con Ganancias Variables

Brandon Sánchez-García* Fernando Reyes-Cortés *
Basil M. Al-Hadithi**

*Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México (e-mail: brandon.sanchez@alumno.buap.mx).

**Centro de Automática y Robótica, Grupo de Control Inteligente, Universidad Politécnica de Madrid, España

Resumen: En este trabajo, se aborda el problema de control de posición de robots manipuladores en espacio articular. El esquema de control analizado es el Proporcional-Derivativo (PD), donde sus matrices de ganancia son variables formadas por funciones continuas, diferenciables y suaves que dependen del error de posición y la velocidad de movimiento del robot manipulador. Desde el contexto del método directo de Lyapunov, la estabilidad asintótica del punto de equilibrio de la ecuación en lazo cerrado y la sintonía automática de las ganancias variables está garantizada mediante la propuesta de una función de energía estricta. Asimismo, se demuestra teóricamente la robustez del regulador propuesto frente a incertidumbres paramétricas del robot. Finalmente, para verificar su funcionalidad y desempeño, presentamos resultados experimentales en un robot antropomórfico de transmisión directa con 3 grados de libertad (3 gdl) acompañado de un análisis comparativo con los reguladores PD y Proporcional-Integral-Derivativo (PID) con ganancias constantes.

Keywords: Robots manipuladores, Regulador PD, Ganancias variables, Estabilidad asintótica de Lyapunov.

1. INTRODUCCIÓN

El problema de control de posición de robots manipuladores en su espacio articular (también llamado regulación) es un caso particular del problema general denominado control de trayectoria. El problema de control de posición en espacio articular, consiste en diseñar un regulador tal que las posiciones del robot manipulador convergen asintóticamente hacia las posiciones deseadas cuando el tiempo evoluciona, sin importar las condiciones iniciales. En otras palabras, el regulador debe ser capaz de generar un atractor con propiedades de estabilidad asintótica global. En este sentido, el regulador representa los pares aplicados de cada uno de los servomotores del robot manipulador para seguir una referencia constante en el tiempo, llamada posición deseada. Además, es necesario que este esquema de control no solo cumpla con lo anterior, sino que tenga un alto desempeño para ser contemplado como un serio candidato para aplicaciones más complejas Reyes et al. (2011).

Desde esta perspectiva, el diseño de nuevos algoritmos de control con alto desempeño se ha convertido en una actividad científica de interés para el área en robótica. La metodología de moldeo de energía más una función de inyección de amortiguamiento presentada en Takegaki and Arimoto (1981), es una de las bases de diseño que ha sido adoptada por diversos investigadores para construir una familia de algoritmos de control para robots manipuladores. Dicha técnica permite obtener esquemas de control a partir del gradiente de la energía

potencial artificial del robot manipulador y, se añade una función de inyección de amortiguamiento. Finalmente, una compensación de gravedad para robots que la necesitan.

El esquema PD es un caso particular de un algoritmo de control construido a partir del moldeo de energía. También, es uno de los controladores más usados en robots industriales. En Kelly et al. (2005), se describen diversas versiones que dicho regulador puede adoptar, poniendo en evidencia la flexibilidad con la que este regulador cuenta. Desde su presentación más simple, hasta en una versión con compensación de gravedad adaptable para disminuir los errores en régimen permanente. Por otro lado, el regulador PD se ha modificado en diferentes formas, en Reyes and Rosado (2005) el PD clásico es modificado para dar lugar a una familia de reguladores de tipo polinomial para el control de posición de robots manipuladores, se demuestra la estabilidad asintótica de acuerdo con el método directo de Lyapunov y se presentan resultados experimentales en un robot de transmisión directa de 3 gdl. En los anteriores trabajos descritos, se considera el escenario donde el PD tiene sus ganancias constantes.

Sin embargo, el desempeño del regulador PD con ganancias constantes depende directamente de la correcta sintonía, siendo un proceso complicado para el diseñador y en donde la mayoría de las ocasiones es realizada de manera empírica. Dada esta problemática, el regulador PD es modificado de ganancias lineales a no lineales en Kelly and Carelli (1996), dependientes de los estados del robot manipulador. Esta alteración, no perjudica las propiedades de estabilidad del punto de equilibrio

de la ecuación en lazo cerrado. Años más tarde, un PD con ganancias no lineales es reportado en Reyes et al. (1999), donde se exponen resultados experimentales en una plataforma de arquitectura abierta para robots manipuladores de transmisión directa (direct-drive), verificando la funcionalidad y mejor desempeño de este tipo de reguladores con ganancias no lineales. Posteriormente, surge el concepto de ganancias variables, donde sus cambios de los valores numéricos de las matrices de ganancia son en función de variables físicas medidas durante el proceso de control de la planta.

No obstante, el problema de sintonía de ganancias prevalece. Uno de los enfoques más utilizados para abordarlo, es la lógica difusa. En Llama et al. (2001), se presenta un PD para el problema de control de trayectoria donde sus ganancias son sintonizadas mediante el esquema Fuzzy Logic Tuner (FLT). Este esquema difuso se divide en tres principales módulos: módulo de fusificación, regla base con el módulo de inferencia y el módulo de defusificación. Desde el contexto de la teoría de estabilidad de Lyapunov, se demuestra la estabilidad asintótica y uniforme del punto de equilibrio, finalizando con la presentación de resultados experimentales en un robot de 2 gdl. Se reporta en Salas et al. (2012), un esquema PD con ganancias variables con sintonía automática usando un esquema difuso, análisis de estabilidad de la ecuación en lazo cerrado para el problema de control de trayectoria y resultados de simulación en un robot manipulador. En trabajos más recientes, se diseña en Kelly et al. (2013) un esquema PD con compensación de gravedad y adaptación difusa para las ganancias, demostrando la estabilidad asintótica local del punto de equilibrio de la ecuación en lazo cerrado y exponiendo resultados experimentales en un robot de 3 gdl.

El método de sintonía de las ganancias por medio de redes neuronales también ha sido un tema de interés. En Armendáriz et al. (2012), se presenta la auto sintonía de un PD para ser implementado en el seguimiento de trayectoria de un robot manipulador. El método de sintonía está sintetizado en línea a través de un esquema neuro-difuso recurrente, el cual produce una función suave de la entrada de control para trayectorias suaves deseadas. Se demuestra la estabilidad exponencial semi-global y resultados de simulación. De igual manera, destacamos el trabajo reportado en Le et al. (2013), donde el método de sintonía de las ganancias de un PD del tipo torque calculado es realizado usando redes neuronales, teniendo como ventajas la flexibilidad, adaptación y alta habilidad de aprendizaje. Para verificar el desempeño, se realizan diversas simulaciones en robots de 2 gdl paralelos.

El algoritmo PSO (Particle Swarm Optimization), también resulta una propuesta interesante para la sintonía de algoritmos de control para robots manipuladores. Se presenta en Reyes and Al-Hadithi (2020), un algoritmo de control del tipo arcoseno hiperbólico con estabilidad asintótica y global. Las ganancias del controlador propuestos son sintonizadas vía PSO, el cual está inspirado en el comportamiento social de animales como las hormigas y abejas. Este esquema es un problema de

optimización donde el algoritmo busca la solución óptima entre todas las soluciones posibles. En este trabajo, se muestran resultados importantes a nivel experimental sobre los beneficios de la sintonía de esquemas de control diseñados a partir de la técnica de moldeo de energía.

Por otro lado, la desventaja de integrar algoritmos externos a la sintonía de las ganancias variables radica en que dichos esquemas no pertenecen a la ecuación en lazo cerrado, por lo tanto, no podemos realizar un análisis de estabilidad del punto de equilibrio cuando los algoritmos realizan el método de sintonía, usando teorías con rigor científico como es la teoría de estabilidad de Lyapunov. En este sentido, la sintonía directa de las ganancias variables resulta ser una solución más esbelta y eficaz para el problema de regulación de robots manipuladores con ganancias variables en el espacio articular.

Desde este contexto, se han presentado diversos trabajos que destacan. El reportado en Limón et al. (2016), se presentan dos esquemas con ganancias variables para robots en cadena abierta, donde el PD está incluido. Se demuestra la estabilidad asintótica mediante la propuesta de una función estricta de Lyapunov y resultados experimentales en un robot de 3 gdl. La sintonía de las ganancias variables es realizada mediante un esquema de diseño bien definido y así no saturar los límites físicos de los actuadores. Los mismos autores proponen en Limón et al. (2017), la regulación de robots manipuladores usando una familia de funciones saturadas con la ganancia derivativa variable que depende del error de posición y la velocidad de movimiento del robot. La sintonización es mediante el diseño de la matriz de ganancia en función del torque máximo aplicado por cada servomotor y el factor de velocidad permitida por el efecto de amortiguamiento de la acción de control derivativa, la cual debe ser menor a la velocidad máxima de rotación del servomotor.

En trabajos más recientes se propone en Sánchez-García et al. (2020b), una familia de reguladores PD con ganancias variables para robots manipuladores. La propuesta consiste en una gama extensa de ganancias variables dependientes del error de posición y la velocidad del robot, dando lugar a un esquema PD diferente para cada caso particular. La sintonía de las ganancias es realizada por medio de la selección de parámetros en función del torque máximo aplicado por el servomotor y el porcentaje de amortiguamiento deseado en términos de la acción de control proporcional aplicada. La funcionalidad es verificada a nivel experimental en un robot antropomórfico de 3 gdl. Misma propuesta de ganancias variables es presentada en Sánchez-García et al. (2020a), para reguladores saturados de robots manipuladores. Se presenta el análisis de estabilidad asintótica y global mediante la propuesta de una función candidata de Lyapunov y resultados de simulación en un robot de 2 gdl para comparar su desempeño con otros reguladores conocidos en la literatura.

Sin embargo, los trabajos anteriormente reportados no presentan un regulador PD con ganancias variables construidas a través de una función continua y diferenciable dependiente del error de posición y la velocidad de movimiento. La suavidad de la función nos permite tener cambios ligeros de los valores numéricos de las matrices de ganancia hasta que la sintonía automática es alcanzada usando una regla matemática explícita; en este sentido, no se integran algoritmos externos para la sintonía de las ganancias variables que no pertenecen a la ecuación en lazo cerrado. Desde esta perspectiva, el error de posición y la velocidad de movimiento del robot aportan simultáneamente a la acción de control proporcional y a la acción de control derivativa, siendo una estrategia de regulación de robots manipuladores diferente, con respecto los esquemas de control con ganancias variables propuestos hasta hoy en día en la literatura. Mediante la propuesta de una función estricta de Lyapunov, la estabilidad asintótica del punto de equilibrio es demostrada. Asimismo, se demuestra teóricamente la robustez del algoritmo de control ante las incertidumbres de los parámetros numéricos del robot a partir de una función de energía propuesta. Finalmente, para verificar la funcionalidad de los algoritmos propuestos se realiza el control de posición de un robot experimental de transmisión directa y de 3 gdl, acompañado de un análisis comparativo preliminar de su desempeño frente a esquemas de control conocidos en la literatura como son el PD y el PID con ganancias constantes.

Este trabajo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se presenta el modelo dinámico del robot y propiedades necesarias para propósitos de análisis. La sección 3, presenta la estructura y propiedades de las ganancias variables proporcional y derivativa. El regulador PD con ganancias variables, las condiciones de estabilidad asintótica y el análisis de robustez son presentados en la sección 4. En la sección 5, presentamos resultados experimentales en el robot manipulador, el esquema de sintonía automática y el análisis de desempeño del algoritmo de control propuesto. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

2. DINÁMICA DEL ROBOT MANIPULADOR

Considerando el modelo dinámico de un robot rígido de n grados de libertad:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + B\dot{q} = \tau \quad (1)$$

Dónde q es el vector de coordenadas generalizadas o posiciones articulares, $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de velocidades articulares, $\ddot{q} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de aceleraciones articulares, $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercia, simétrica y definida positiva, $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis, $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz diagonal de fricción viscosa y $g(q) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de pares gravitacionales, $\tau \in \mathbb{R}^n$ es el vector de pares o torques de entrada.

3. GANANCIAS VARIABLES

Se proponen las siguientes ganancias variables para reguladores de robots manipuladores, dependientes del error de posición y la velocidad de movimiento del robot manipulador.

$$K_p(\tilde{q}, \dot{q}) = \begin{bmatrix} k_{p1}(\tilde{q}_1, \dot{q}_1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_{pn}(\tilde{q}_n, \dot{q}_n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$K_v(\tilde{q}, \dot{q}) = \begin{bmatrix} k_{v1}(\tilde{q}_1, \dot{q}_1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_{vn}(\tilde{q}_n, \dot{q}_n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Siendo:

$$k_{pi}(\tilde{q}_i, \dot{q}_i) = \hat{k}_{pi} \cos^2 \left(\frac{\tilde{q}_i + \dot{q}_i}{\sqrt{1 + (\tilde{q}_i + \dot{q}_i)^2}} \right) \quad (4)$$

$$k_{vi}(\tilde{q}_i, \dot{q}_i) = \hat{k}_{vi} \cos^2 \left(\frac{\tilde{q}_i + \dot{q}_i}{\sqrt{1 + (\tilde{q}_i + \dot{q}_i)^2}} \right) \quad (5)$$

Para $i=1, 2, 3, \dots, n$. La ganancia proporcional variable $K_p(\tilde{q}, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ y la ganancia derivativa $K_v(\tilde{q}, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, son diagonales con las entradas $k_{pi}(\tilde{q}_i, \dot{q}_i)$ y $k_{vi}(\tilde{q}_i, \dot{q}_i)$, respectivamente. Donde, el vector de error de posición se define como: $\tilde{q} = q - q_d$, siendo $q_d \in \mathbb{R}^n$ el vector de posición deseadas. Las constantes $\hat{k}_{pi} > 0$, $\hat{k}_{vi} > 0$. Observe que las matrices de ganancia variables son definidas positivas. Si se asegura la convergencia asintótica del error de posición del error de posición y de la velocidad hacia cero, la sintonía automática depende de la elección de los parámetros de $\hat{k}_{pi}$ y $\hat{k}_{vi}$, a través de una regla matemática explícita en función del torque máximo aplicado por los servomotores del robot.

4. REGULADORES PD CON GANANCIAS VARIABLES

El problema de control a solucionar consiste en diseñar un regulador $\tau \in \mathbb{R}^n$ con ganancias variables, tal que el error de posición y la velocidad de movimiento del robot converjan asintóticamente a cero, cuando el tiempo evoluciona, esto es:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} \tilde{q}(t) \\ \dot{\tilde{q}}(t) \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{0} \in \mathbb{R}^{2n}. \quad \forall t \geq 0. \quad (6)$$

Para dar solución a (6) se ha diseñado un regulador PD con las ganancias variables (2) y (3) más una compensación de gravedad. Su estructura se describe de la siguiente manera:

$$\tau = K_p(\tilde{q}, \dot{q})\tilde{q} - K_v(\tilde{q}, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (7)$$

A partir del regulador PD con ganancias variables (7) y el modelo dinámico del robot manipulador (1) se construye la ecuación en lazo cerrado, teniendo la siguiente estructura:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M(q)^{-1} \left[K_p(\tilde{q}, \dot{q})\tilde{q} - K_v(\tilde{q}, \dot{q})\dot{q} - B\dot{q} - C(q, \dot{q})\dot{q} \right] \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde el origen de la ecuación en lazo cerrado (8) es el único punto de equilibrio.

4.1 Condiciones de estabilidad asintótica de Lyapunov

Con la finalidad de demostrar la *estabilidad asintótica y global* del punto de equilibrio de la ecuación en lazo cerrado de acuerdo con el método directo de Lyapunov, se propone la siguiente función estricta, la cual es definida positiva y su derivada es definida negativa, evitando el teorema de Krasovskii-LaSalle. Dicha función candidata se describe de la siguiente manera:

$$V(\tilde{q}, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + \int_0^{\tilde{q}} \sigma^T K_p(\sigma, \dot{q}) d\sigma - \frac{\epsilon_0}{1 + \|\tilde{q}\|} \tilde{q}^T M(q) \dot{q} \quad (9)$$

Siendo ϵ_0 una constante positiva. El objetivo no es encontrar su valor numérico, sino demostrar su intervalo de existencia para propósitos de análisis de estabilidad asintótica del punto de equilibrio. El desarrollo matemático de la demostración se encuentra reportado en Sánchez-García et al. (2020a), para una familia de reguladores PD con ganancias variables. Dicho esto, el punto de equilibrio es *asintóticamente estable y global*.

4.2 Robustez frente a incertidumbre paramétrica

El algoritmo de control propuesto presenta propiedades de robustez frente a la incertidumbre de los parámetros numéricos del robot manipulador. Para demostrar dicha propiedad, se propone la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$V(\tilde{q}, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + \int_0^{\tilde{q}} \sigma^T K_p(\sigma, \dot{q}) d\sigma \quad (10)$$

Siendo (10) definida positiva. Tomando la derivada temporal a lo largo de las trayectorias de la ecuación en lazo cerrado (8), se obtiene

$$\dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}) \leq -\dot{q}^T [B + K_v(\tilde{q}, \dot{q})] \dot{q} \leq 0 \quad (11)$$

Observe que la función candidata cumple con ser definida positiva y su derivada temporal es una función semi definida negativa. Esto significa que la función propuesta es decreciente, es decir:

$$V(\tilde{q}(t), \dot{q}(t)) \geq V(\tilde{q}(0), \dot{q}(0)) > 0. \quad (12)$$

Considerando lo siguiente: Sean las constantes positivas k_{pl} y k_{pu} las cotas inferiores y superiores de la integral (5), respectivamente; $k_{pu} \geq k_{pi}(\tilde{q}_i, \dot{q}_i) \geq k_{pl} \forall \tilde{q}_i \in \mathbb{R}$ para $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Entonces, Sánchez-García et al. (2021):

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} k_{pl} \|\tilde{q}\|^2 &\leq \int_0^{\tilde{q}} \sigma^T K_p(\sigma, \dot{q}) d\sigma \\ &\leq \frac{1}{2} k_{pu} \|\tilde{q}\|^2 \end{aligned} \quad (13)$$

A partir de la desigualdad (12), se toman las cotas superiores e inferiores usando la propiedad (13). Realizando algebra, observe que la norma euclidiana del error de posición se puede escribir como:

$$\|\tilde{q}(t)\| \leq \sqrt{\frac{k_{pu}}{k_{pl}}} \|\tilde{q}(0)\| \quad (14)$$

Es claro que el error de posición está acotado y que no depende de los parámetros numéricos de la dinámica del robot manipulador. Esto demuestra la robustez del algoritmo de control frente a la incertidumbre paramétrica.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para validar los desarrollos teóricos previos, se realiza el control de posición usando el esquema PD con ganancias variables en un robot experimental de transmisión directa y 3 gdl (ver Fig. 1), diseñado y construido en la Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP); México. Con propósitos de comparación, se ha implementado el esquema PD y PID con ganancias constantes, siendo sintonizados manualmente como en Limón et al. (2016). El experimento consiste en llevar al manipulador hacia el vector de posiciones deseadas [90, 45, 45] grados, desde su vector de posición de casa [0, 0, 0] grados. Para implementar los algoritmos de control es necesario el vector de compensación de gravedad, donde dichos parámetros numéricos se han obtenido partir de estrategias de identificación reportadas en Reyes (2011).



Fig. 1. Robot manipulador experimental de transmisión directa con 3 gdl.

Los servomotores del robot cuentan con las siguientes especificaciones, tal y como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Servomotores

Articulación	Torque Max	Modelo	Encoder
Base	15 Nm	DM1055B	1638400 p/re
Hombro	50 Nm	DM1050A	1015808 p/re
Codo	4 Nm	DM1004CB	2612440

5.1 Esquema de sintonía automática

Con el fin de que la sintonía automática del regulador PD con ganancias variables sea alcanzada, se propone la siguiente regla matemática explícita, en función del i -ésimo torque máximo aplicado por el servomotor τ_i^{Max} .

$$k_{pi}(\tilde{q}_i, \dot{q}_i) = 2\delta_i \sqrt{\tau_i^{Max}} \cos^2 \left(\frac{\tilde{q}_i + \dot{q}_i}{\sqrt{1 + (\tilde{q}_i + \dot{q}_i)^2}} \right) \quad (15)$$

$$k_{vi}(\tilde{q}_i, \dot{q}_i) = \frac{1}{3} \hat{k}_{pi} \cos^2 \left(\frac{\tilde{q}_i + \dot{q}_i}{\sqrt{1 + (\tilde{q}_i + \dot{q}_i)^2}} \right) \quad (16)$$

donde δ_i vive en el intervalo (0,5), el cual es definido por el diseñador. Este intervalo propuesto, permite que los actuadores del robot manipulador no superen el 90 por ciento del torque máximo aplicado. Dicho esto, es posible variar los valores hasta obtener la respuesta deseada en el manipulador, sin de superar las capacidades de los actuadores. Para propósitos de nuestro experimento, se han elegido los parámetros $\delta_i = \{1.8, 3.5, 2\}$.

5.2 Regulación del robot manipulador

Cuando se regula al robot manipulador mediante los esquemas a estudiar, se obtiene las siguientes respuestas:

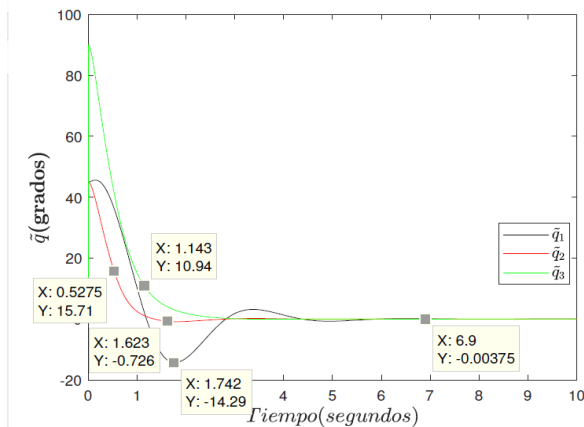


Fig. 2. Errores de posición del robot manipulador mediante el esquema PD con ganancias variables.

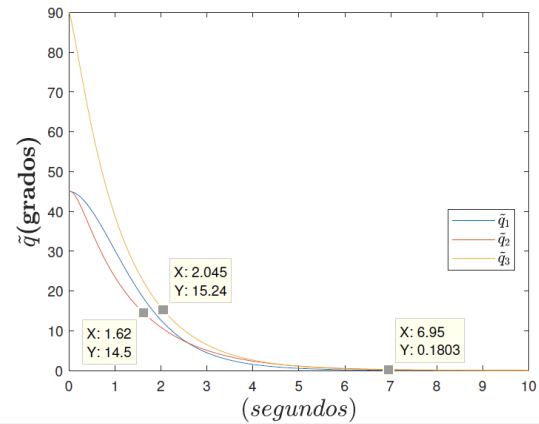


Fig. 3. Errores de posición del robot manipulador mediante el esquema PD con ganancias constantes.

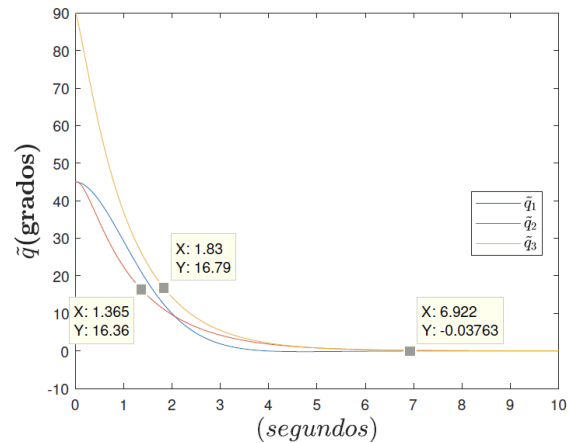


Fig. 4. Errores de posición del robot manipulador mediante el esquema PID con ganancias constantes.

En la Fig. 2, los errores de posición del robot manipulador convergen asintóticamente hacia una vecindad muy cercana del punto de equilibrio. A través de la acción de control proporcional, el robot es impulsado rápidamente a las posiciones deseadas, mientras que la acción de control derivativa inyecta amortiguamiento para una respuesta sub amortiguada en régimen transitorio. En la Fig. 3, se muestran los errores de posición del robot cuando es regulado por el PD clásico, Note que, de igual manera el robot converge a las posiciones deseadas. Sin embargo, llega más lento a régimen permanente y con un mayor error. Por otro lado, los errores de posición del robot cuando se regula con el PID clásico se muestran en la Fig. 4. Observe que, nuestro regulador propuesto mejora la cualidad original del PID,

disminuir el error en régimen permanente. Además, el PID clásico solo ofrece estabilidad asintótica local.

5.3 Análisis de desempeño

Para realizar un análisis comparativo preliminar de los esquemas de control se mide el desempeño de los algoritmos evaluados. Se hace uso de algunos índices ampliamente conocidos, tales como: norma L, IAE y ITAE. El objetivo es medir el vector de error de posición y encontrar el regulador con mejor desempeño a través de los índices anteriormente mencionados. Menor valor numérico del índice, mejor desempeño tiene el controlador. En la Tabla 2, se muestra los índices de desempeño de los controladores:

Tabla 2. Índices de desempeño

Regulador	Norma L	IAE	ITAE
PD variable	21.71	69.38	1.380
PD clásico	28.63	134.35	5.797
PID clásico	29.44	144.16	6.786

Como se observa, el esquema de control PD con ganancias variables propuesto, mejora a estos dos reguladores clásicos, dado que sus valores numéricos de los índices son los menores de todos. Dicho esto, los resultados experimentales muestran la funcionalidad del algoritmo de control propuesto en un robot manipulador y el alto desempeño cuando los valores constantes elegidos son los óptimos.

6. CONCLUSIONS

El regulador PD con ganancias variables tiene inmunidad a las condiciones iniciales, entonces se convierte en un esquema interesante para implementar en estrategias de control de movimiento de robots manipuladores. Asimismo, se ha demostrado la robustez frente a la incertidumbre paramétrica con un alto rango, dado que no depende de la dinámica del robot manipulador. Finalmente, como trabajo futuro se pretende realizar más experimentos en el robot manipulador para mostrar la robustez de nuestro algoritmo de control ante perturbaciones no modeladas.

AGRADECIMIENTOS

B. Sánchez-García agradece a CONACyT por la beca No. 1008015 otorgada para estudios de maestría.

REFERENCES

Armendáriz, J., Parra-Vega, V., García Rodríguez R., and Hirai, S. (2012). Dynamic self-tuning PD control tracking of robot manipulators. In *2012 IEEE Conference on Decision and Control*, 51, 1172-1179.

Kelly, R. and Carelli, R., (1996). A class a nonlinear PD-type controller for robot manipulators. *Journal fields of robotic*, 13, 793-802.

Kelly, R., Davila, V. and Loria, A. (2005). *Control of robot manipulators in joint space*, Springer, Germany.

Kelly, R., Haber, R., Haber-Guerra, R., and Reyes-Cortés, F. (2013) Lyapunov stable control of robot manipulators: A fuzzy self-tuning procedure. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 5, 313-326.

Le, T., Kang, H., Suh, Y., and Ro, Y. (2012), An online self-gain tuning method using neural networks for nonlinear PD computed torque controller of 2-dof parallel manipulator. *Neurocomputing*, 116, 53-61.

Limón, M., Reyes-Cortés, F., and Gonzalez, E. (2016) Unbounded regulators with variable gains for a direct-drive robot manipulator. *Journal for Control Meus. Electro. Compu. and Comuni.*, 57(2), 484-495.

Limón, M. Reyes-Cortés, F., and González, E. (2017). Saturated regulation with derivative variable gain for robot manipulators. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, (14), 434-445.

Llama, M., Kelly, R., and Santibáñez, V. (2001). A stable motion control system for manipulators via fuzzy self-tuning. *Fuzzy sets and Systems*, 124, 133-154.

Reyes-Cortés, F. (2011). *Robótica: Control de robots manipuladores*. Alfa Omega, México

Reyes-Cortes, F., and Al-Hadithi, B. (2020). An asinh-type regulator for robot manipulators with global asymptotic stability. *Journal for Control Meus. Electro. Compu. and Comuni*, 61(4), 574-586.

Reyes-Cortés, F., Cid, J., and Campuzano, C. (1999). Development of an experimental platform with open architecture for robot manipulators. In: *International Conference Modeling and Simulation*, 2(6), 77-81.

Reyes-Cortés, F. and Rosado, A. (2005), Polynomial family of PD-type controllers for robot manipulators. *Control Engineering Practice*, 13(4), 441-450.

Salas, F., Santibáñez V., and Llama, M. (2012). Variable gains PD tracking control for robot manipulators: Stability analysis and simulation. In: *IEEE World Automation Congress (WAC)*, 1.6.

Sánchez-García, B., Reyes-Cortés, F., Al-Hadithi, B., and Félix, O. (2021). Global saturated regulator with variable gains for robot manipulators, *Journal of Robotics and Control*, 2(6), 571-581.

Sánchez-García, B., Rodríguez, E., Reyes-Cortés F., Al-Hadithi, B., and Félix, O. (2020a). Desing and implementation of saturated regulators with variable gains for robot manipulators, In: *Congre. Nac. de Mecatrónica, Desarrollo con enfoque mecatrónico, Cap 9*, 113-130.

Sánchez-García, B., Rodríguez, E., Reyes-Cortés F., Félix, O., and Al-Hadithi, B. (2020b). An extended family of PD regulators with variable gains, In: *Congre. Int. de Ing. Electrónica*, 42, 47.52.

Takegaki, M. and Arimoto, S. (1981). A new feedback method for dynamic control of manipulators, *Journal of dynamic Systems Measurement and Control*, 102, 119-125.

Sistema de Monitoreo y Control para la Regulación de Glucosa en Pacientes con Diabetes Tipo 1

F. Ramírez-Rasgado * J. Castro-Gómez ***
O. Hernández-González ** C.-M. Astorga-Zaragoza *
G. Valencia-Palomo ***

* *Tecnológico Nacional de México: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Mor., México.(e-mail: felipe.ramirez@cenidet.edu.mx)*

** *CONACYT: Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico de Hermosillo, Hermosillo, Son., México.*

*** *Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico de Hermosillo, Hermosillo, Son., México.*

Resumen: En este trabajo se presenta un sistema de monitoreo y control para pacientes con diabetes tipo 1. El esquema de control se basa en un control positivo el cual se logra a partir de los estados estimados por un observador. El observador logra estimar los estados de forma continua, sin importar que la señal que recibe del sistema solo está disponible en instantes de tiempo discreto. La principal ventaja del controlador es que las ganancias son elegidas tal que la ley de control solo dará valores positivos, lo que hace sea implementable. El sistema de monitoreo y control se valida primeramente en un entorno de MATLAB y posteriormente se implementa en LabVIEW con el fin de proveer una herramienta para el personal de salud para la emulación del comportamiento de este padecimiento. En ambos entornos se logra llevar al paciente a valores de normoglucemia.

Keywords: Sistema lineal, Salidas muestreadas, Control positivo, Sistema biológico, Diabetes tipo 1

1. INTRODUCCIÓN

El páncreas es un órgano del sistema endocrino encargado de la producción de insulina y una de las principales enfermedades que lo afectan es la diabetes mellitus tipo uno, la cual es una enfermedad crónica degenerativa y es la segunda causa de muerte en México Magdelaine et al. (2015). El desarrollo tecnológico para el tratamiento de la diabetes se remonta a la década de los 70, época en la que se utilizó la primera bomba de insulina.

Una década después, se desarrolló el primer sistema de monitoreo continuo de glucosa sanguínea, sin embargo, no fue hasta la década pasada en la que ambos dispositivos fueron fusionados en uno solo, creando lo que se conoce como *Sensor-Augmented Pump Therapy* (SAPT) Apablaza et al. (2017). Un páncreas artificial es un SAPT junto con un algoritmo de control que regula automáticamente el nivel de glucosa, emulando el funcionamiento natural de un páncreas Sereno et al. (2018); Kirchsteiger et al. (2011). Las ventajas de la utilización de este aparato frente a la introducción manual de insulina, se encuentra en la tranquilidad de que el usuario conocerá sus niveles de azúcares constantemente, permitiendo ser controlados sin ver fuertemente afectados ante las distintas variables que vive a diario un paciente con diabetes mellitus tipo 1 González and Cipriano (2016).

Con grandes avances en la instrumentación médica, el desarrollo de los páncreas artificiales ha provocado un gran interés a nivel mundial, con desarrollos de distintos modelos para evitar la hiperglucemia e hipoglucemia Sereno et al. (2018), o la personalidad de los algoritmos para lograr una individualización de los mismos para cada paciente Messori et al. (2016), o el desarrollo de algoritmos predictivos con factores como el ejercicio, el estrés o comidas no planeadas Toledo Enriquez et al. (2015). Todas las investigaciones en el tema tienen algo en común: el uso de simuladores de pacientes.

El diseño de simuladores de páncreas es de gran importancia en las investigaciones sobre la diabetes y los páncreas artificiales, ya que, sin la disponibilidad de éstos, las pruebas se tendrían que realizar directamente sobre los pacientes o en animales. Dichas pruebas podrían resultar no éticas, de un alto costo gracias a su alta dificultad, o incluso peligrosas, poniendo en riesgo la vida del paciente en cuestión. Por lo que, contar con un simulador confiable del páncreas, permitirá conocer el funcionamiento dinámico de este órgano ante distintas condiciones.

Los sistemas de monitoreo se basan en observadores de estado, los cuales a partir del conocimiento de señales de salida logran estimar las variables que no están disponibles. Estos han sido diseñados para sistemas industriales hasta sistemas biológicos, los cuales han sido grandes aliados

para el diseño de estrategias de control. Algunos ejemplos de observadores para sistemas biológicos se muestran en Borri et al. (2017); Guo et al. (2019). En Borri et al. (2017), se presenta un observador tipo Luenberger para el sistema no lineal para pacientes con diabetes tipo 2. Se aborda la problemática del diseño de un observador considerando que la señal de salida (glucemia) solo está disponible durante instantes de tiempo. Sin embargo, no se presenta una estrategia de control, debido a que su objetivo es la identificación de parámetros.

El objetivo del presente artículo es presentar un sistema de monitoreo y control para lograr la regulación de los niveles de glucosa en pacientes con DMTP 1, con el fin de mantener los niveles en un intervalo de normoglucemia. La medición de salida solo está disponible en instantes de tiempo (t_k) (Sección 2), lo cual es una problemática real. La principal contribución de este trabajo es el diseño de un control basado en observador de estados considerando señales en instantes de tiempo discreto. Se propone un observador que proporcione una señal continua. Este observador recibe la medición de la señal del sistema solo en instantes de tiempo, sin embargo se logra la estimación de las señales de forma continua (Sección 3). Una vez diseñado el observador se propone un control basado en observador para sistemas positivos como lo es el páncreas, este control debe asegurar que el vector de estado mantenga un rango positivo en todo momento, esto se logra mediante la limitación de las ganancias propuestas (Sección 4). El esquema de control es puesto a prueba en simulación utilizando MATLAB, posteriormente se implementa en un entorno visual (LabVIEW) fácil de utilizar por el personal médico, para brindarles una herramienta de emulación de un páncreas. Se evalúa el desempeño del sistema de monitoreo y control en presencia de una perturbación que representa la ingesta de comida, logrando que el paciente alcance niveles de normoglucemia (Sección 5), por último, se presenta la conclusión (Sección 6).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este trabajo se considera el modelo propuesto por Magdelaine et al. (2015), el cual se basa en la terapia funcional de la insulina. Su principal característica es que proporciona una adecuada predicción a largo del tiempo. Este modelo considera parámetros con un claro significado fisiológico, este modelo se presenta a continuación:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & -k_{si} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_u^2} & -\frac{2}{T_u} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_r^2} & -\frac{2}{T_r} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k_u}{V_i T_u^2} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_r}{V_B T_r^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_l - k_b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$ representa el vector de estado, los cuales son presentados en la Tabla 2 y los parámetros que lo componen se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. Descripción de variables de estado

Variable	Unidades	Descripción	Tipo
$x_1(t)$	[mg/dl]	Glucemia	Salida
$x_2(t)$	[U/dl]	Insulinemia	Estado
$x_3(t)$	[U/dl/min]	Razón de cambio de insulinemia	Estado
$x_4(t)$	[mg/dl]	Glúcidos	Estado
$x_5(t)$	[mg/dl/min]	Razón de cambio de glúcidos	Estado
$u(t)$	[U/min]	Insulina exógena	Entrada
$r(t)$	[g/min]	Carbohidratos	Entrada

Tabla 2. Definición de parámetros.

Parámetro	Unidades	Descripción
k_{si}	[mg/U/min]	Sensibilidad a insulina
k_l	[mg/dl/min]	Producción endógena glucemia
k_b	[mg/dl/min]	Consumo de glucemia
T_u	[min]	Tiempo de acción insulina
T_r	[min]	Tiempo de acción glúcidos
k_u	[min]	Ganancia estática
k_r	[-]	Ganancia estática
V_i	[dl]	Volumen de distribución insulina
V_B	[dl]	Volumen de distribución glúcidos

En Rivadeneira et al. (2019) se propone una modificación al modelo con la intención de garantizar la positividad de los estados. Dicha modificación afecta a las variables, cuya descripción pasa de ser una derivada de otras variables, a tener un significado fisiológico más claro, y una simplificación en los parámetros (Tabla 2). Dicho modelo se presenta en (2).

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & -\theta_2 & 0 & \theta_4 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\theta_3} & \frac{1}{\theta_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\theta_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\theta_5} & \frac{1}{\theta_5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_5 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\theta_3} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\theta_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ r(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde:

$$\theta_1 = k_l - k_b, \quad \theta_2 = \frac{k_u}{V_i} k_{si}, \quad \theta_3 = T_u, \\ \theta_4 = \frac{k_r}{V_B}, \quad \theta_5 = T_r$$

Tabla 3. Definición de parámetros

Parámetro	Unidades	Descripción
θ_1	[mg/dl/min]	Producción endógena menos el consumo de glucemia
θ_2	[mg/dl/U]	Factor de sensibilidad a la insulina
θ_3	[1/min]	Tiempo de transferencia de la insulina
θ_4	[1/dl]	Factor de sensibilidad a los carbohidratos
θ_5	[1/min]	Tiempo de transferencia de los carbohidratos

2.1 Modificación propuesta al modelo

Para limitar el control a los niveles de normoglucemia adecuados, se considera los siguientes puntos de equilibrio (Rivadeneira et al., 2019):

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 & \frac{k_l - k_b}{k_{si}} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde $\bar{x}$ representa los valores estables de los 3 estados. Finalmente se hace un cambio a las variables de estado de estado tal que:

$$\tilde{x} = x - \bar{x} \quad (4)$$

La representación de esto se puede apreciar en la Fig.1.

El subsistema de glucosa-insulina depende solamente de las primeras tres variables de estado del sistema (1) y de la entrada de la insulina $u(t)$. En este caso se considera $r(t) = 0$, debido a que se busca llevar al sistema a un valor de normoglucemia, por lo que los estados $x_4(t)$ y $x_5(t)$ no son considerados para este control. La variable medible del sistema es $x_1(t)$, la cual se considera solo disponible en instantes de tiempo discreto, debido a la medición de glucemia adquirida por el sensor. Por lo que el subsistema se puede representar como:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & -\theta_2 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{\theta_3} & \frac{1}{\theta_3} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\theta_3} \end{bmatrix} \tilde{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\theta_3} \end{bmatrix} u(t) \\ y(t_k) &= \tilde{x}_1(t_k) \end{aligned} \quad (5)$$

Este subsistema se puede ver de la siguiente forma:

$$\mathcal{SYS} \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t_k) = Cx(t_k) = x_1(t_k) \end{cases} \quad (6)$$

con:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & -\theta_2 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{\theta_3} & \frac{1}{\theta_3} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\theta_3} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\theta_3} \end{bmatrix} \\ C &= [1 \quad 0 \quad 0] \end{aligned} \quad (7)$$

donde $y(t_k) \in \mathbb{R}^p$ es salida del sistema disponible en instantes de tiempo, de igual forma, $0 \leq t_0 < \dots < t_k < \dots < t_\infty$, $\Delta_k = t_k - t_{k-1}$ y $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta_k = +\infty$. Se asume que existe un valor máximo del periodo muestreo denotado como $\Delta_{\bar{M}} > 0$, tal que, $0 < \Delta_m < \Delta_{\bar{M}}$, $\forall k \geq 0, \Delta_{\bar{M}}$. Este periodo es el tiempo que pasa entre la toma de una muestra a otra.

3. DISEÑO DEL OBSERVADOR

En esta sección se diseña un observador para estimar en tiempo continuo los estados del sistema (6) y poder controlarlo. Se considera que la señal de salida que alimenta al observador solo está disponible en instantes de tiempo discretos. Por lo tanto, el observador propuesto es el siguiente:

$$OBS \begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L\eta(t) \\ \dot{\eta}(t) = -CL\eta(t), t \in [t_k, t_{k+1}), k \in \mathbb{N} \\ \eta(t_k) = C\hat{x}(t_k) - y(t_k), t = t_k \\ \dot{\eta}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (8)$$

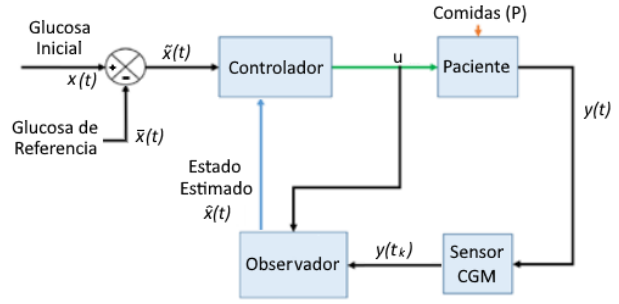


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema

donde $\hat{x}(t)$ son los estados estimados del sistema y L es la ganancia del observador, la cual debe satisfacer que $A - LC$ sea una matriz Hurwitz. Es importante el resaltar que este observador es continuo, por lo que logra la estimación de forma continua el vector de estado, basado en el uso de la función $\eta(t)$ la cual permite corregir el error de observación. Dicha función se reinicia cada instante de muestreo Δ_M , siendo $\eta(t_k)$ la condición inicial del observador para cuando $t = t_k$. Considerando esto se puede proponer el siguiente teorema.

Teorema 3.1. Considerando el sistema (6) se puede diseñar un observador de la forma (8). Entonces, existe una ganancia L , tal que $A - LC$ es Hurwitz y si el diámetro de muestreo del sistema $\Delta_{\bar{M}}$ satisface lo siguiente:

$$\Delta_{\bar{M}} < \frac{\mu}{\sigma \|L\| \|A\|} \quad (9)$$

entonces el error de observación:

$$\|\tilde{e}(t)\| \leq \sigma e^{-\eta_\theta(\Delta_M)t} \|\tilde{e}(0)\| \quad (10)$$

con

$$\eta_\theta(\Delta_M) = (a_\theta - b_\theta \Delta_M) e^{-a_\theta \Delta_M} \quad (11)$$

convergerá exponencialmente a cero donde la tasa de convergencia será dada por $\eta_\theta(\Delta_M)$.

La prueba del teorema es omitida por falta de espacio, sin embargo es fácil de probar siguiendo el procedimiento mostrado en Hernández-González et al. (2021).

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR

La dinámica Glucosa-Insulina, al igual que la gran mayoría de procesos biológicos, no deben de tomar valores negativos. Sin embargo, el modelo anterior permite que eso suceda, por lo que un controlador que garantice los objetivos de control es necesario para que la positividad de las variables del estado y entradas sean aseguradas. Para este análisis, se utiliza el siguiente control por retroalimentación de estados:

$$u = k_1 \tilde{x}_1 + k_2 (\tilde{x}_2 + \tilde{x}_3) \quad (12)$$

Los rangos de valores admisibles de k_1 y k_2 que aseguran la positividad y estabilidad del estado del sistema se presentan en la Figura 1 del trabajo presentado en (Rivadeneira et al., 2019).

5. RESULTADOS

En este apartado se presenta la validación del sistema de monitoreo y control. Primeramente se implementó en

MATLAB el control positivo basado en el observador. Se utilizó como base el paciente 1 mostrado en Abd-Al Amear et al. (2019) en el escenario de simulación compuesto por un lapso de 24 horas y perturbado por una entrada de comida a las 14 horas. La señal de salida es muestreada considerando el siguiente periodo de muestreo $\Delta_{\max} = 30$ min. De acuerdo al Teorema 1 se obtienen las ganancias para el observador:

$$L = [0.1 \quad -3.23 \times 10^{-05} \quad 6.1216 \times 10^{-09}]^T \quad (13)$$

Con la finalidad de demostrar que el control logra llevar a valores de normaglucemia al paciente, este es perturbado por la ingesta de comida que hace que el nivel de glucosa aumente. Esta perturbación tiene un valor de 15gr de carbohidratos. De acuerdo a la Figura 1 en (Rivadeneira et al., 2019), los valores seleccionados para el control positivo son los siguientes: $k_1 = 0.0025236$ y $k_2 = -4$. Las condiciones iniciales del sistema original son $x(0) = [150 \ 0.015 \ 0.005]^T$ y el observador $\hat{x}(0) = [180 \ 0.014 \ 0.001]^T$.

En la Fig. 2, se muestra el comportamiento de la Glucemia del paciente. Se muestra que el control logra llevar al paciente hacia la normaglucemia y evitando episodios no deseados de hipoglucemia. De igual forma, se muestra cómo el observador logra la estimación de la señal de salida no disponible (señal continua), a partir de la señal disponible (adquirida en instantes de tiempo discretos). El perfil de la señal de control del sistema se muestra en la Fig. 3, en donde se observa que la ley de control solo toma valores positivos, lo que es apegado a la realidad, ya que si esta ley toma valores negativos significaría que el control necesita quitar insulina del sistema lo cual no es posible. La estimación de la insulina plasmática y la insulina intersticial se muestran en las Figs. 4 y 5 respectivamente.

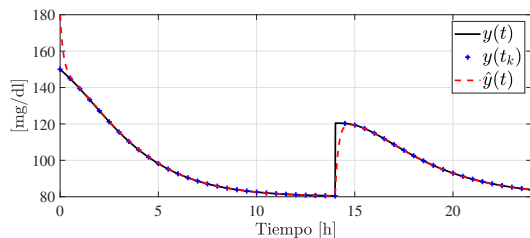


Fig. 2. Estimación de la señal de salida en forma continua

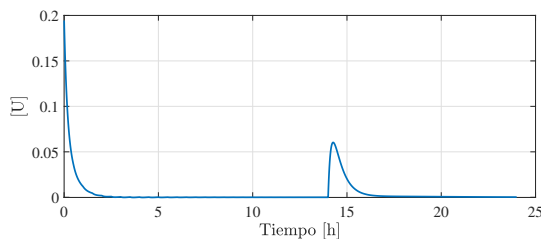


Fig. 3. Insulina aplicada al paciente

5.1 Entorno virtual

El objetivo de un simulador de paciente es validar otras herramientas de uso médico, por lo que es importante que

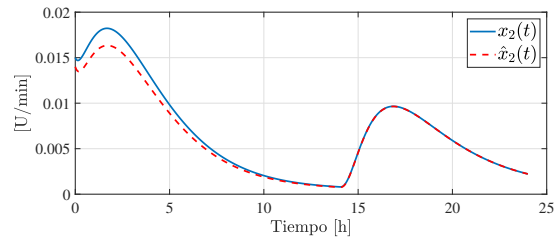


Fig. 4. Estimación de la Insulina Plasmática x_2

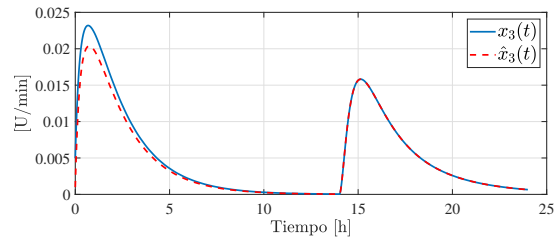


Fig. 5. Estimación de la Insulina Intersticial x_3

los sistemas obtenidos en investigaciones de esta índole sean presentados al personal de la salud en un ambiente que ellos puedan interpretar fácilmente, por lo tanto, una vez finalizada la validación del sistema en MATLAB, se optó por proceder a su implementación en el entorno virtual LabVIEW, un entorno cuyas herramientas proporcionadas permiten un entorno más amigable, gracias a su enfoque en la interfaz humano-maquina, facilitando a los usuarios del área de la salud la interpretación de los datos obtenidos. El panel frontal está diseñado para parecerse a un monitor de signos vitales, una pequeña caja en la que se muestran los datos necesarios para el diagnóstico. Se cuenta con una alarma visual cuando los niveles de glucemia excedan el umbral de 120 mg/dl , un indicador que muestra la glucemia actual; dos monitores, uno que muestra la glucemia y el otro la insulina inyectada al paciente durante un ciclo de 24 hr ; un módulo para introducir 3 comidas en diferentes tiempos, un interruptor ON/OFF para encender el sistema de monitoreo y un botón de apagado de emergencia. La Fig. 6 muestra el panel frontal del programa, el cual está pensado para emular a un monitor de signos vitales.

6. CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se aborda el diseño de un sistema de monitoreo y control para la regulación de glucosa en pacientes con diabetes tipo 1. El sistema consta de un observador que logra la estimación de los estados de forma continua incluso en presencia de mediciones en instantes de tiempo discreto. Posteriormente estos estados son utilizados por el controlador positivo para obtener una ley de control que logra llevar al paciente a valores de normaglucemia, incluso en presencia de perturbaciones. Este sistema se implementó en dos entornos; uno para validación de la estrategia (MATLAB) y otro más amigable (LabVIEW) para posibles usos del personal de la salud.

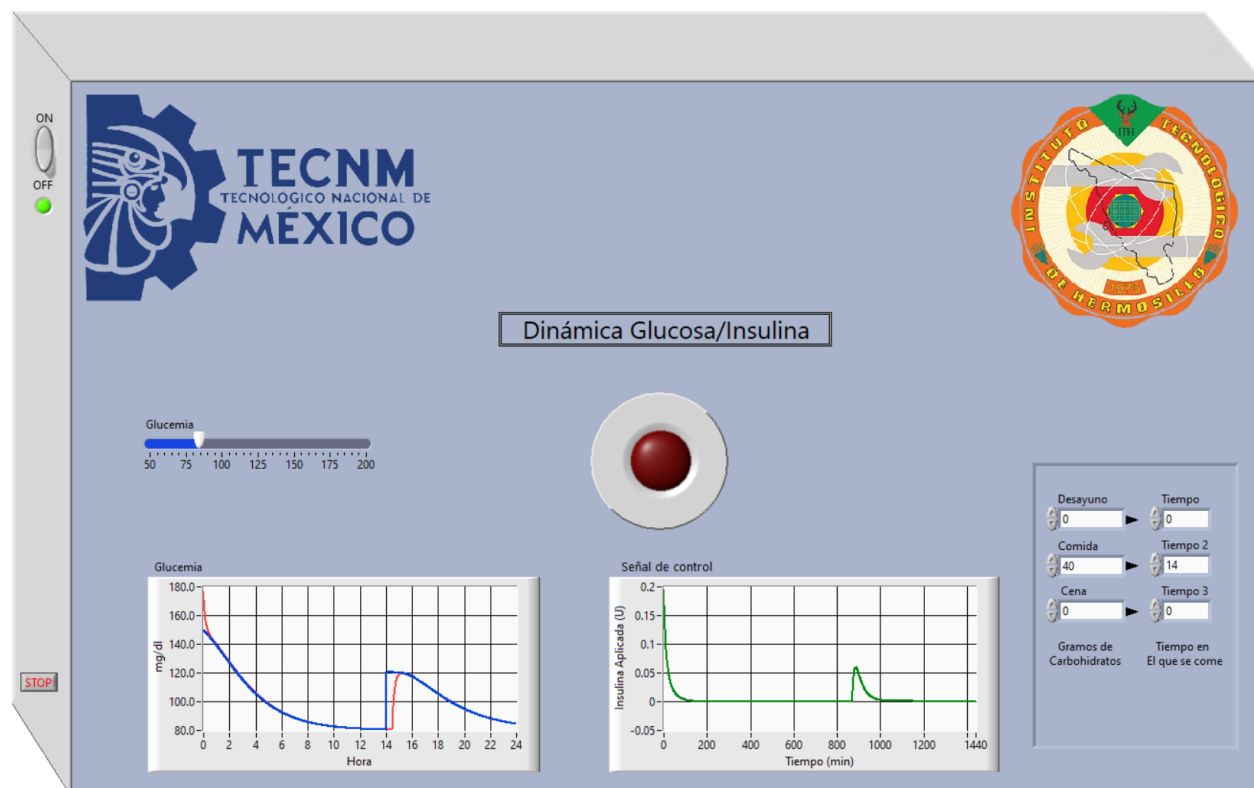


Fig. 6. Panel frontal de la implementación en LabVIEW

REFERENCIAS

- Abd-Al Ameer, B.K., Raafat, S.M., and Al-Khazraji, A. (2019). Glucose controller for artificial pancreas. *2019 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies, 3ICT 2019*, 1–6.
- Apablaza, P., Soto, N., and Codner, E. (2017). De la bomba de insulina y el monitoreo continuo de glucosa al páncreas artificial. *Revista Médica de Chile*, 145, 630–640.
- Borri, A., Cacace, F., De Gaetano, A., Germani, A., Manes, C., Palumbo, P., Panunzi, S., and Pepe, P. (2017). Luenberger-like observers for nonlinear time-delay systems with application to the artificial pancreas: The attainment of good performance. *IEEE Control Systems Magazine*, 37(4), 33–49.
- González, R. and Cipriano, A. (2016). Control difuso con estimador de estados para sistemas de páncreas artificial. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 13, 393–402.
- Guo, J., Zhao, Z., Shi, F., Wang, R., and Li, S. (2019). Observer-based synchronization control for coronary artery time-delay chaotic system. *IEEE Access*, 7, 51222–51235.
- Hernández-González, O., Ramírez-Rasgado, F., Astorga-Zaragoza, C., Guerrero-Sánchez, M., Valencia-Palomo, G., and Rodríguez-Mata, A. (2021). Observer for nonlinear systems with sampled measurements: Application to the friction factor estimation of a pipeline. *IET Control Theory & Applications*, 15(3), 432–445.
- Kirchsteiger, H., Castillo Estrada, G., Pölzer, S., Renard, E., and Del Re, L. (2011). Estimating interval process models for type 1 diabetes for robust control design. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 44, 11761–11766.
- Magdelaine, N., Chaillous, L., Guilhem, I., Poirier, J.Y., Krempf, M., Moog, C.H., and Le Carpentier, E. (2015). A long-term model of the glucose-insulin dynamics of type 1 diabetes. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62, 1546–1552.
- Messori, M., Toffanin, C., Del Favero, S., De Nicolao, G., Cobelli, C., and Magni, L. (2016). Model individualization for artificial pancreas. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 171, 133–140.
- Rivadeneira, P.S., Sereno, J.E., and Caicedo, M.A. (2019). Nuevas estrategias de control glucémico en pacientes con diabetes mellitus tipo 1. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 16, 238–248.
- Sereno, J., Caicedo, M., and Rivadeneira, P. (2018). Artificial pancreas: glycemic control strategies for avoiding hypoglycemia. *DYNA*, 85(207), 187–207.
- Toledo Enriquez, D., González Santes, A., Toledano Hernández, A., Iglesias Benitez, A., Martínez-Casado, J., and Gónzales Aguilera, D. (2015). Controlador predictivo para la infusión subcutánea de insulina en un páncreas artificial. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 9(2), 81–98.

Control por Rechazo Activo de Perturbaciones de un Sistema Pendular mediante Simulink y NXP FRDM-K64F

L. García-Moreno * J.F. Guerrero-Castellanos *
A. Hernández-Méndez ** G.A. Muñoz-Hernández *

* Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México
(e-mail: leonardo.garciam@alumno.buap.mx,
fermi.guerrero@correo.buap.mx, germanardul.munoz@correo.buap.mx).
** Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca, México (e-mail:
arturohm555@gmail.com).

Resumen: Este trabajo se presenta de una manera pragmática el diseño, simulación e implementación de la técnica ADRC aplicado a un sistema robótico pendular. Primeramente se presenta el modelo matemático del sistema, el cual contiene la dinámica del motor de corriente directa. Así entonces, la metodología ADRC es aplicada, dando como resultado un controlador dinámico compuesto por un observador de estado extendido (ESO) y una ley de control conteniendo una acción de retroalimentación y una de precompensación. Una simulación del sistema en lazo cerrado es llevada a cabo mediante MATLAB/Simulink. En seguida la técnica *Hardware In the Loop (HIL)* es usada para implementar el controlador en la tarjeta de desarrollo NXP FRDM-K64F. Resultados experimentales muestran el correcto funcionamiento del sistema en lazo cerrado para tareas de regulación y seguimiento, tanto de velocidad como de posición angular.

Keywords: Sistema pendular, rechazo de perturbaciones, Tarjeta FRDM-K64F, Técnica HIL.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Sistemas robóticos y Hardware-In-the-Loop (HIL)

El diseño, el modelado, la simulación, el control, así como el análisis de los resultados de un desarrollo robótico dependen de sus componentes y sus características tecnológicas. La arquitectura de un robot se puede dividir en diferentes niveles: mecánica, electrónica de potencia, control de movimiento e interfaz de programación.

Respecto a la unidad de control, los algoritmos se implementan generalmente en microprocesadores de altas prestaciones o arquitecturas dedicadas basadas en procesadores digitales de señales DSP (del inglés Digital Signal Processor) para realizar los cálculos matemáticos necesarios en la planificación de trayectorias (Saltaren et al. (2017)). Sin embargo, durante el proceso de diseño e implementación de algoritmos de control, la técnica de hardware en el lazo conocida como hardware-in-the-loop (HIL) es una técnica usada para el desarrollo y comprobación de sistemas embebidos en tiempo real complejos. La técnica HIL constituye una plataforma efectiva porque incluye toda la complejidad de la planta que controla el sistema embebido. Esta metodología sirve de interfaz entre el modelo de planta y el sistema integrado bajo prueba. El valor de cada sensor está controlado por el modelo de planta y es leído por el sistema embebido. Del mismo modo,

el sistema embebido bajo prueba ejecuta el algoritmo de control por medio de las señales de los actuadores. En los últimos años se ha utilizado HIL principalmente para la creación rápida de prototipos, pruebas y optimización de sistemas. Permite probar escenarios críticos sin comprometer el hardware o las personas, los escenarios son más fáciles de configurar en un entorno virtual que en un entorno real, si algunas partes de un sistema son demasiado complejas para modelarlas se pueden ser reemplazadas dentro de la simulación por el hardware real, el hardware real integrado puede acelerar toda la simulación, el hardware y el software de la ECU se pueden probar en una etapa temprana de desarrollo, entre otras ventajas (Köhler (2013), Isermann (2005)).

Actualmente existe una amplia oferta de soluciones comerciales para desarrollar sistemas de simulación HIL como dSPACE (dSPACE GmbH (2021)). Sin embargo, el costo y el tamaño, lo hace prohibitivo en muchas aplicaciones.

1.2 Control por rechazo activo de perturbaciones

Debido a las exigencias de un control preciso en gran cantidad de aplicaciones, con una velocidad de respuesta rápida, pero sobre todo, la capacidad de adaptarse a los cambios del entorno, es necesario ir más allá de algunas técnicas clásicas como los controladores PID. La técnica de control por rechazo activo de perturbaciones

ADRC (por sus siglas en inglés, Active Disturbances Rejection Control) ha atraído la atención de la comunidad de control automático en los últimos años, ya que se basa en la capacidad de estimar en línea, mediante un observador de estado extendido (ESO), la parte de la dinámica desconocida del sistema a controlar, así como todos los efectos externos adversos, para posteriormente cancelarlos mediante una apropiada ley de control (Sira-Ramírez et al. (2015)). Entre las características técnicas y conceptuales del ADRC que se mejoran con respecto al PID son: una ecuación diferencial simple como generador de perfiles transitorios, un TD tolerante al ruido, la capacidad de control tanto lineal como no lineal y la estimación, así como el rechazo de la perturbación total. Dichas características forman un control que no depende de un modelo dinámico preciso de la planta. El ADRC es un competidor potencial del PID en la industria en términos de precisión, rechazo de perturbaciones y fácil implementación (Sira-Ramírez et al. (2017), Xia and Fu (2013)).

El ADRC consiste en tres partes: un Diferenciador de trayectoria (TD), un Observador de Estado Extendido (ESO) y una ley de control (e.g. "Fig. 1").

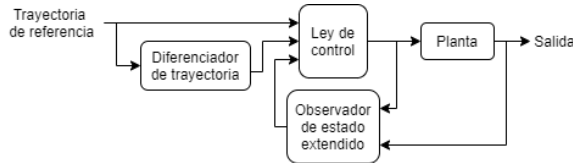


Fig. 1. Estructura general de un ADRC.

- *Diferenciador de trayectoria (TD)*. Según la entrada de referencia y la restricción del objeto controlado, TD organizará la transición, obtendrá una señal de entrada suave y dará la derivada de cada orden del proceso de transición.

- *Observador de estado extendido (ESO)*. Es el núcleo del ADRC. Ya que generalmente suele ser difícil obtener el modelo completo de la planta, por lo que suele ser aproximado. El ESO contiene generalmente tres partes: la dinámica modelada, la dinámica incierta y la perturbación. Puede obtener el valor estimado de cada variable de estado, estimar la cantidad de modelo de incertidumbre en tiempo real y perturbación externa y compensar en la retroalimentación.

- *Ley de control*. Es una combinación no lineal de las variables de estado estimadas producidas por TD y ESO. TD tiene la capacidad de rastrear la señal de referencia de entrada dada con una respuesta rápida y sin sobreimpulso.

1.3 Contribución y organización del trabajo

La intención del presente trabajo, es mostrar de manera pragmática el diseño e implementación de la técnica ADRC sobre un sistema de naturaleza no lineal, a saber,

un sistema pendular, quien representa la parte esencial del modelo y control de los robots manipuladores. Para ello se lleva a cabo el proceso de modelado matemático, diseño del control, simulación numérica e implementación. Para la implementación, se utiliza la técnica HIL, la cual permite de una manera rápida la puesta en marcha y la sintonización del ADRC. Para ello se utiliza una arquitectura de sistema embebido basada en el microprocesador ARM, a saber, la tarjeta NXP FRDM-K64F la cual es de mediano poder computacional y bajo costo. Además, el entorno MATLAB/Simulink es usado para la simulación y la interfase. El resto del trabajo está organizado de la siguiente forma. En la sección 2 se presenta el modelo detallado del sistema. El diseño del ADRC es presentado en la sección 3. La sección 4 está dedicada a la presentación de la plataforma experimental y a la descripción de los resultados experimentales. Las conclusiones son dadas en la sección 5.

2. MODELO DEL SISTEMA

El sistema propuesto para este trabajo péndulo acoplado al eje de un motor de CD como el que se muestra en la Fig. 2. Aquí, el ángulo de rotación formado por el movimiento del péndulo se denota por q .

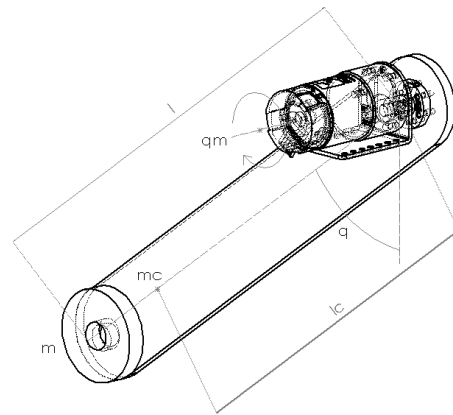


Fig. 2. Sistema pendular.

2.1 Modelo de un motor de CD

El modelo matemático de un motor de CD es:

$$\begin{cases} \tau_m = K_a i_a \\ v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_b \\ e_b = K_b q_m \\ q_m = r q \\ J_m \ddot{q}_m = \tau_m - B_m \dot{q}_m - \frac{\tau}{r} \end{cases} \quad (1)$$

donde los parámetros se describen en la Tabla 1 (MIEL (2020), Saltaren et al. (2017)).

Las máquinas eléctricas de CD, debido a que son sistemas electromecánicos, estos tienen dos dinámicas diferentes, uno eléctrico y uno mecánico, los cuales a su vez tienen

Tabla 1. Definición de parámetros del sistema pendular

Parámetro	Descripción
q	Posición angular del eje de carga [rad]
q_m	Posición angular del eje del motor [rad]
r	Relación de reducción de la transmisión mecánica
τ_m	Par en el eje del motor [Nm]
τ	Par inducido [Nm]
K_a	Constante de par del motor [Nm/A]
R_a	Resistencia de armadura del motor [Ω]
L_a	Inductancia de armadura del motor [H]
K_b	Constante de fuerza contra electromotriz [Vs/rad]
i_a	Corriente de armadura del motor [A]
e_b	Fuerza contra electromotriz del motor [V]
v_a	Tensión de armadura del motor [V]
J_m	Momento de inercia del motor y reductor [Kgm ²]
B_m	Par del fricción del motor y reductor [Nm]
J_L	Momento de inercia del péndulo [Kgm ²]
B_L	Par del fricción del péndulo [Nm]
m	Masa del péndulo [Kg]
l_c	Distancia al centro de masa del péndulo [m]
g	Fuerza de gravedad [m/s ²]

diferente escala de tiempo. Por lo que se puede ver la parte eléctrica como un sistema instantáneo y el término $L_a \frac{di_a}{dt}$ se puede igualar a cero.

De este modo, el sistema se convierte en algebraico. Donde expresando en términos de q y despejando $\ddot{q}$ se tiene:

$$\ddot{q} = -\frac{K_a K_b}{J_m R_a} \dot{q} - \frac{B_m}{J_m} \dot{q} - \frac{\tau}{J_m r^2} + \frac{K_a}{J_m r R_a} v_a \quad (2)$$

2.2 Modelo dinámico de un péndulo

El siguiente modelo corresponde al del eslabón (o péndulo), dicho modelo puede obtenerse a partir de la mecánica newtoniana (MIEL (2020), Saltaren et al. (2017)), estableciendo el balance de los momentos que actúan sobre el sistema, utilizando la segunda ley de Newton:

$$J_L \ddot{q} + B_L \dot{q} + k_L \sin(q) = \tau \quad (3)$$

donde $k_L = m l_c g$.

2.3 Modelo del sistema pendular

Al sustituir la ecuación 3 en 2, considerando un par de carga externo τ_L y haciendo $\bar{J} = \frac{J_L}{r^2} + J_m$ el sistema queda como:

$$\bar{J} \ddot{q} + B_m \dot{q} + \frac{B_L}{r^2} \dot{q} + \frac{K_a K_b}{R_a} + \frac{\tau_L}{r^2} + \frac{k_L}{r^2} \sin(q) = \frac{K_a}{r R_a} v_a \quad (4)$$

Agrupando términos se tiene es modelo del sistema pendular como:

$$\ddot{q} = -\frac{\bar{B}}{\bar{J}} \dot{q} - \frac{k_L}{\bar{J} r^2} \sin(q) - \frac{\tau_L}{\bar{J} r^2} + \frac{k_a}{\bar{J} r R_a} v_a \quad (5)$$

donde $\bar{B} = B_m + \frac{B_L}{r^2} + \frac{K_a K_b}{R_a}$.

3. PROPUESTA DE CONTROL POR RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES

En esta sección se aborda el diseño de la propuesta de control, tanto de velocidad, como de posición para el

sistema pendular descrito en la ecuación 5. Donde se asume que $\zeta = -\frac{\bar{B}}{\bar{J}} \dot{q} - \frac{k_L}{\bar{J} r^2} \sin(q) - \frac{\tau_L}{\bar{J} r^2}$ contiene la dinámica de las perturbaciones tanto endógenas como exógenas desconocidas. Por otro lado, simplificando $\alpha = \frac{K_a}{\bar{J} r R_a}$ el modelo (5) se reduce a:

$$\ddot{q} = \alpha v + \zeta \quad (6)$$

donde v es la entrada de control y, como se ha comentado, ζ es desconocido e incluye el par de carga. Naturalmente, el lazo interno de control propuesto correspondiente a (6) es:

$$v = \frac{u - \zeta}{\alpha} \quad (7)$$

donde u es la señal de control. Para su implementación, es necesario estimar el valor de ζ y determinar la señal u dependiendo si se trata de un control de seguimiento o regulación. El diseño del observador ESO y la descripción de u se muestra a continuación.

3.1 Observador de estado extendido (ESO)

De acuerdo con el diseño del controlador ADRC, es necesario diseñar un observador de estado extendido (ESO) para la estimación de perturbaciones (ζ). El diseño del observador es a partir del modelo dinámico del sistema (6).

Se reescribe el sistema dinámico (6) en donde $x_1 = q$ y $x_2 = \dot{q}$, de la siguiente forma:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + l_3 (x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \alpha v_a + z_1 + l_2 (x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{z}_1 = z_2 + l_1 (x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{z}_2 = l_0 (x_1 - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (8)$$

donde $\hat{x}_1$ $\hat{x}_2$ es la estimación de la posición angular y su derivada temporal (velocidad angular), z_1 y z_2 es la estimación de ζ y su derivada temporal respectivamente, l_0 , l_1 , l_2 y l_3 son ganancias definidas positivas constantes del observador. Éstas ganancias se sintonizan utilizando un polinomio Hurwitz de cuarto orden, dado de la siguiente manera:

$$P_o(s) = (s^2 + 2\omega_n \xi s + \omega_n^2)^2 \quad (9)$$

De tal forma que las ganancias del observador de estado extendido son como sigue: $l_3 = 4\omega_n$, $l_2 = 2\omega_n^2 (1 + 2\xi^2)$, $l_1 = 4\omega_n^3 \xi$ y $l_0 = \omega_n^4$.

Como se puede observar, la ventaja de este observador, no sólo es la estimación de las perturbaciones desconocidas, si no que también se estima la velocidad angular a partir de la medición de la posición angular. De otro modo, una solución fácil es emplear un módulo de derivada temporal, lo cual produce efectos no deseados relacionados con el ruido de la medición.

3.2 Control de velocidad angular

La dinámica impuesta u , determinar si el esquema de control regula la velocidad o la posición angular del péndulo. En el caso de un control de velocidad angular, es necesario incluir el error de velocidad medida con respecto

a la velocidad estimada. A continuación se describe el esquema de control propuesto de velocidad angular, en el cual se acopla la información obtenida del ESO a la ley de control.

Ley de control: La información obtenida del ESO diseñado en el apartado anterior, se incluye en la ley de control (7) de la siguiente forma:

$$v = \frac{u - z_1}{\alpha} \quad (10)$$

donde z_1 es el valor estimado de las perturbaciones desconocidas, y la dinámica impuesta u se define como:

$$u = -k(\dot{x}_2 - x^d) \quad \text{regulación} \quad (11)$$

$$u = \ddot{x}^d - k(\dot{x}_2 - x^d) \quad \text{seguimiento} \quad (12)$$

donde x^d es la velocidad angular de referencia y k es una ganancia constante positiva del controlador.

En las ecuaciones 11 y 12 el término $-k(\dot{x}_2 - x^d)$ es la retroalimentación (o *Feedback*), mientras que el término $\ddot{x}^d$ es la pre-compensación (o *Feedforward*).

3.3 Control de posición angular

Al igual que en el caso anterior del control de velocidad angular, es necesario utilizar la información estimada por el ESO previamente diseñado (8). El diseño de este esquema de control propuesto se detalla a continuación.

Ley de control: La Ley de control utilizada sigue siendo la propuesta en el control de velocidad angular (7), en donde se incluye el término estimado de perturbación. Sin embargo, en la dinámica impuesta u se incluye el error de posición angular de la siguiente forma:

$$u = -k_1(\dot{x}_1 - x^d) - k_2(\dot{x}_2 - \dot{x}^d) \quad \text{regulación} \quad (13)$$

$$u = \ddot{x}^d - k_1(\dot{x}_1 - x^d) - k_2(\dot{x}_2 - \dot{x}^d) \quad \text{seguimiento} \quad (14)$$

donde x^d es la posición angular de referencia, y k_1 y k_2 son ganancias constantes positivas del controlador.

En las ecuaciones 13 y 14 el término $-k_1(\dot{x}_1 - x^d) - k_2(\dot{x}_2 - \dot{x}^d)$ es la retroalimentación (o *Feedback*), mientras que el término $\ddot{x}^d$ es la pre-compensación (o *Feedforward*).

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A continuación se presenta el desarrollo experimental, el cual consta de la identificación de los parámetros de la planta, las características del sistema de cómputo implementado y sus herramientas de desarrollo, así como los resultados obtenidos.

4.1 Descripción del sistema pendular

En esta subsección se describen las especificaciones del sistema pendular a implementar, es decir, los parámetros del motor, así como las propiedades físicas del péndulo.

Motor de CD: Se usó un motor de CD con escobillas de 12V con una reducción de 50:1 y con un codificador de 64 pulsos por revolución en el eje de motor. El fabricante, Pololu, proporciona los datos de velocidad y corriente en modo de operación sin carga, así como la corriente y par en el modo de bloqueo. A partir de esos datos y de los dibujos técnicos se identificaron los parámetros del motor, los cuales se describen en la Tabla 2.

Eslabón: El péndulo se acopló al eje de motor de CD por medio de un *hub* y se fabricó por corte láser con MDF. Los parámetros del péndulo resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del sistema pendular

Parámetro	Valor
R_a	2Ω
L_a	$0.0023 H$
K_a	$0.3923 Nm/A$
K_b	$0.0115 Vs/rad$
B_m	$1.1238e-04 Nms/rad$
J_m	$8.1225e-06 Kgm^2$
J_L	$2.03474e-3 Kgm^2$
k_L	$0.099459 Kgm^2/s^2$

4.2 Descripción del sistema de cómputo e interfaz

En seguida se describirá el sistema de cómputo utilizado, así como herramientas de software e interfaz de comunicación.

Tarjeta de desarrollo: La tarjeta de desarrollo que se usó es la NXP FRDM-K64F, utiliza un MCU Kinetis K64F de bajo consumo con un núcleo ARM Cortex-M4 de 32-bits con instrucciones DSP y unidad de punto flotante (FPU). Se ejecuta hasta 120MHz.

Herramienta de software e interfaz: Esta tarjeta cuenta con múltiples herramientas de software, sin embargo, para aplicaciones de control automático, MATLAB/Simulink cuenta con el *Simulink® Coder™ Support Package for NXP™ FRDM-K64F Board*, lo cual permite crear y ejecutar modelos de Simulink en la tarjeta. El paquete de soporte incluye una biblioteca de bloques Simulink para configurar y acceder a los periféricos e interfaces de comunicación NXP FRDM-K64F.

Por último, cuando se está creando un prototipo y desarrollando un algoritmo, es útil monitorear y ajustar el algoritmo mientras se ejecuta en hardware (e.g. "Fig. 3") Los efectos de la actividad de ajuste de parámetros se pueden monitorear viendo las señales del algoritmo en osciloscopios, displays o en el inspector de datos en Simulink.

5. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de los cuatro casos de control, es decir: 1) control de velocidad en regulación, 2) control de velocidad en seguimiento, 3)

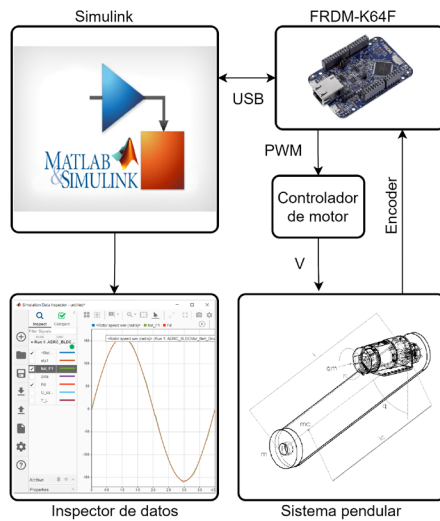


Fig. 3. Diagrama de bloques

control de posición en regulación y 4) control de posición en seguimiento. Los resultados se presentan haciendo una comparativa entre el modelo en simulación y la implementación con el sistema pendular en físico. Por último, adjuntan los enlaces de los vídeos que para apreciar el funcionamiento de los cuatro casos de control.

En los cuatro casos no se aplicó como perturbación ningún par externo, sólo el generado por la inercia del péndulo y la dinámica desconocida del motor.

5.1 Control de velocidad:

Se sintonizaron las ganancias del observador con $\omega_n = 50$ y $\xi = 5$.

Control de velocidad en regulación: En las Fig. 4 y 5 se presentan los resultados del control de velocidad en regulación, donde la señal de referencia es una función definida por partes donde $x_d = 5$ para $t < 10$, $x_d = -5$ para $10 \leq t < 20$ y $x_d = 0$ para $20 \leq t < 30$.

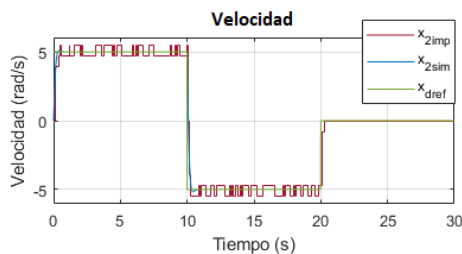


Fig. 4. Control de velocidad: regulación (Estado medido x_2).

Control de velocidad en seguimiento: En las Fig. 6 y 7 se presentan los resultados del control de velocidad en seguimiento, donde la señal de referencia es una función

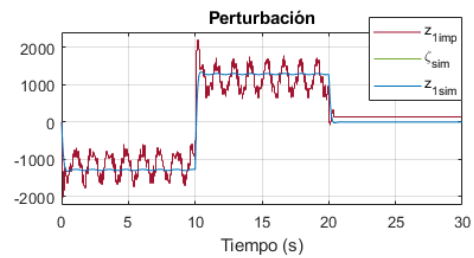


Fig. 5. Control de velocidad: regulación (Perturbación).

definida por partes donde x_d es una función sinusoidal con un periodo de 8s y una amplitud de 5 para $t < 24$ y $x_d = 0$ para $24 \leq t < 30$.

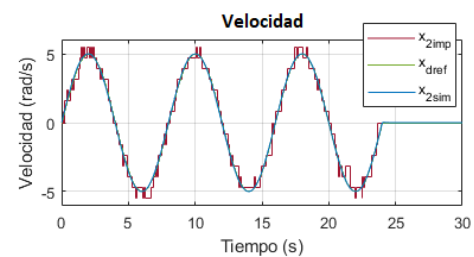


Fig. 6. Control de velocidad: seguimiento (Estado medido x_2).

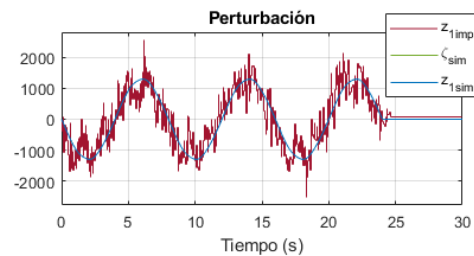


Fig. 7. Control de velocidad: seguimiento (Perturbación).

5.2 Control de posición:

Se sintonizó el observador con $\omega_n = 250$ y $\xi = 1$.

Control de posición en regulación: En las Fig. 8 a 9 se presentan los resultados del control de posición en regulación, donde la señal de referencia es una función definida por partes donde $x_d = \pi$ para $t < 10$, $x_d = -\pi/2$ para $10 \leq t < 20$ y $x_d = 0$ para $20 \leq t < 30$.

Control de posición en seguimiento: En las Fig. 10 a 11 se presentan los resultados del control de posición en seguimiento, donde la señal de referencia es una función definida por partes donde x_d es una función sinusoidal con un periodo de 8s y una amplitud de 6 para $t < 24$ y $x_d = 0$ para $24 \leq t < 30$.

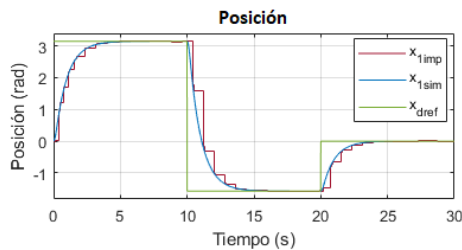


Fig. 8. Control de posición: regulación (Estado medido x_1).

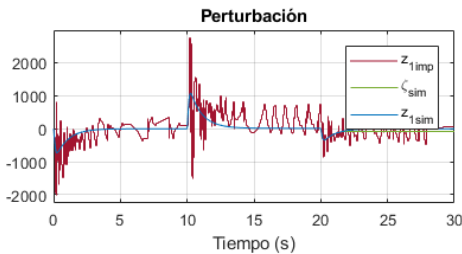


Fig. 9. Control de posición: regulación (Perturbación).

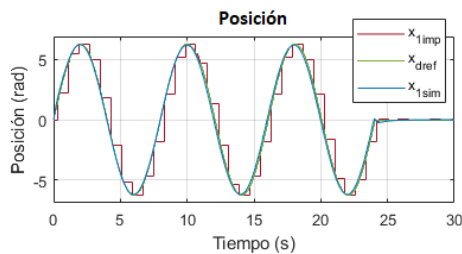


Fig. 10. Control de posición: seguimiento (Estado medido x_1).

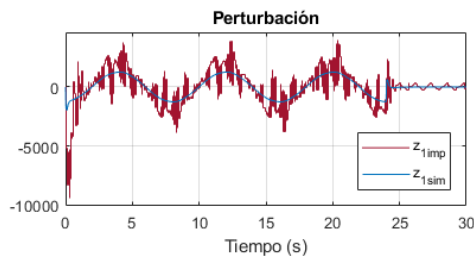


Fig. 11. Control de posición: seguimiento (Perturbación).

5.3 Enlaces de los vídeos:

Control de velocidad en regulación: <https://www.youtube.com/watch?v=GYUe3ebNf10&feature=youtu.be>

Control de velocidad en seguimiento: <https://www.youtube.com/watch?v=coo2BR4TBq0&feature=youtu.be>

Control de posición en regulación: <https://www.youtube.com/watch?v=FCD-cCJEXGA&feature=youtu.be>

Control de posición en seguimiento: <https://www.youtube.com/watch?v=9I-YFVepKg8&feature=youtu.be>

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se demostró que la estrategia de control ADRC es prácticamente independiente del modelo del sistema ya que sólo se necesitan pocos parámetros de la planta, en el caso de este sistema esos parámetros son fáciles de identificar. Además la técnica es robusta a perturbaciones externas como es la fuerza de gravedad.

Respecto a la implementación, el uso de la técnica HIL con el "Simulink Coder Support Package for NXP FRDM-K64F Board" facilita y sobretodo agiliza pasar de la simulación a la implementación, así como la adquisición de datos para poder visualizar los datos en una gráfica. Sin embargo, la tarjeta de desarrollo limita trabajar con un "step size" de 0.001s.

Por último, la arquitectura del procesador propuesto es capaz de implementar la estrategia de control aplicada a un sistema robótico, sobretodo porque reduce el tiempo de cómputo gracias a los recursos con los que cuenta, como un DSP integrado, una unidad de punto flotante (FPU) de precisión simple. Por otro lado, posee, un módulo Flex-Timer con características especiales dedicadas a las aplicaciones de control de motores. Con este módulo se pueden decodificar las señales del codificador de cuadratura y generar la modulación de ancho de pulso de seis señales para controlar motores eléctricos trifásicos.

REFERENCES

- dSPACE GmbH (2021).
- Isermann, R. (2005). *Mechatronics Systems Fundamentals*. Springer, Germany.
- Köhler, C. (2013). *Enhancing Embedded Systems Simulation: A Chip-Hardware-in-the-Loop Simulation Framework*. Springer, Germany.
- MIEL (2020). Robótica y mecatrónica. *Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*.
- Saltaren, R., Puglisi, L.J., Sabater, J.M., and Yime, E. (2017). *Robótica Aplicada: Análisis y Diseño de robots paralelos y seriales con Matlab*. Dextra, Madrid.
- Sira-Ramírez, H., Linares-Flores, J., Luviano-Juárez, A., and Cortés-Romero, J. (2015). Ultramodelos globales y el control por rechazo activo de perturbaciones en sistemas no lineales diferencialmente planos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial {RIAI}*, 12(2), 133-144.
- Sira-Ramírez, H., Luviano-Juárez, A., Ramírez-Neria, M., and Zurita-Bustamante, E. (2017). Active disturbance rejection control of dynamic systems. *Butterworth-Heinemann*.
- Xia, Y. and Fu, M. (2013). Overview of adrc. in: *Compound control methodology for flight vehicles*. In *Control and Information Sciences*, volume 438. Springer, Berlin.

Modelado Hidráulico del Sistema Circulatorio para Propósitos Didácticos

Cecilia-G. Díaz-Valerio * Carlos-M. Astorga-Zaragoza *
Juan Reyes-Reyes * María-N. González-Cruz **
Carlos-A. Daza-Merino ** Aldo-R. Sartorius-Castellanos ***

* *Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos.*

** *Universidad Tecnológica de Tehuacán, Puebla.*

*** *Instituto Tecnológico de Minatitlán, Veracruz.*

Abstract: In this paper the design, implementation and modeling of an emulator of the hydraulics of the circulatory system is presented. The emulator consists of six interconnected tanks (representing the atria, ventricles, the body and lungs), four valves (representing the mitral, tricuspid, aortic and pulmonary valves) and two pumps for transportation of the liquid (representing blood) from body towards the heart and from heart towards the lungs. A microcontroller-based electronic system is implemented to synchronize the driving pumps and the valves. Finally, a simple mathematical model is developed in order to show how this emulator can be useful for the analysis and design of control algorithms. The main contribution of this development is the possibility for multi-purpose applications in different areas such as exhibitions for children, explanation of heart functioning and diseases, training of medical assistants and students, mechatronics training, control engineering practice and so on.

Keywords: Modelado, sistema circulatorio, sistema cardiovascular, corazón, hidráulica.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema circulatorio es el circuito por el cual viaja la sangre hacia los diferentes tejidos que componen el organismo. Pero en diversas ocasiones el sistema circulatorio puede verse afectado por diversas enfermedades provocando serias consecuencias en todo el organismo. Estas enfermedades son originadas a causa de un sedentarismo y por una dieta con alta densidad calórica, lo que origina que sea la causa principal de un índice de masa corporal elevado, el cual se interpreta como el principal factor de riesgo para numerosas enfermedades no transmisibles tales como obesidad, hipertensión, diabetes, enfermedad renal crónica, enfermedad vascular cerebral, enfermedades del sistema cardiovascular, circulatorio y digestivo, entre otras. A pesar de que este tipo de enfermedades se están desarrollando de manera acelerada, son una de las causas que menos se atienden, sobre todo en los países de medianos y bajos ingresos. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), estos países tienen el 75 por ciento de la población hipertensa del mundo y tienen los índices más bajos de conocimiento sobre la enfermedad, tratamiento, e incluso el control adecuado, esto debido a una gran falta de información. Por consiguiente, se debe fomentar una cultura de salud, el ejercicio en la escuela, museos de la ciencia, programas de radio, televisión, juegos interactivos, entre otros, de esta manera, las enfermedades causadas por una alimentación deficiente y el sedentarismo podrían reducirse considerablemente. Dentro de estas enfermedades, las que afectan al sistema cardiovascular son una de las principales causas de mortandad a nivel mundial Anderson

et al. (1991); Sowers et al. (2001).

El sistema cardiovascular está compuesto por el corazón y los vasos sanguíneos: una red de venas, arterias y capilares que suministran oxígeno desde los pulmones a los tejidos de todo el cuerpo a través de la sangre gracias al bombeo del corazón. De esta manera, el órgano principal del sistema cardiovascular es el corazón, el cual ha sido objeto de estudio desde que el hombre ha tratado de explicarse la anatomía de los seres vivos de su entorno, incluido él mismo. La tarea principal del corazón en el sistema cardiovascular es distribuir la sangre a todo el organismo del cual forma parte.

Ahora, desde el punto de vista médico, es importante comprender la forma en que el corazón funciona esto con la intención de poder supervisar el estado de salud del mismo con la finalidad de actuar de manera preventiva o correctiva y preservar la vitalidad en la medida de lo posible. Por tanto, el estudio de su funcionamiento puede llevarse a cabo desde diferentes perspectivas incluyendo la biología, la mecánica, la eléctrica, la hidráulica, entre otras. De esta forma, se ha desarrollado suficiente tecnología para un vasto número de aplicaciones tendientes a la medición de variables que describen el comportamiento del corazón Reyes-Aguirre et al. (2012); Fanelli et al. (2011), a la intervención quirúrgica, a la simulación del comportamiento, al modelado matemático, al reemplazo mecánico de partes, etc. Por ejemplo, en Fent et al. (2016) se presenta un control aleatorio que compara el uso de un simulador de electrocardiograma con la adquisición tradi-

cional. Posteriormente, en Zhang et al. (2009) los autores introducen el desarrollo de un prototipo de plataforma biofeedback de respiración portátil, de esta manera, realizan una evaluación preliminar de sus efectos en el sistema cardiovascular. Después, en Schwid (1988) se utiliza una computadora personal con un convertidor digital-analógico como simulador de un electrocardiograma. En este, los autores presentan un prototipo de entrenamiento para la reparación de una de las válvulas del corazón. El prototipo se basa en el uso de un corazón palpitante porcino Gollmann-Tepeköylü et al. (2018). Los autores en Cho et al. (2016) desarrollan un simulador de entrenamiento que genera señales de electrocardiograma a través de un microcontrolador.

Es de mencionar que, el corazón esta compuesto por cuatro cavidades. Las dos cavidades superiores se denominan aurícula izquierda y aurícula derecha y las dos cavidades inferiores se denominan ventrículo izquierdo y ventrículo derecho. De igual forma, esta compuesto por una pared muscular denominada tabique el cual separa las aurículas izquierda y derecha y los ventrículos izquierdo y derecho (ver Fig. 1). Las válvulas situadas en los orificios que comunican las aurículas y los ventrículos (válvulas tricúspide y mitral), tienen una morfología diferente a las válvulas situadas entre los ventrículos y las arterias pulmonar y aorta, (válvulas pulmonar y aórtica). Todas las válvulas cumplen con la misma función: permiten el flujo de sangre en una sola dirección. Después de eso, evitan el reflujo de la sangre.

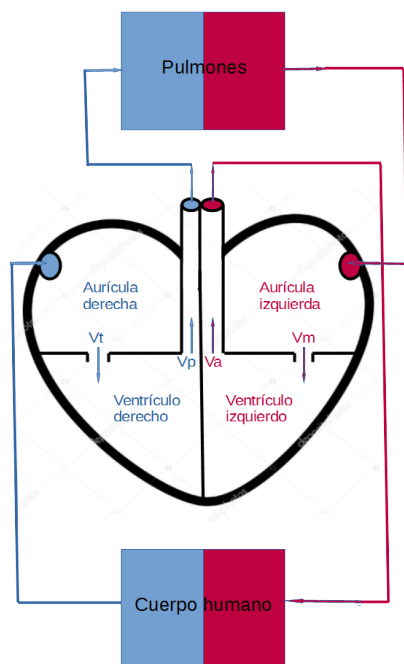


Fig. 1. Representación idealizada del sistema cardiovascular Díaz-Valerio et al. (2020).

De manera breve, el circuito hidráulico en el que la sangre recorre por el sistema cardiovascular se desarrolla de la siguiente manera:

- 1.- La sangre rica en oxígeno proveniente de los pulmones ingresa a la aurícula izquierda del corazón.
- 2.- La sangre pasa al ventrículo izquierdo a través de la válvula mitral (etiquetada como Vm en la Fig. 1).
- 3.- La sangre rica en oxígeno es expulsada del corazón, a través de la válvula aórtica (etiquetada como Va en la Fig. 1), hacia el cuerpo humano, donde gradualmente pierde oxígeno.
- 4.- La sangre pobre en oxígeno regresa al corazón, ingresando a la aurícula derecha.
- 5.- La sangre pasa al ventrículo derecho a través de la válvula tricúspide (etiquetada como Vt en la Fig. 1).
- 6.- La sangre pobre en oxígeno es expulsada del corazón, a través de la válvula pulmonar (etiquetada como Vp en la Fig. 1), hacia los pulmones, donde se renueva en oxígeno.
- 7.- Se repite el ciclo.

Anteriormente, en Díaz-Valerio et al. (2020) se publicó el diseño mecánico, la construcción y la programación en el microcontrolador de este circuito hidráulico. Por tanto, en este trabajo, se presenta el modelado matemático de un prototipo experimental, tendiente a describir la morfología básica del corazón, su comportamiento dinámico y el circuito hidráulico que se lleva a cabo en el sistema cardiovascular. El prototipo consiste en una serie de recipientes interconectados por válvulas, emulando morfológicamente un corazón. La principal contribución es coadyuvar en la divulgación de la información tendiente a mejorar el conocimiento del funcionamiento de los órganos vitales del cuerpo humano, y en consecuencia a fomentar el cuidado de la salud.

2. MODELO MATEMÁTICO

En esta sección se presenta un procedimiento para obtener un modelo matemático del emulador publicado en Díaz-Valerio et al. (2020), el cual consiste en 6 tanques interconectados (representando las aurículas, ventrículos, el cuerpo y pulmones), 4 válvulas (representando la mitral, tricúspide, aórtica y pulmonar) y 2 bombas para la transportación del líquido (sangre) del cuerpo hacia el corazón y del corazón hacia los pulmones. Finalmente, se implementa un sistema electrónico basado en un microcontrolador para sintonizar la conducción de las bombas y las válvulas. El punto de partida es analizar el comportamiento dinámico del llenado y vaciado de un solo tanque. En la Fig. 2 se muestra un esquema de un solo tanque que emula cualquiera de las dos aurículas. En este esquema q_{i1} es el flujo de entrada y q_{o1} es el flujo de salida de cualquiera de los dos recipientes que emulan una aurícula. Es importante hacer notar que el llenado máximo de cada uno de los ventrículos y aurículas es de 70% del volumen máximo que puede contener cada recipiente, mientras que el vaciado debe ser tal que permanezca el nivel mínimo de un 20% del nivel máximo. Por tanto, el nivel del tanque h_1 oscila entre el 20% y el 70% del llenado del volumen ventricular (capacidad total del recipiente).

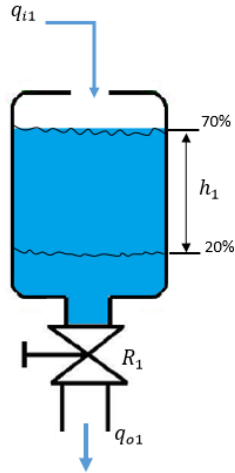


Fig. 2. Tanque único que emula una aurícula.

El balance de masa en el tanque es:

$$\frac{dv}{dt} = q_{i1} - q_{o1} \quad (1)$$

donde v es el volumen de sangre en el tanque. Considerando un área de sección transversal uniforme A_1 del tanque, entonces:

$$v = A_1 h_1 \quad (2)$$

Entonces la Ec.(1) se convierte en:

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = q_{i1} - q_{o1} \quad (3)$$

Se logra una simplificación considerable del modelado si se consideran los flujos laminares. En este caso, los modelos lineales se obtienen porque la tasa entre un cambio en el nivel del tanque y un cambio en el flujo de salida se representa con una resistencia lineal R_1 debido a la válvula, es decir, Ogata (2009):

$$R = \frac{\Delta h_1}{\Delta q_{o1}} \quad (4)$$

o bien

$$R_1 = \frac{h_1}{q_{o1}} \quad (5)$$

Entonces:

$$q_{o1} = \frac{h_1}{R_1} \quad (6)$$

Reemplazando q_{o1} en la Ec. (3) se obtiene la siguiente ecuación diferencial lineal de primer orden:

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{1}{A_1 R_1} h_1 + \frac{1}{A_1} q_{i1} \quad (7)$$

Para analizar el comportamiento dinámico de una aurícula y un ventrículo que interactúan juntos, se toma en cuenta el sistema de dos tanques acoplados verticalmente como se

muestra en la Fig. 3. El recipiente superior representa una aurícula y el recipiente inferior representa un ventrículo.

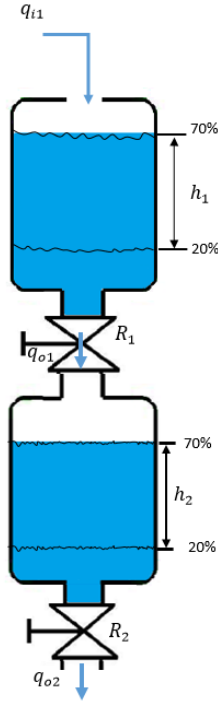


Fig. 3. Dos tanques acoplados verticalmente que representan, una aurícula (superior) y un ventrículo (inferior)

El balance de masa en el tanque que representa un ventrículo es:

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = q_{o1} - q_{o2} \quad (8)$$

De acuerdo con la Ec. (6), q_{o1} y q_{o2} son:

$$q_{o1} = \frac{h_1}{R_1} \text{ y } q_{o2} = \frac{h_2}{R_2},$$

después, la Ec. (8) se puede reescribir como:

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A_2 R_1} h_1 - \frac{1}{A_2 R_2} h_2 \quad (9)$$

Las Ecs. (7) y (9) se pueden representar de la siguiente forma en espacio de estado:

$$\begin{bmatrix} \frac{dh_1}{dt} \\ \frac{dh_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{A_1 R_1} & 0 \\ \frac{1}{A_2 R_1} & -\frac{1}{A_2 R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} \\ 0 \end{bmatrix} q_{i1} \quad (10)$$

El modelo matemático dado en la Ec. (10) se simula con MATLAB. Los valores de los parámetros se dan en la tabla 1. Las áreas de la sección transversal A_1 y A_2 se miden directamente en el prototipo experimental. Los valores

de R_1 y R_2 , se estiman experimentalmente midiendo los tiempos de llenado y vaciado de los tanques de la siguiente manera:

Suponga que el contenedor superior está inicialmente al 20% de su nivel. Si el Flujo de alimentación se activa en $q_{i1} = 6.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, entonces el tiempo de llenado hasta alcanzar un nivel de $h_{1max} = 0.098\text{m}$ es t_r . Si a partir de este nivel máximo, se desactiva el flujo de alimentación, $q_{i1} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ entonces el tiempo de vaciado hasta obtener un nivel de $h_{1min} = 0.035\text{m}$ es t_d . Los valores de R_1 y R_2 utilizados en el simulador se ajustan iterativamente hasta hacer coincidir el tiempo de vaciado de los tanques del prototipo real t_{dreal} con el tiempo de vaciado obtenido en simulación t_{dsim} .

Tabla 1. Parámetros prototipo

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Área de sección transversal (tanque 1)	A_1	0.039	m^2
Área de sección transversal (tanque 2)	A_2	0.039	m^2
Resistencia en la válvula (tanque 1)	R_1	999	s/m^2
Resistencia en la válvula (tanque 2)	R_2	1000	s/m^2

Una vez ajustados todos los parámetros del modelo matemático, es posible simular el comportamiento y la dinámica del prototipo. Ahora, se describe el modelado del desempeño emulado de una sola aurícula con su respectivo ventrículo y las ecuaciones asociadas teniendo en cuenta el ciclo hidrológico descrito en el apartado anterior.

Por ejemplo, si se analiza el lado derecho del corazón, B_1 representa la bomba sistémica, V_1 es la válvula tricúspide y V_2 la válvula pulmonar. O bien, si se analiza el lado izquierdo del corazón, B_1 representa la bomba pulmonar, V_1 es la válvula mitral y V_2 la válvula aórtica. Para ello, se introducen nuevas variables binarias en el modelo matemático de la Ec. (10): B_1 (asociado a la bomba sistémica o pulmonar), V_1 (asociado a la válvula tricúspide o mitral) y V_2 (asociado a la válvula pulmonar o aórtica). Si se enciende una bomba o se abre una válvula, entonces la variable correspondiente es 1, y viceversa, si se apaga un actuador, entonces la variable correspondiente es 0. Con estas consideraciones previas, el modelo matemático del lado derecho o izquierdo del prototipo que emula la hidráulica del sistema circulatorio se convierte en:

$$\begin{bmatrix} \frac{dh_1}{dt} \\ \frac{dh_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{V_1}{A_1 R_1} & 0 \\ \frac{V_1}{A_2 R_1} & -\frac{V_2}{A_2 R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{B_1}{A_1} \\ 0 \end{bmatrix} q_{i1} \quad (11)$$

Estos sistemas hidráulicos se describen matemática y cíclicamente de la siguiente manera:

- 1.- Llenado de la aurícula, el nivel del ventrículo se mantiene constante en h_{2min} , $B_1 = 1$, $V_1 = 0$,

$V_2 = 0$, (1.5s). Al modelo resultante se le llamará M_1 comúnmente conocido en el ciclo cardiaco como (*inicio de la diástole auricular, la cual tarda un tiempo de (0.5s)*), i.e.:

$$M_1 : \begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A} q_{i1} \\ \frac{dh_2}{dt} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

- 2.- El nivel de la aurícula y el ventrículo se mantienen constantes en h_{1max} y h_{2min} , respectivamente, $B_1 = 0$, $V_1 = 0$, $V_2 = 0$, (6s). Al modelo resultante se le llamará M_2 comúnmente conocido en el ciclo cardiaco como (*sístole auricular la cual tarda un tiempo de (0.3s)*), i.e.:

$$M_2 : \begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = 0 \\ \frac{dh_2}{dt} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

- 3.- Vaciado del la aurícula y llenado del ventrículo, $B_1 = 0$, $V_1 = 1$, $V_2 = 0$, (10s). Al modelo resultante se le llamará M_3 comúnmente conocido en el ciclo cardiaco como (*inicio de la diástole ventricular la cual tarda un tiempo de (0.5s)*), i.e.:

$$M_3 : \begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = -\frac{1}{A_1 R_1} h_1 \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A_2 R_1} h_1 \end{cases} \quad (14)$$

- 4.- Vaciado del ventrículo, el nivel de la aurícula se mantiene constante en h_{1min} , $B_1 = 0$, $V_1 = 0$, $V_2 = 1$, (10s) Al modelo resultante se le llamará M_4 comúnmente conocido en el ciclo cardiaco como (*sístole ventricular la cual tarda un tiempo de (0.3s)*), i.e.:

$$M_4 : \begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = 0 \\ \frac{dh_2}{dt} = -\frac{1}{A_2 R_2} h_2 \end{cases} \quad (15)$$

- 5.- Se repite el ciclo.

Es importante mencionar que los tiempos de encendido y apagado de las bombas y de apertura y cierre de las válvulas, pueden modificarse de acuerdo a las necesidades de estudio del ciclo hidráulico.

Si se considera que los dos estados h_1 y h_2 (correspondientes al llenado del volumen ventricular), son medibles, entonces se tiene un sistema conmutado de la forma:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_{\sigma(t)} x + B_{\sigma(t)} u \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (16)$$

donde $x \in \mathbb{R}^2$, $u \in \mathbb{R}$, $y \in \mathbb{R}^2$ es el vector de estados $x = (h_1 \ h_2)^T$, la entrada $u = q_{i1}$ y la salida $y = (h_1 \ h_2)^T$, respectivamente. A la función $\sigma(t) : [0, \infty) \rightarrow \Lambda$ se le denomina ley de conmutación. Esta función sólo adquiere los valores contenidos en el conjunto de números enteros $\Lambda = \{1, 2, 3, 4\}$ a lo largo del tiempo y de forma cíclica. Cada número corresponde al modelo matemático que se encuentra activo: M_1 , M_2 , M_3 o M_4 . La secuencia de conmutación de los modelos se aprecia en la Fig. 4.

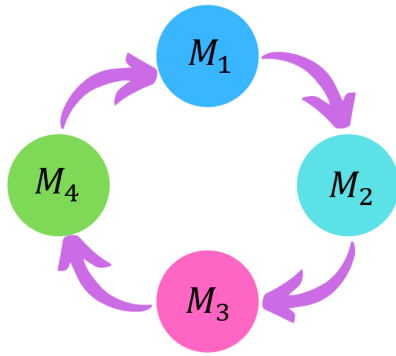


Fig. 4. Secuencia de conmutación de los modelos.

Las matrices correspondientes a este sistema conmutado son:

$$A_1 = A_2 = 0_{2 \times 2}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{A_1 R_1} & 0 \\ \frac{1}{A_2 R_1} & 0 \end{bmatrix} \quad A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{A_2 R_2} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{A} \\ 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = B_3 = B_4 = 0_{2 \times 1}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Es importante notar que dado que los estados coinciden con las salidas del sistema y ambas son medibles, el sistema conmutado (16) es observable.

3. CONCLUSIÓN

La principal contribución de este trabajo es dar a conocer un modelo matemático para la representación hidráulica del funcionamiento del corazón. Esta representación hidráulica, permite analizar conceptualmente el comportamiento dinámico y secuencial del ciclo cardíaco.

Con este modelo matemático se podrían desarrollar algoritmos de observación y control para la detección y localización de fallas y validarlos de manera experimental en el prototipo desarrollado o bien mediante el modelo propuesto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las valiosas aportaciones y sugerencias del Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez y la M. en C. Dulce Alejandra Serrano Cruz orientadas a comprender el funcionamiento del sistema cardiovascular.

REFERENCES

Anderson, K.M., Odell, P.M., Wilson, P.W., and Kannel, W.B. (1991). Cardiovascular disease risk profiles. *American Heart Journal*, 121(1), 293–298.

- Cho, S., Lee, Y., and Chang, I. (2016). Designing a novel ECG simulator: Multi-modality electrocardiography into a three-dimensional wire cube network. *IEEE Technology and Society Magazine*, 35(1), 75–84.
- Díaz-Valerio, C.G., Astorga-Zaragoza, C.M., Reyes-Reyes, J., Osorio-Gordillo, G.L., González-Cruz, M.N., and Daza-Merino, C.A. (2020). Diseño y construcción de un emulador del circuito hidráulico del sistema circulatorio. *Pistas Educativas*, (137), 830–846.
- Fanelli, A., Signorini, M.G., Ferrario, M., Perego, P., Piccini, L., Andreoni, G., and G., M. (2011). Telefetalcare: A first prototype of a wearable fetal electrocardiograph. In *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*.
- Fent, G., Gosai, J., and Purva, M. (2016). A randomized control trial comparing use of a novel electrocardiogram simulator with traditional teaching in the acquisition of electrocardiogram interpretation skill. *Journal of Electrocardiology*, 49(2), 112–116.
- Gollmann-Tepeköylü, C., Holfeld, J., Pölzl, G., Metzler, B., Hintringer, F., Adukauskaitė, A., Stijnen, M., Tuijl, S., Müller, L., Grimm, M., and Bonaros, N. (2018). Beating heart porcine high-fidelity simulator for the training of edge-to-edge mitral valve repair. *Multimedia Manual of Cardiothoracic Surgery : MMCTS*.
- Ogata, K. (2009). *Modern Control Engineering*.
- Reyes-Aguirre, E., Rojas-Moreno, J., and Flóres-Franco, M. (2012). Design and construction of an electrocardiograph prototype with touch screen interface and embedded system with 16-bit resolution. In *XVII Symposium of Image, Signal Processing, and Artificial Vision (STSIVA)*.
- Schwid, H. (1988). Electrocardiogram simulation using a personal computer. *Computers and Biomedical Research*, 21(6), 562–569.
- Sowers, J.R., Epstein, M., and Frohlich, E.D. (2001). Diabetes, hypertension, and cardiovascular disease. *Hypertension*, 37(4), 1053–1059.
- Zhang, Z., Wang, W., Wang, B., Wu, H., Liu, H., and Zhang, Y. (2009). A prototype of wearable respiration biofeedback platform and its preliminary evaluation on cardiovascular variability. In *International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*.

Estimación de Estados del Sistema Cardiovascular Mediante un Observador de Orden Reducido

Erandi-A. Arroyo-Trejo, * Carlos-M. Astorga-Zaragoza *

** Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y
Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira s/n, Col. Palmira,
C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México. (e-mail: {alejandra.atr,
carlos.az}@cenidet.tecnm.mx)*

Resumen: Este artículo presenta el diseño de un observador de orden reducido para estimar las variables de estado del sistema cardiovascular. El objetivo es estimar la presión sistémica y flujo sanguíneo en la aorta para la detección de padecimientos asociados a dichas variables. El diseño del observador se realiza mediante el uso de un modelo matemático de tipo Windkessel de cuatro elementos, que tiene la forma de un sistema en espacio de estados singular y lineal invariable en el tiempo. Este modelo describe parte del comportamiento dinámico del lado izquierdo del corazón. La evaluación del observador se realiza utilizando MATLAB, mediante simulaciones numéricas.

Keywords: Observador, sistema cardiovascular, modelo Windkessel, MATLAB.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas de salud pública a nivel mundial y de las principales causas de muerte en México son las enfermedades cardiovasculares, Dávila (2020), entre las cuales se encuentran cardiopatía coronaria, enfermedades cerebrovasculares, arteriopatía periférica, cardiopatía reumática, cardiopatía congénita, trombosis venosas profundas y embolias pulmonares. Las causas de ataques al corazón se deben a la presencia de factores de riesgo tales como, tabaquismo, dietas altas en grasas, obesidad, inactividad física, consumo de alcohol, hipertensión arterial, diabetes e hiperlipidemia, Sánchez-Arias et al. (2016). Recientemente, la pandemia de la enfermedad COVID 19 evidencia que pacientes con afecciones cardiovasculares subyacentes tienen mayor riesgo de morbilidad, provocando lesiones y disfunción al miocardio, Clerkin et al. (2020).

De acuerdo a lo anterior, resulta de particular interés el estudio de las enfermedades cardiovasculares, por lo cual han sido propuestos modelos matemáticos basados en analogías con configuraciones eléctricas que representan la hemodinámica de la red arterial, como el modelo tipo Windkessel reportado en Cervino and Cervino (2018).

Los sistemas biológicos complejos pueden ser descritos como sistemas descriptivos, según Liu et al. (2008), dado que estos presentan relaciones dinámicas y estáticas del sistema, Luenberger (1976), como es el modelo de Windkessel, que describe el comportamiento del sistema cardio-

vascular en forma de un sistema singular lineal invariable en el tiempo (S-LTI).

En el área de control automático se han reportado diversos trabajos, basados en observadores de estado, enfocados en la detección y diagnóstico de enfermedades cardiovasculares como el seguimiento de la dinámica cardiovascular para estimar el estado de salud del paciente, Astorga-Zaragoza (2019), estimación de variables de acuerdo a Serrano-Cruz et al. (2018), estimación de parámetros del ritmo cardíaco como en Imamasu and Matoba (2014) y adquisición de señales del sistema cardiovascular según Valigi (2015).

Este trabajo reporta el diseño de un observador de orden reducido para el modelo Windkessel de cuatro elementos en su forma singular cuyo propósito consiste en la estimación de la presión sistémica y el flujo sanguíneo en la aorta, lo cual resulta difícil de medir de forma no invasiva. La importancia de la estimación de estas dos variables radica en el hecho que podría contribuir a la detección de condiciones anómalas en el funcionamiento del corazón.

2. MODELO WINDKESSEL

2.1 Representación de Modelo Windkessel

El modelo Windkessel es una representación análoga eléctrica del sistema cardiovascular, Gómez Pérez and D'Alessandro Martínez (2006), diseñado por el fisiólogo Otto Frank, en 1899. El modelo propuesto inicialmente consta de dos elementos, en el cual se representa la

resistencia y la compliancia de las arterias sistémicas mediante un elemento resistivo y uno capacitivo, respectivamente. Posteriormente, se introdujeron más elementos para mejorar el comportamiento de la dinámica del modelo. En Burattini and Gnudi (1982) se presenta el modelo Windkessel de cuatro elementos que fue utilizado en Campbell et al. (1984) donde los elementos agregados que son resistencia e inductancia, se combinan para determinar una impedancia característica, la cual expresa la inercia de todo el sistema arterial, Stergiopulos et al. (1999). Este modelo se compone de una resistencia, un capacitor y una impedancia que representan al flujo sanguíneo, la compliancia arterial y la inercia del flujo sanguíneo respectivamente, además de un elemento que representa la impedancia de entrada, Westerhof et al. (2009).

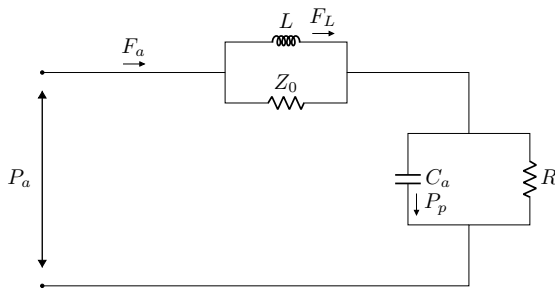


Fig. 1. Modelo Windkessel de cuatro elementos.

La Fig. 1 muestra el modelo Windkessel de cuatro elementos, que describe las relaciones presión-flujo en la entrada del sistema arterial. El circuito reproduce el ciclo cardíaco que se compone por un periodo de relajación denominado diástole, seguido de un periodo de contracción que es denominado sístole, Serrano-Cruz et al. (2018).

Las ecuaciones que describen el modelo Windkessel de cuatro elementos, Astorga-Zaragoza (2019), se muestran a continuación:

$$\dot{P}_p(t) = -\frac{1}{RC_a} P_p(t) + \frac{1}{C_a} F_a(t) \quad (1)$$

$$\dot{F}_L(t) = -\frac{Z_0}{L} F_L(t) + \frac{Z_0}{L} F_a(t) \quad (2)$$

$$P_a(t) = P_p(t) + Z_0(F_a(t) - F_L(t)) \quad (3)$$

donde $P_p(t)$ es la presión sistémica, $F_a(t)$ representa el flujo sanguíneo expulsado del ventrículo izquierdo y se considera la entrada del sistema, $P_a(t)$ es la presión arterial y se considera la salida del sistema. $F_L(t)$ representa el flujo total a través de la inercia arterial. Los parámetros del sistema son: C_a es la compliancia arterial total, L es la inercia en el flujo sanguíneo, Z_0 es la impedancia de entrada de la aorta y R es la resistencia periférica.

2.2 Modelo Windkessel en Forma Singular

Las ecuaciones que describen al modelo Windkessel corresponden a dos relaciones dinámicas (1) y (2), además de una estática (3). Para que la ecuación de salida no dependa de la entrada se puede representar el modelo matemático de la siguiente forma singular, Darouach and Boutayeb (1995):

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (4)$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^k$, $y \in \mathbb{R}^p$, $E \in \mathbb{R}^{n,n}$, $B \in \mathbb{R}^{n,k}$ y $C \in \mathbb{R}^{p,n}$. Se asume que el rango de $E = r < n$.

Para hacer la representación singular se requieren de las variables de estado $x_1 = P_p$, $x_2 = F_L$ y se define $x_3 = P_a$, por lo que el vector de estados resulta en $x(t) = [P_p(t) \ F_L(t) \ P_a(t)]^T$. También la ecuación (3) se lleva a la forma:

$$0 = P_p + Z_0 F_a - Z_0 F_L - P_a.$$

La entrada y salida del sistema son $u(t) = F_a(t)$ y $y(t) = P_a(t)$, respectivamente. Entonces, se obtienen las matrices:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC_a} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{Z_0}{L} & 0 \\ 1 & -Z_0 & -1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_a} \\ \frac{Z_0}{L} \\ Z_0 \end{bmatrix},$$

$$C = [0 \ 0 \ 1]$$

que representan el modelo Windkessel de cuatro elementos de forma singular, donde la ecuación de salida $y = P_a$ no depende de la entrada.

3. OBSERVADOR SINGULAR DE ORDEN REDUCIDO

En Darouach and Boutayeb (1995), se propone el siguiente método para diseñar un observador de orden reducido, para un sistema singular lineal e invariante en el tiempo, como es el modelo Windkessel.

El sistema (4) es un sistema restringido equivalente a:

$$\begin{aligned} E^* \dot{x}(t) &= A^* x(t) + B^* u(t) \\ y^*(t) &= C^* x(t) \end{aligned} \quad (5)$$

donde

$$y^* = \begin{bmatrix} -B^{**}u \\ y \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^q,$$

$$C^* = \begin{bmatrix} A^{**} \\ C \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{q,n}, \quad \text{con } q = m + p - r,$$

se asume que $\text{rango}(C^*) = q$ y que $\text{rango}(E^*) = r$, existe una matriz P tal que:

$$PE = \begin{bmatrix} E^* \\ 0 \end{bmatrix}, \quad PA = \begin{bmatrix} A^* \\ A^{**} \end{bmatrix}, \quad PB = \begin{bmatrix} B^* \\ B^{**} \end{bmatrix}$$

con $E^* \in \mathbb{R}^{r,n}$.

La estructura del observador de orden reducido considerada está dada por:

$$\begin{aligned} \dot{w} &= \Pi w + Gy^* + Hu \\ \hat{x} &= Mw + Fy^* \end{aligned} \quad (6)$$

donde $w \in \mathbb{R}^{n-q}$.

Para determinar las matrices Π , G , M y F , tal que la estimación $\hat{x}$ converja asintóticamente a x , debe aplicarse el procedimiento descrito a continuación:

1) Elegir una matriz U de $(n-q) \times n$, tal que $\begin{bmatrix} R \\ C^* \end{bmatrix}$ es no singular, esto puede ser hecho, siempre que C^* sea de rango completo.

2) Dadas las matrices

$$\begin{bmatrix} TE^* \\ C^* \end{bmatrix} [M \ F] = \begin{bmatrix} I_{n-q} & 0 \\ 0 & I_q \end{bmatrix}, \quad [T \ K] \begin{bmatrix} E^* \\ C^* \end{bmatrix} = U$$

la matriz M se calcula como:

$$M = \begin{bmatrix} U \\ C^* \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{n-q} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

3) Si el par (Γ, Ω) es detectable:

$$\Gamma = U \Delta E^{*T} A^* M, \quad \Omega = \begin{bmatrix} (I_r - E^* \Delta E^{*T}) A^* M \\ -C^* \Delta E^{*T} A^* M \end{bmatrix}$$

se puede encontrar una matriz Z arbitraria de dimensiones apropiadas.

$$\Pi = \Gamma + Z\Omega. \quad (8)$$

Se debe considerar que la matriz Π sea una matriz de estabilidad. Luego se puede encontrar la matriz T .

$$T = U \Delta E^{*T} + Z \begin{bmatrix} I_r - E^* \Delta E^{*T} \\ -C^* \Delta E^{*T} \end{bmatrix}$$

donde $\Delta = (E^{*T} E^* + C^{*T} C^*)^{-1}$.

4) La matriz F se puede obtener de:

$$F = \begin{bmatrix} TE^* \\ C^* \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ I_q \end{bmatrix}. \quad (9)$$

5) Las matrices H y G se encuentran con:

$$H = TB^* \quad (10)$$

$$G = TA^* F. \quad (11)$$

4. RESULTADOS

Los resultados de simulación del observador de orden reducido son mostrados en la Fig. 2, en donde se aprecia la señal de entrada al flujo sanguíneo que expulsa el ventrículo izquierdo del corazón. Para reproducir esta señal del corazón es necesario considerar el tiempo de duración de la sístole y la diástole. Por ello, la señal de entrada está definida por la función, Serrano-Cruz et al. (2018):

$$F_a(t) = \begin{cases} F_a * \sin^2\left(\frac{2\pi}{T_s}\right) & \tau \in (0, T_s) \\ 0 & \tau \in (T_s, T_d) \end{cases} \quad (12)$$

donde $T_s = 0.3$ s es el tiempo de duración de la sístole y $T_d = 0.8$ s el tiempo que dura la diástole. F_a es el flujo sanguíneo que corresponde a 500 ml/s cuando el ventrículo abre la válvula aórtica y 0 ml/s cuando se cierra la válvula.

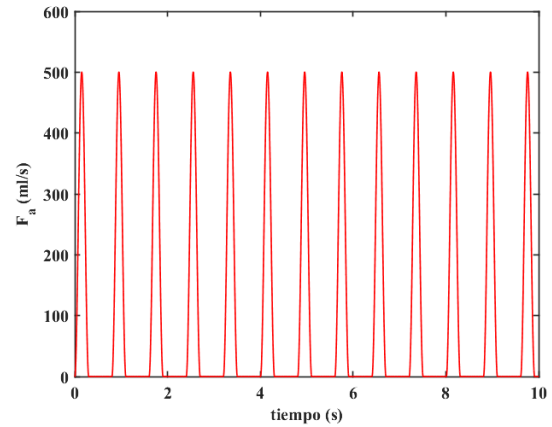


Fig. 2. Señal de entrada: Flujo sanguíneo.

4.1 Resultados de las Matrices para el Observador

Para determinar los valores de las matrices, se utilizaron valores de parámetros de una persona normotensa para el modelo Windkessel de cuatro elementos, como se muestra en la Tabla 1, Kind et al. (2010).

Tabla 1. Valores de parámetros del modelo Windkessel de cuatro elementos.

Parámetro	Normotenso	Hipertenso	Dimensión
Z_0	0.033	0.05	mmHg · s/ml
C_a	1.5	0.7	ml/mmHg
R	0.95	1.4	mmHg · s/ml
L	0.01	0.02	mmHg · s ² /ml

Las matrices del sistema restringido equivalente que corresponden a (5) son:

$$E^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A^* = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC_a} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{Z_0}{L} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -701.7544 \times 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & -3.3 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A^{**} = [1 \ -Z_0 \ -1] = [1 \ 0.0330 \ -1],$$

$$B^* = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_a} \\ \frac{Z_0}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 66.6667 \times 10^{-6} \\ 3.3 \end{bmatrix},$$

$$B^{**} = [Z_0] = [0.0330],$$

$$C^* = \begin{bmatrix} 1 & -Z_0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0.0330 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$y^* = \begin{bmatrix} -Z_0 u(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0330 u(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}.$$

Anteriormente se definió que q y r son el rango de C^* y E^* respectivamente, de modo tal que basta con escribir $q = 2$ y $r = 2$, el rango de $[E^* \ C^*]^T = n = 3$.

Se proponen $U = [1 \ 0 \ 0]$ y $Z = [0 \ 0 \ 2 \ 0]$.

El valor de Δ es:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 666.787 \times 10^{-3} & 10.996 \times 10^{-3} & 333.212 \times 10^{-3} \\ 10.996 \times 10^{-3} & 999.637 \times 10^{-3} & -10.996 \times 10^{-3} \\ 333.212 \times 10^{-3} & -10.996 \times 10^{-3} & 666.787 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

Los valores de T , Γ y Ω son:

$$T = [362.8683 \times 10^{-6} \ 32.9880 \times 10^{-3}],$$

$$\Gamma = [-1.5675], \quad \Omega = \begin{bmatrix} 865.7676 \times 10^{-3} \\ -28.5703 \times 10^{-3} \\ -865.7676 \times 10^{-3} \\ -865.7676 \times 10^{-3} \end{bmatrix}.$$

De este modo, se puede determinar las dimensiones de las matrices para encontrar los valores de Π , G , H , M y F que se obtienen de (7)-(11):

$$\Pi = [-3.2991],$$

$$G = [942.4788 \times 10^{-6} \ 942.4788 \times 10^{-6}],$$

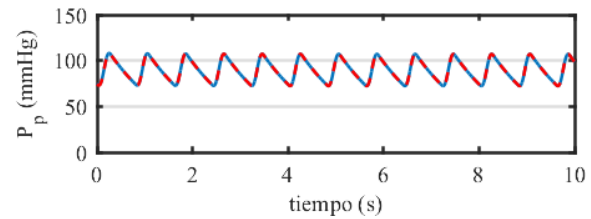
$$H = [109.1024 \times 10^{-3}], \quad M = \begin{bmatrix} 1 \\ 30.3030 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} 999.6371 \times 10^{-3} & 999.6371 \times 10^{-3} \\ -10.9960 \times 10^{-3} & -10.9960 \times 10^{-3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

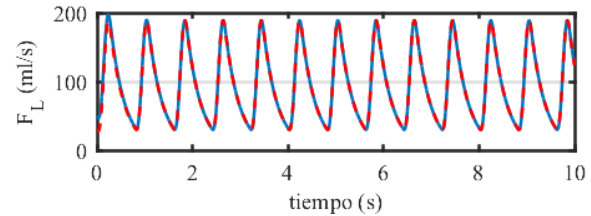
Con el valor negativo de Π se asegura la estabilidad del sistema.

4.2 Simulación del Observador Singular

Los resultados de la simulación en MATLAB de la dinámica del sistema y del observador con parámetros de una persona normotensa, se muestran en la Fig. 3.



(a) Presión Sistémica.



(b) Flujo sanguíneo en la aorta.

Fig. 3. Gráficas de mediciones de una persona normotensa del sistema cardiovascular.

Se utilizó un paso de integración de 0.001 s para la resolución de las ecuaciones diferenciales del observador descritas por (6).

El observador es de segundo orden, de tal manera que los estados estimados son: la presión sistémica $\hat{x}_1 = \hat{P}_p(t)$ y el flujo total en la aorta $\hat{x}_2 = \hat{F}_L(t)$.

En la Fig. 3(a) y la Fig. 3(b) se observa la dinámica del estado de la presión sistémica $x_1 = P_p(t)$ y del flujo sanguíneo en la aorta $x_2 = F_L(t)$, con una línea azul continua. También se observan los estados estimados $\hat{x}_1 = \hat{P}_p(t)$ y $\hat{x}_2 = \hat{F}_L(t)$ con una línea roja punteada. Se observa la convergencia de los estados estimados a la dinámica del modelo Windkessel de cuatro elementos, para la presión sistémica la convergencia ocurre más rápidamente (menos de 1 segundo) que en el flujo sanguíneo (al menos 1.5 segundos).

En la Fig. 3(a) se muestra la presión sistémica, la presión ejercida por la sangre expulsada por el ventrículo izquierdo, la cual se mide en sus niveles más altos y más bajos. Durante la sístole esta presión es de aproximadamente 118 mmHg y durante la diástole de 72 mmHg , niveles que corresponden a una persona normotensa, Jáuregui (2009).

En la Fig. 3(b) se observa que el flujo sanguíneo en la aorta, volumen de sangre que atraviesa la válvula aórtica, durante la sístole alcanza 197 ml/s y en la diástole disminuye hasta 30 ml/s , debido a que la válvula aórtica se cierra, Sabatier et al. (2012).

En la Fig. 4 se muestra la convergencia del observador (línea roja punteada) a la dinámica del modelo (línea azul continua) para una persona hipertensa, de acuerdo a los parámetros de la Tabla 1.

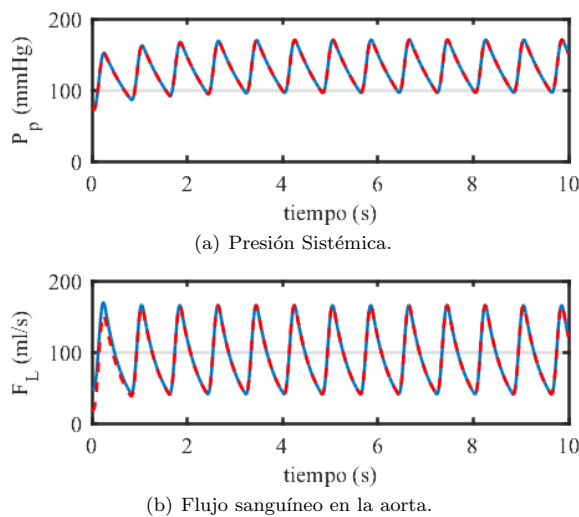


Fig. 4. Gráficas de mediciones de una persona hipertensa del sistema cardiovascular.

La presión sistémica mostrada en la Fig. 4(a) durante la sístole tiene 170 mmHg y en la diástole 96 mmHg , niveles que corresponden a un paciente hipertenso.

El flujo sanguíneo en la aorta que se ve en la Fig. 4(b), en la diástole alcanza los 165 ml/s y en la sístole disminuye.

5. CONCLUSIÓN

Se diseñó un observador de orden reducido para reconstruir los estados desconocidos del modelo Windkessel de cuatro elementos representado en forma singular, de tal manera que la salida del sistema no dependa de su entrada. La entrada medida y la salida del sistema fueron consideradas para evitar el uso de dispositivos de medición. Debido a la convergencia del observador hacia la dinámica del sistema, fue posible estimar la presión sistémica y el flujo sanguíneo en la aorta.

Las mediciones que se obtuvieron corresponden a los valores de una persona con presión sanguínea normal y otra que padece presión arterial alta. Respecto a las presiones sistémicas resultantes, en el caso de la persona hipertensa, las mediciones estimadas de la presión sistólica y diastólica concuerdan con la categoría de hipertensión. En el caso de la persona normotensa, los resultados concuerdan con su respectiva categoría.

La resistencia que se opone al flujo sanguíneo es mayor para una persona hipertensa que para alguien que presenta presión sanguínea normal. Por esta razón, es que el flujo sanguíneo de un paciente con hipertensión disminuye y la presión sistémica aumenta, como se observa en las gráficas.

Este observador puede ser utilizado para identificar padecimientos cardíacos, de manera no invasiva.

REFERENCIAS

- Astorga-Zaragoza, C.M. (2019). Observer-based monitoring of the cardiovascular system. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67(3), 501–505.
- Burattini, R. and Gnudi, G. (1982). Computer identification of models for the arterial tree input impedance: Comparison between two new simple models and first experimental results. *Medical Biological Engineering Computing*, 20, 134–144.
- Campbell, K.B., Rigo, J.A., and Neti, C. Alexander, J.E. (1984). Informational analysis of left-ventricle/systemic-arterial interaction. *Annals of Biomedical Engineering*, 12(2), 209–231.
- Cervino, C.N. and Cervino, C.O. (2018). Simulación del corazón izquierdo para aplicaciones en docencia e investigación. *Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología*, (21), 45–51.
- Clerkin, K., Fried, J., Raikhelkar, J., Sayer, G., Griffin, J., Masoumi, A., Jain, S., Burkoff, D., Kumaraiah, D., Rabbani, L., Schwartz, A., and Uriel, N. (2020). Coronavirus disease 2019 (COVID-19) and cardiovascular disease. *Circulation*, 1648–1655.
- Darouach, M. and Boutayeb, M. (1995). Design of observers for descriptor systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(7), 1323–1327.
- Dávila, C. (2020). Tendencia e impacto de la mortalidad por enfermedades cardiovasculares en México, 1990–2015. *Revista Cubana de Salud Pública*.
- Gómez Pérez, K. and D'Alessandro Martínez, A. (2006). Modelos de sistemas fisiológicos: Sistema cardiovascular. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad de Venezuela*, 21(3), 145–159.
- Imamasu, K. and Matoba, C. (2014). Parameter estimation of heart rhythm dynamics using adaptive observer. 73–77.
- Jáuregui, R. (2009). La hipertensión arterial sistémica. conceptos actuales. *Acta Médica Grupo Ángeles*, 7(1), 17–23.

- Kind, T., Faes, T., Lankhaar, J., Vonk-Noordegraaf, A., and Verhaegen, M. (2010). Estimation of three- and four-element windkessel parameters using subspace model identification. *IEEE Transactions on Medical Engineering*, 57(7), 1531–1538.
- Liu, P., Zhang, Q., Yang, X., and Yang, L. (2008). Passivity and optimal control of descriptor biological complex systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 53, 122–125.
- Luenberger, D.G. (1976). Dynamic equations in descriptor form. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-22(3), 312–321.
- Sabatier, C., Monge, I., Maynar, J., and Ochagavia, A. (2012). Valoración de la precarga y la respuesta cardiovascular al aporte de volumen. *Medicina Intensiva*, 36(1), 45–55.
- Sánchez-Arias, A., Bobadilla-Serrano, M., Dimas-Altamirano, B., Gómez-Ortega, M., and González-González, G. (2016). Enfermedad cardiovascular: primera causa de morbilidad en un hospital de tercer nivel. *Revista Mexicana de Cardiología*, s98–s102.
- Serrano-Cruz, D.A., Astorga-Zaragoza, C.M., Guerrero-Ramírez, G.V., García-Beltran, C.D., Osorio-Gordillo, G.L., and Ortiz-Rangel, E. (2018). Estimación de variables del sistema cardiovascular mediante un observador para sistemas singulares. 108–113. AMCA.
- Stergiopulos, N., Westerhof, B., and Westerhof, N. (1999). Total arterial inertance as the fourth element of the windkessel model. *American Journal of Physiology Heart and Circulatory Physiology*, 276(1), H81–H88.
- Valigi, P. (2015). Parameters estimation based on a switched observer for the study of left contractility. *IFAC proceedings Volumes*, 38(1), 272–277.
- Westerhof, N., Lankhaar, J., and Westerhof, B. (2009). The arterial windkessel. *Medical Biological Engineering Computing*, 47(2), 131–141.

Control Basado en un Observador de Estado para Sistemas con Señales Inciertas: Aplicado a una Estructura Tipo Edificio

René R. Galaz-Palma* Boubekur Targui**
Omar Hernández-González*** Guillermo Valencia-Palomo*
Rafael A. Galaz-Bustamante* Adrian Espinoza-Molina*

* *Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico de Hermosillo, Hermosillo, Son., México.*

** *Université de Caen, Bd. Marechal Juin, Caen France.*

*** *CONACYT: Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico de Hermosillo, Hermosillo, Son., México.*

Resumen: Este trabajo presenta un control basado en un observador capaz de estimar el vector de estado en presencia de señales con incertidumbre. El sistema en lazo cerrado se basa en un control proporcional-derivativo, con el propósito de suprimir los efectos producidos por señales externas inciertas basado en un observador de estado. El método de estimación utilizado para resolver este problema se basa en un observador para sistemas lineales con incertidumbre, donde la ganancia del observador es obtenida mediante la solución de una LMI. El enfoque de estimación propuesto solo necesita conocer el rango mínimo del valor de la incertidumbre, con ello se asegura una convergencia exponencial a cero. El enfoque propuesto se valida en una estructura tipo edificio de dos pisos, la cual es afectada por una señal desconocida como lo es un sismo.

Palabras clave: Sistemas lineales, Incertidumbre, Observadores para sistemas lineales.

1. INTRODUCCIÓN

Las infraestructuras de uso civil son continuamente afectadas por fuerzas externas desconocidas como las sísmicas, por lo que se requiere mantener el sistema estable Morales-Valdez et al. (2019). Debido a lo antes mencionado, se han realizado diversos estudios enfocados en el desarrollo de sistemas de monitoreo que permiten el diagnóstico de daños, así como la mitigación de los daños que pueden provocar estos movimientos Dertimanis et al. (2019). Por esta razón este tema se considera de interés en el diagnóstico y control de las estructuras tipo edificio.

Los desplazamientos en las estructuras civiles causados por las fuerzas sísmicas pueden generar daños a corto o mediano plazo Jian et al. (2009) y Xu et al. (2020). Existen diferentes investigaciones que estudian la detección de daños de los cimientos, como lo son el análisis de las vibraciones Das et al. (2016) o donde las vibraciones son consideradas señales inciertas Arabha Najafabadi et al. (2020).

Las variables de estados en procesos prácticos no siempre pueden ser directamente medibles por sensores. Algunas aplicaciones requieren disponibilidad en todos los estados, por lo que es inevitable recurrir a los observadores de estado. El problema de diseño de observadores para sistemas

no lineales y lineales ha registrado mucha actividad en los últimos años Sayyaddeshad and Gustafsson (2015), en estos desarrollos se han abordado distintos problemas de estimación, donde se abordan distintos enfoques para su análisis Benallouch et al. (2012), Astolfi et al. (2020) y Karafyllis et al. (2020). En el trabajo de Share Pasand (2020) se propone estimar los estados por medio de los observadores Luenberger aplicado a sistemas lineales.

Por otro lado, la incertidumbre, como señal desconocida de entrada en los sistemas, es un problema muy frecuente que hace importante tratar de compensar sus efectos. Para ofrecer una solución a esto, se han propuesto observadores que permiten estimar el estado en presencia de incertidumbre en el sistema. Uno de los trabajos que aborda esta temática es presentado en Nayek et al. (2019), el cual propone un observador de entrada desconocida para un sistema lineal aplicado a un modelo de una estructura civil, igualmente en Morales-Valdez et al. (2017) presenta un observador adaptable para modelos de edificios que otorga entregar los parámetros estructurales desconocidos y las señales no medibles de desplazamiento y velocidad a partir de señales de aceleración. Incluso en Krokavec and Filasová (2020), propone una solución a sistemas lineales inciertos a través de un observador intervalar, basado

en la solución de una LMI, siendo posible garantizar la estabilidad dentro de un intervalo de convergencia.

La idea principal de este artículo es presentar un control basado en un observador de estado para estimar el vector de estado en presencia de incertidumbre, utilizando un control clásico PD. El sistema de estimación de estado asume una señal desconocida externa incierta y a pesar de esto logra estimar el vector de estado. El trabajo propuesto se basa en el modelo matemático propuesto en Rodríguez Torres et al. (2020) mostrado en la sección 2. El observador propuesto garantiza su estabilidad bajo el análisis de Lyapunov, utilizando el enfoque LMI para el cálculo de la ganancia del observador presentado en la sección 3. El diseño del control basado en observador se evalúa en la sección 4, donde se presenta el esquema de control propuesto para una estructura tipo edificio de 2 pisos, por último, en la sección 5 se presenta la conclusión.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se considera una estructura tipo edificio propuesto en Rodríguez Torres et al. (2020). Ver Fig. 1 como diagrama estructural. El modelo matemático para este sistema se presenta a continuación:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -M^{-1}K_s & -M^{-1}C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} \\ l \end{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \\ y = [I_{n \times n} \ 0_{n \times n}] z(t) = z_1 \end{cases} \quad (1)$$

siendo n el número de pisos de la estructura; M , C_s y K_s son las matrices de constantes conocidas de masa, amortiguamiento y resorte, respectivamente, definidas como:

$$m = \text{diag} [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_n] > 0 \quad (2)$$

$$C_s = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \dots & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & 0 & \dots & -c_n & c_n \end{bmatrix} \geq 0 \quad (3)$$

$$K_s = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & \dots & -k_n & k_n \end{bmatrix} \geq 0 \quad (4)$$

donde m_i , c_i y k_i para $i = 1, 2, \dots, n$, son la masa, constante de amortiguador y resorte entre los pisos, las que definen características de la estructura del edificio; el vector l permite distribuir la señal escalar $\ddot{x}_g$ que

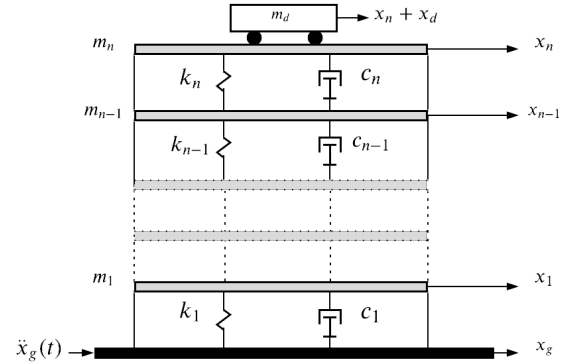


Fig. 1. Diagrama de una estructura tipo edificio de n-pisos

representa la incertidumbre en cualquier nivel del vector y físicamente representa la señal sísmica:

$$l = [1, 1, 1, \dots, 1]^T \in R^{n \times 1} \quad (5)$$

El vector de estado está definido por la posición y velocidad de cada uno de los niveles de la estructura representado por $z(t) = [z_1(t), \ z_2(t)]^T = [x(t), \ \dot{x}(t)]^T$.

2.1 Ley de control

La ley de control basado en observador considera un control PD, definido a continuación:

$$v = -k_p(x - x_d) - k_d(\dot{x} - \dot{x}_d) \quad (6)$$

donde x_d es la posición deseada, para este tipo de control de vibración se considera $x_d(t) = 0$, por lo que $\dot{x}_d(t) = 0$, es decir, se desea que la estructura no presente desplazamientos $x(t) = 0_n$. El objetivo principal de este control es que el control compense el movimiento generado por una señal sísmica, en aplicaciones reales ningún actuador presenta este comportamiento, por lo tanto, se busca reducir la magnitud de las oscilaciones en lazo cerrado comparándolo con el sistema en lazo abierto.

El controlador del sistema está en el último piso y sin considerar la fricción. La dinámica del sistema en lazo cerrado con el controlador se relaciona en las matrices K_s y C_s que dependen del desplazamiento y velocidad respectivamente, por lo que las nuevas matrices son redefinidas de la siguiente manera:

$$C_{kds} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \dots & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & 0 & \dots & -c_n & c_n + k_d \end{bmatrix} \geq 0 \quad (7)$$

$$K_{kps} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \cdots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \cdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & \cdots & -k_n & k_n + k_p \end{bmatrix} \geq 0 \quad (8)$$

Siendo el nuevo modelo en lazo cerrado (9):

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -M^{-1}K_{kps} & -M^{-1}C_{kds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} \\ l \end{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \\ y = [I_{n \times n} \ 0_{n \times n}] z(t) = z_1 \end{cases} \quad (9)$$

3. DISEÑO DEL OBSERVADOR

El sistema en lazo cerrado de la estructura tipo edificio (9) se puede representar de la forma siguiente:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Dv \\ y = Cx \end{cases} \quad (10)$$

con las siguientes matrices:

$$A = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -M^{-1}K_{kps} & -M^{-1}C_{kds} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} \\ l \end{bmatrix}, \quad C = [I_{n \times n} \ 0_{n \times n}],$$

donde x es el estado; y la salida medible; A y C son las matrices de estado y de salida respectivamente, siendo el par (A, C) observable; D es la matriz de incertidumbre del sistema y $v(t) \in R$ es la entrada desconocida de las fuerzas externas, asumiendo ser una función acotada por el siguiente rango $-v_{min} \leq v(t) \leq v_{max}$ donde v_{min} y v_{max} son constantes positivas que pueden estar dentro de un rango conocido.

Considerando que se utiliza $\bar{v}(t) = \frac{v(t)}{v_{min}} + 2$, por lo que es muy fácil de apreciar que $1 \leq \bar{v}(t) \leq \rho$, donde el valor de $\rho = \frac{v_{max}}{v_{min}} + 2$. Sustituyendo se deduce que $\bar{D} = v_{min}D$.

Para el cálculo de las ganancias del observador se hará uso del complemento de Schur, el cual se escribe a continuación:

Lema 1. Complemento de Schur se conforma de una matriz conformadas por submatrices. Suponiendo que A , B y C son matrices de orden $p \times p$, $p \times q$, $q \times p$ respectivamente. Sea una matriz simétrica dada por:

$$X = \begin{bmatrix} A & B \\ B^T & C \end{bmatrix}$$

sea X/C el complemento de Schur de C en X

$$X/C = A - BC^{-1}B^T$$

Obteniendo de los términos anteriores se demuestra que

$$u^T Au + 2v^T B^T u + v^T C v$$

Ahora, el sistema (10) puede ser escrito de la siguiente forma:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + \bar{D}\bar{v} - 2\bar{D} \\ y = Cx \end{cases} \quad (11)$$

Teniendo el observador propuesto como:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} - \ell(C\hat{x} - y) - 2\bar{D} \quad (12)$$

A partir de las ecuaciones (10) y (12) se puede definir el error de observación como $\tilde{x} = \hat{x} - x$, que permite tener la siguiente dinámica de error:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= A\hat{x} - \ell C\hat{x} + \ell Cx - Ax - \bar{D}\bar{v} \\ &= A(\hat{x} - x) - \ell C(\hat{x} - x) - \bar{D}\bar{v} \\ &= A\tilde{x} - \ell C\tilde{x} - \bar{D}\bar{v} \\ &= (A - \ell C)\tilde{x} - \bar{D}\bar{v} \end{aligned} \quad (13)$$

Con lo anterior es posible proponer el siguiente teorema:

Teorema 2. Considerando el sistema de la forma (10) se puede proponer un observador (12). Si existe un par (A, C) observable, se puede satisfacer la desigualdad:

$$\begin{bmatrix} \Lambda & S\bar{D} \\ \bar{D}^T S & -\alpha I \end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

donde $\Lambda = SA + A^T S - RC - C^T R^T$, permitiendo calcular la ganancia del observador $\ell = S^{-1}R^T$, logrando asegurar un error asintóticamente acotado a una región que depende de la cota inferior de v .

Prueba. Definiendo la ecuación de Lyapunov como $V = \tilde{x}^T S \tilde{x}$, donde $S^T = S > 0$, se logra la siguiente derivada de Lyapunov:

$$\dot{V} = \dot{\tilde{x}}^T S \tilde{x} + \tilde{x}^T S \dot{\tilde{x}} = 2\tilde{x}^T S \dot{\tilde{x}}$$

Sustituyendo la dinámica del error (13), se obtiene:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2\tilde{x}^T S ((A - \ell C)\tilde{x} - \bar{D}\bar{v}) \\ &= 2\tilde{x}^T S (A - \ell C)\tilde{x} - 2\tilde{x}^T S \bar{D}\bar{v} \\ &= \tilde{x}^T (S(A - \ell C) + (A - \ell C)^T S) \tilde{x} - 2\tilde{x}^T S \bar{D}\bar{v} \\ &\leq \tilde{x}^T \Lambda \tilde{x} + 2\tilde{x}^T S \bar{D}\bar{v} - \beta \bar{v}^T \bar{v} + \beta \rho \|\bar{v}\|^2 \\ \dot{V} &\leq \xi^T \bar{\Lambda} \xi + \beta \rho \|\xi\|^2 \end{aligned} \quad (15)$$

donde $\beta = \frac{1}{\alpha}$ y $\xi = [\tilde{x} \ \bar{v}(t)]^T$ y utilizando el complemento de Schur se obtiene

$$\bar{\Lambda} = \begin{bmatrix} \Lambda & S\bar{D} \\ \bar{D}^T S & -\alpha I \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

donde $\Lambda = S(A - \ell C) + (A - \ell C)^T S$.

Por lo que se puede reescribir la ecuación (15) como:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\lambda_{min}(\bar{\Lambda})\|\xi\|^2 + \alpha \rho \|\bar{v}\|^2 \\ &\leq -(\lambda_{min}(\bar{\Lambda}) - \alpha \rho)\|\xi\|^2 \end{aligned}$$

donde se debe satisfacer $\lambda_{min}(\bar{\Lambda}) - \alpha \rho \leq 0$; y para lograr los resultados se debe calcular $\rho \leq \frac{\lambda_{min}(\bar{\Lambda})}{\alpha}$. Los cálculos desarrollados demuestran el teorema.

4. RESULTADOS

Para validar el desempeño del control basado en observador diseñado para sistema lineales con entrada desconocida, se usa un caso particular de una estructura tipo edificio de dos pisos $n = 2$, teniendo como variable medible las posiciones de los dos pisos y la variable no medible las velocidades de los pisos; y además se asume una señal entrada desconocida inducida por una aceleración sísmica. Los datos de aceleración utilizados de la entrada desconocida son los registros del sismo de México en 1985. Los valores de las masas de los pisos, las constantes de resorte y amortiguador de cada piso se muestran en la siguiente tabla 1, los cuales son reportados por Morales-Valdez et al. (2018).

Tabla 1. Parámetros del sistema.

Constante	Valor
m_1	3.17 kg
k_1	9199.834 N/m
c_1	7.388 Ns/m
m_2	4.609 kg
k_2	7.388 N/m
c_2	6.834 Ns/m
k_d	510.57
k_p	1924.4
β	0.0001
v_{min}	1.53 m/s ²

Sustituyendo los valores de la tabla 1 en (2), (7) y (8), se obtiene:

$$M = \begin{bmatrix} 3.17 & 0 \\ 0 & 4.609 \end{bmatrix}, \quad K_{kps} = \begin{bmatrix} 16731 & -7532 \\ -7532 & 9456 \end{bmatrix},$$

$$C_{kds} = \begin{bmatrix} 14.222 & -6.834 \\ -6.834 & 6.517.404 \end{bmatrix}$$

La ecuación (10) se reescribe como:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \begin{bmatrix} 0_{n,n} & I_{n,n} \\ -M^{-1}K_{kds} & -M^{-1}C_{kds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{n,n} \\ I_{n,n} \end{bmatrix} v(t) \\ y(t) = [I_{n,n} \ 0_{n,n}] \hat{x}(t) \end{cases} \quad (17)$$

Por lo que el observador propuesto en (12) queda de la forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{n,n} & I_{n,n} \\ -M^{-1}K_{kds} & -M^{-1}C_{kds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} - \ell [I_{n,n} \ 0_{n,n}] (\hat{x} - x) - 2v_{min} \begin{bmatrix} 0_{n,n} \\ I_{n,n} \end{bmatrix} \quad (18)$$

donde $n = 2$ y definiendo cada una de las variables estimadas $\hat{x}_1 = [\hat{x}_1^1 \ \hat{x}_1^2]^T$ (desplazamientos en cada piso) y $\hat{x}_2 = [\hat{\dot{x}}_2^1 \ \hat{\dot{x}}_2^2]^T$ (velocidades en cada piso); las salidas medibles del sistema son los desplazamientos, es decir $\tilde{x}_1$, siendo el sistema alterado por una señal desconocida $v(t)$, que representa la señal sísmica.

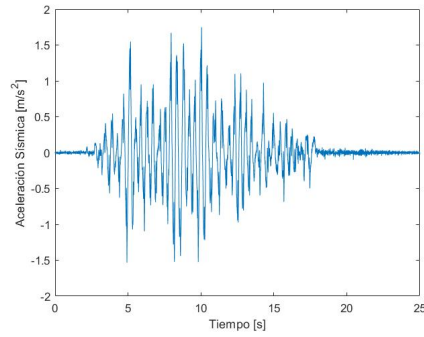


Fig. 2. Aceleración de la señal sísmica

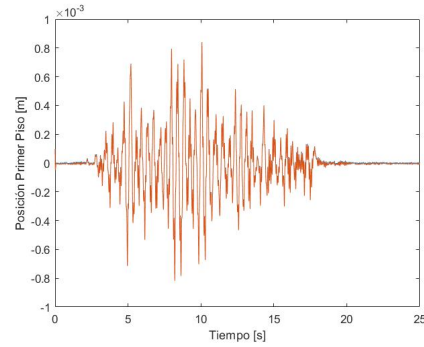


Fig. 3. Estimación de la posición del primer piso

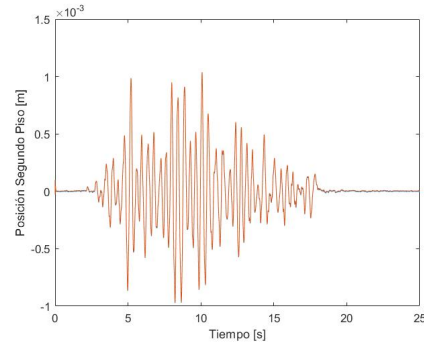


Fig. 4. Estimación de la posición del segundo piso

4.1 Simulación

Resolviendo la LMI (14) del teorema propuesto (15) para el modelo matemático (1), se encuentra que la ganancia ℓ calculada con un valor v_{min} , da como resultado:

$$\ell = 1 \times 10^6 \begin{bmatrix} 0.0010 & 0.0010 \\ 0.0007 & 0.0007 \\ 6.9351 & 7.4177 \\ 6.8089 & 7.2756 \end{bmatrix}$$

El control basado en observador de estado propuesto desempeña un buen comportamiento en la estimación y

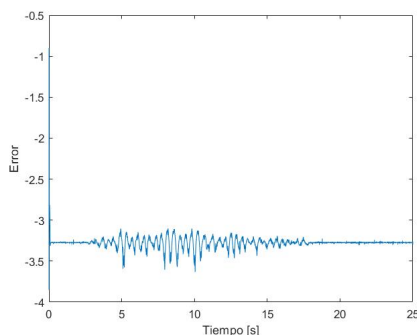


Fig. 5. Norma del error de estimación $\log_{10}||\tilde{x}||$

regulación del estado ante la presencia de la señal desconocida que representa la señal sísmica como se muestra en Fig. (2). Al ejercer este desplazamiento sísmico, las estimaciones de las posiciones $\hat{x}_1$, muestran una estimación asintótica del estado, esto se muestra en las Fig. (3) y Fig. (4), respectivamente, de cada uno de los niveles de la estructura, muestra un buen desempeño donde se observa en la Fig. (5), que el logarítmico de la norma del error $\tilde{x}$ decae a una región acotada, lo que demuestra el buen comportamiento del observador.

5. CONCLUSIÓN

El observador de estado mostró buena respuesta de convergencia y regulación a pesar de que la señal de entrada es desconocida y se comprobó sus resultados con un ejemplo particular para una estructura tipo edificio de dos niveles donde la estimación de posición fue comparada y mostró un error exponencial a cero. Esto fue posible ajustando las correspondientes regulaciones de los parámetros del sistema.

REFERENCIAS

- Arabha Najafabadi, A., Daneshjoo, F., and Ahmadi, H.R. (2020). Multiple damage detection in complex bridges based on strain energy extracted from single point measurement. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(3), 722–730.
- Astolfi, D., Postoyan, R., and Nešić, D. (2020). Uniting observers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 65(7), 2867–2882.
- Benallouch, M., Boutayeb, M., and Zasadzinski, M. (2012). Observer design for one-sided lipschitz discrete-time systems. *Systems & Control Letters*, 61(9), 879–886.
- Das, S., Saha, P., and Patro, S. (2016). Vibrationbased damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(3), 477–507.
- Dertimanis, V., Chatzi, E., Eftekhari Azam, S., and Papadimitriou, C. (2019). Input-state-parameter estimation of structural systems from limited output information. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 126, 711–746.
- Jian, Z., TanPing, and Fulin, Z. (2009). Seismic fragility analysis of masonry buildings based stochastic vibration. *World Congress on Computer Science and Information Engineering*, 6–9.
- Karafyllis, I., Ahmed-Ali, T., and Giri, F. (2020). A note on sampled-data observers. *Systems Control Letters*, 144.
- Krokavec, D. and Filasová, A. (2020). Interval observer design for uncertain linear continuous-time metzlerian systems. In *2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 1051–1056.
- Morales-Valdez, J., Alvarez-Icaza, L., and Concha, A. (2018). On-line adaptive observer for buildings based on wave propagation approach. *Journal of Vibration and Control*, 24(16), 3758–3778.
- Morales-Valdez, J., Lopez-Pacheco, M., and Yu, W. (2019). Detección de daño en edificios basada en datos de aceleración y redes neuronales convolucionales. *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático*, 145–150.
- Morales-Valdez, J., Alvarez-Icaza, L., and Concha, A. (2017). Observador adaptable para edificios bajo el enfoque de propagación de ondas. *Congreso Nacional de Control Automático*, 600–605.
- Nayek, R., Chakraborty, S., and Narasimhan, S. (2019). A gaussian process latent force model for joint input-state estimation in linear structural systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 128, 497–530.
- Rodríguez Torres, A., Morales-Valdez, J., and Yu, W. (2020). Modeling and proportional-derivative controller design for buildings based on vibration frequencies. In *2020-7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies*.
- Sayyaddelshad, S. and Gustafsson, T. (2015). h_∞ observer design for uncertain nonlinear discrete-time systems with time-delay: Lmi optimization approach. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 25(10), 1514–1527.
- Share Pasand, M.M. (2020). Luenberger-type cubic observers for state estimation of linear systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 34(9), 1148–1161.
- Xu, L., Cui, Y., and Wang, Z. (2020). Active tuned mass damper based vibration control for seismic excited adjacent buildings under actuator saturation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 135, 1–11.

Análisis de un Convertidor CD-CD Resonante con Alta Ganancia

*Carlos E. Domínguez Hernández, **Mario Ponce Silva

*Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México; email:
m20ce015@cenidet.tecnm.mx

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México; email:
mario.ps@cenidet.tecnm.mx

Resumen: En este artículo se muestra el análisis de un convertidor resonante LC paralelo elevador y se propone una metodología de diseño simple. Se valida con una simulación en Pspice con las siguientes especificaciones; Voltaje de entrada 24V, Voltaje de salida 220V, frecuencia de conmutación 500KHz y una potencia de 100W obteniendo un voltaje a la salida de 205V, una corriente de 423mA y una eficiencia de 87%. Debido a que este tipo de convertidores se puede operar en altas frecuencias esto reduce el tamaño de los elementos magnéticos y presenta una conmutación suave.

Palabras clave: convertidor cd-cd, convertidor resonante

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los temas de mayor importancia dentro de la electrónica de potencia es la conversión de la energía eléctrica de CD-CD. Los convertidores CD-CD son esenciales en la actualidad, pues son utilizados como fuentes de alimentación en la mayoría de los dispositivos electrónicos. Un tipo de este convertidor son los convertidores resonantes, estos son circuitos compuestos por inductores y capacitores, los cuales son diseñados para operar a la frecuencia de resonancia pues en ese estado de operación las reactancias capacitivas como las inductivas se anulan y el circuito se comporta completamente resistivo, llevando así la máxima transferencia de energía desde una fuente de alimentación hasta la carga resistiva.

Actualmente hay trabajos reportados donde usan esta topología para aplicaciones fotovoltaicas como los presentados en la siguiente literatura; Kong, Zhao et al. (2011), York, Yu et al. (2012), Salem, Jusohet al. (2017), Pandey and Agnihotri (2019) pero muy pocos muestran el análisis de un tanque resonante LC paralelo con alta ganancia, sólo en De Oliveira Brioschi and Vieira (1998) presenta el diseño de un tanque LC paralelo para la alimentación de lámparas fluorescentes, en este artículo se presenta una metodología de diseño simple y se analiza una topología de convertidor presentada en la Fig. 1

2. ANÁLISIS DE CIRCUITO RESONANTE

2.1 Análisis del tanque resonante

Muchos de los trabajos reportados muestran una metodología de diseño diferente sin embargo en este apartado se desarrolla el análisis del convertidor resonante desde una perspectiva simple, en Kazimierczuk and Czarkowski (2012) hace un análisis muy detallado pero un poco complejo. Una forma en la que se aborda el análisis en este artículo es reducirlo a uno equivalente como el mostrado en la Fig. 2

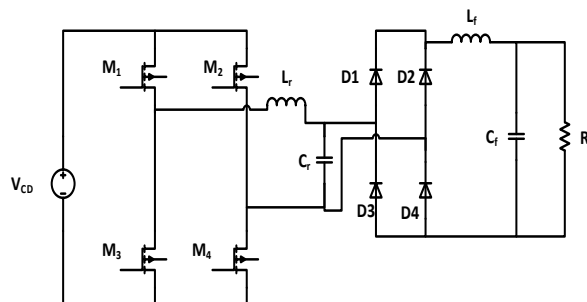


Fig. 1 convertidor cd-cd puente completo resonante

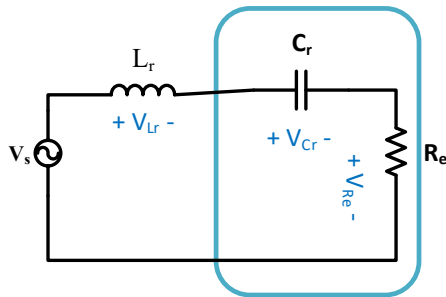


Fig. 2 Circuito equivalente del tanque resonante

Se analiza con una fuente de alterna pues se considera que el tanque resonante tiene un factor de calidad alto y solo deja pasar la fundamental de la señal cuadrada a la salida del inversor. A partir del circuito equivalente se obtiene una impedancia equivalente (1), a esta ecuación se le aplica el conjugado para separar una parte real de la imaginaria y así obtener (3) y (4)

$$Z_e = \frac{R_e - jX_{cr}}{R_e - jX_{cr}} \quad (1)$$

$$Z_e = \frac{X_{cr}^2 R_e - jX_{cr} R_e^2}{R_e^2 + X_{cr}^2} \quad (2)$$

$$R_{eq} = \frac{X_{cr}^2 R_e}{R_e^2 + X_{cr}^2} \quad (3)$$

$$X_{Cse} = \frac{X_{cr} R_e}{R_e + X_{cr}^2} \quad (4)$$

Posterior a esto se calcula la ganancia total del circuito

$$M = \frac{V_R}{V_i} = \frac{R_{se} - jX_{cse}}{R_{se} + j(X_L - X_{cse})} \quad (5)$$

Despejando X_L de la ecuación de factor de calidad y sustituyéndola en (5)

$$X_L = QR_{se} \quad (6)$$

$$M^2 = \frac{V_R}{V_i} = \frac{\sqrt{R_{se}^2 + X_{Cse}^2}}{\sqrt{R_{se}^2 + (QR_{se} - X_{Cse})^2}} \quad (7)$$

$$\frac{X_{ce}}{R_E} = \frac{X_c R^2}{X_c^2} = \frac{R}{X_c} \quad (8)$$

$$M^2 = \frac{1 + \left(\frac{R}{X_c}\right)}{1 + \left(Q - \frac{R}{X_c}\right)} \quad (9)$$

La frecuencia de resonancia

$$\omega^2 = \frac{1}{LC_{se}} \quad (10)$$

Sustituyéndola en (9) y manipulando se tiene la ecuación que denota la ganancia total.

$$M = \sqrt{Q^2 + 1} \quad (11)$$

Para la ganancia del tanque resonante se tiene la siguiente ecuación

$$M_t = \pi^2 \left(\frac{V_F}{4V_{cd}} + \frac{M}{8} \right) \quad (12)$$

Cálculo de la resistencia equivalente del rectificador

$$R_e = \frac{\pi^2}{8\eta_r R} \quad (13)$$

2.2 FILTRO DE SALIDA

Ahora se realizará el cálculo del filtro de salida para tener una señal “plana” se aplica un filtro como se muestra en la Fig. 3, tradicionalmente el cálculo de este filtro se hace dándole un valor al capacitor y posteriormente despejar el valor del inductor de (10) Malvino and Bates (1991), sin embargo se abordará de diferente manera dividiéndolo en dos, primero calculando el inductor.

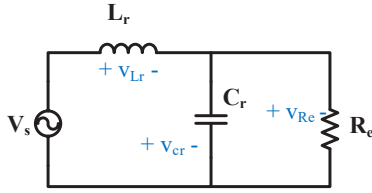


Fig. 3 Filtro a la salida del convertidor CD-CD resonante

2.2.1 Cálculo del inductor

Se recurre a

Fig. 4 aquí se considera que el voltaje que sale del puente de diodos es igual al de la salida del tanque resonante, pero rectificado por lo cual se puede denotar por (14)

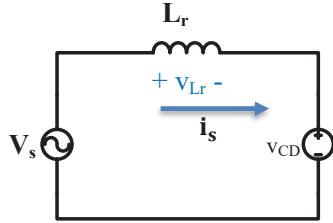


Fig. 4 circuito equivalente para el cálculo del inductor

$$v_o = v_o \sin(\omega t) \quad (14)$$

$$v_{lf} = v_o - V_R = L_f \frac{di_{lf}}{dt} \quad (15)$$

Evaluado de $\pi - \theta_c$ a θ_c

$$\Delta i_{lf} = \frac{1}{\omega L} \int_{\theta_c}^{\pi - \theta_c} \left(V_R \frac{\pi}{2} \sin \theta - V_R \right) d\theta \quad (16)$$

$$\frac{V_R}{\omega L} = \int_{\theta_c}^{\pi - \theta_c} \left(\frac{\pi}{2} \sin \theta - 1 \right) d\theta \quad (17)$$

$$\Delta i_{lf} = \frac{V_R}{\omega L} \left(-\theta - \frac{\pi}{2} \cos \theta \right) \quad (18)$$

Sustituyendo los límites para evaluar

$$\frac{V_R}{\omega L} = \left[\frac{\pi}{2} \cos \theta_c - \frac{\pi}{2} \cos(\pi - \theta_c) + 2\theta_c - \pi \right] \quad (19)$$

$$\Delta i_{lf} = \frac{0.6613 V_{R_c}}{2\pi f L_f} \quad (20)$$

$$L \geq \frac{10.52 R_c}{\% i_{lf} f} \quad (21)$$

2.2.2 Cálculo del capacitor

Una forma de ver al capacitor y la resistencia de salida es como un filtro pasa bajas Fig. 5, a partir de este circuito se obtiene la ganancia del mismo la cual se denota por (22)

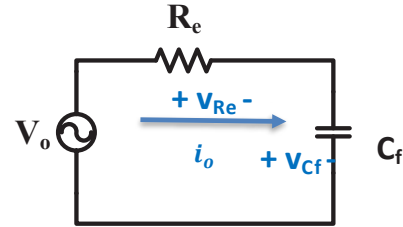


Fig. 5 circuito equivalente para el cálculo del capacitor

$$M = \frac{1}{\sqrt{R_c^2 \omega^2 C_f^2 + 1}} \quad (22)$$

$$C_f = \sqrt{\frac{\frac{1}{M^2} - 1}{\omega^2 R_c^2}} \quad (23)$$

Se propone un valor de ganancia igual a 0.1 lo cual es suficiente para reducir el contenido armónico para así tener la ecuación del capacitor de filtrado a la salida

$$C_f \geq \sqrt{\frac{99}{(2\pi f)^2 R_c^2}} \quad (24)$$

3. DISEÑO DEL CIRCUITO

Tabla 1 Condiciones de diseño

Variable	Símbolo	Valor
Potencia	P	100 W
Voltaje de alimentación	V	24 V
Frecuencia	f	500 KHz
Porcentaje del rizo en el inductor	% i_{lf}	10%
Voltaje de salida	V_R	220 V
Caída de voltaje en los diodos	V_F	0.7 V

Cálculo de la ganancia total

$$M = \frac{V_o}{V_i} = 9.16 \quad (25)$$

Cálculo del factor de calidad

$$Q = \sqrt{M^2 - 1} = 11 \quad (26)$$

Ganancia del tanque

$$M_t = \pi^2 \left(\frac{V_F}{4V_{cd}} + \frac{M}{8} \right) = 11 \quad (27)$$

Resistencia de carga

$$R_C = \frac{V_o^2}{P} = 484\Omega \quad (28)$$

Resistencia equivalente del rectificador

$$R_e = \frac{\pi}{8\eta} R_C = 609.29\Omega \quad (29)$$

Cálculo del condensador

$$C = \frac{Q}{\omega R_{se}} = 5.74nF \quad (30)$$

Cálculo de R_{eq}

$$R_{eq} = \frac{X_c^2 R_e}{R_e^2 + X_c^2} = 5\Omega \quad (31)$$

Cálculo de la inductancia resonante

$$L_r = \frac{Q R_{eq}}{\omega} = 17.52\mu H \quad (32)$$

Cálculo del inductor de salida

$$L_f \geq \frac{10.52 R_C}{\%i_{lf} f} = 224mH \quad (33)$$

Cálculo del capacitor de salida

$$C_f \geq \sqrt{\frac{99}{(2\pi f)^2 R^2}} = 6.5nF \quad (34)$$

4. RESULTADOS

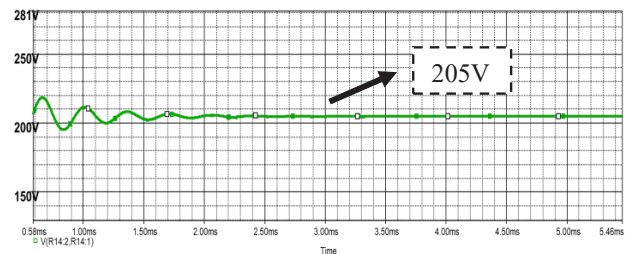


Fig. 6 Voltaje a la salida del convertidor cd-cd resonante

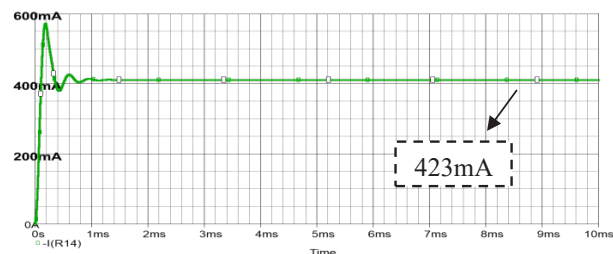


Fig. 7 Corriente a la salida del convertidor cd-cd resonante

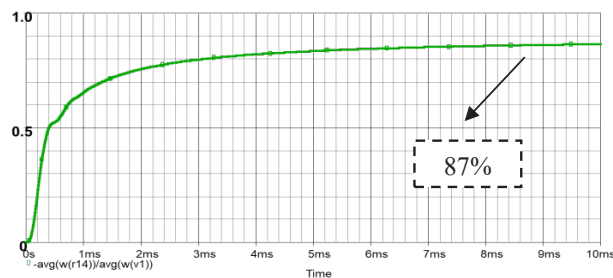


Fig. 8 Eficiencia del convertidor

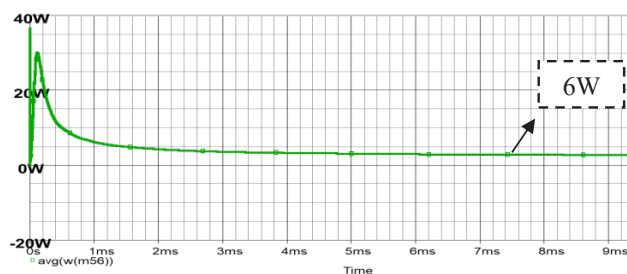


Fig. 9 Pérdidas en el MOSFET

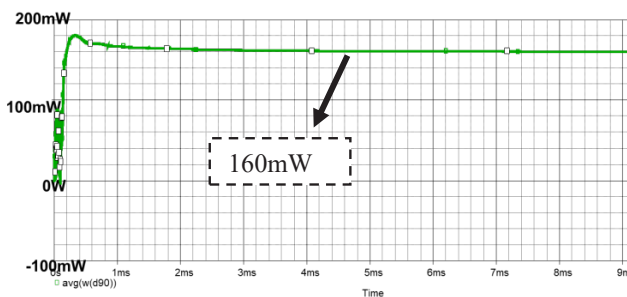


Fig. 10 Pérdidas en los diodos

La Fig. 6 muestra el voltaje de salida la cual tiene un valor de 205V el valor teórico fue de 220V (hay 15 V de diferencia). En la Fig. 9 se observan las pérdidas en los MOSFET las cuales son de 6W. Los MOSFET empleados son los IRF540 y los diodos los MUR105, la eficiencia obtenida es del 87% mostrado en la Fig. 8 la cual es baja comparada con un convertidor Boost, esto se debe a las pérdidas obtenidas en los MOSFET y diodos, en Rodríguez-Benítez, Ponce-Silva et al. (2020) se presenta un estudio sobre las razones de la baja eficiencia de los convertidores resonantes alimentados por corriente y compara el uso de semiconductores típicos con semiconductores de nitruro de galio y carburo de silicio logrando una considerable reducción de las pérdidas por conmutación. La potencia que llega a la carga es de 88W (Valor teórico de 100W).

5. CONCLUSIÓN

Se analizó un convertidor CD-CD elevador basado en un convertidor resonante elevador, esta topología por sí sola ha sido poco reportada y aplicada a la alimentación de balastos sin embargo con el uso como convertidor puede aplicarse a sistemas fotovoltaicos agregándole una etapa inversora y cambiando los dispositivos semiconductores para aumentar la eficiencia. La metodología de diseño se aborda de una forma simple comparada con las reportadas actualmente y como se demostró en las simulaciones se logra obtener valores cercanos al deseado logrando observar que las mayores pérdidas existentes están en los MOSFET.

REFERENCIAS

- F. Vieira, J., & De oliveira Brioschi, R. (1998). High-Power-Factor Electronic Ballast with Constant DC-Link Voltage. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 1030-1037.
- Kong, P., Zhao, J., & Xing, Y. (2011). Series-parallel resonant high frequency inverter for standalone hybrid PV/wind power system. *Elsevier*, 1090-1097.
- Rodríguez-Benítez, O., Ponce Silva, M., Aquí Tapia, J., Claudio Sánchez, A., Vela Valdes, L., Lozoya Ponce, R., & Cortés García, C. (2020). Comparative Performance and Assessment Study of a Current-Fed DC-DC Resonant Converter Combining Si, SiC, and GaN-Based Power Semiconductor Devices. *Electronics*, 1-22.
- York, B., Yu, W., & Sheng Lai, J. (2013). An integrated boost resonant converter for photovoltaic applications. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 28(3), 1199-1207.
- Alexander, C., & Sadiku, M. (2006). *Fundamentos de circuitos eléctricos*. McGraw Hill.
- Briosch, R., & Vieira, J. (1997). High-power-factor electronic ballast with constant DC-link voltage. *IEEE*, 80-85.
- Kazimierczuk, M., & Czarkowski, D. (2012). *Resonant power converters*. John Wiley & Sons.
- Malvino, A., & Bates, D. (1991). *Principios de electrónica*. McGraw-Hill.
- Pandey, P., & Agnihotri, P. (2019). An Efficient LLC Resonant Converter Design for Photovoltaic Application. *8th International Conference on Power Systems (ICPS)*, IEEE.
- Salem, M., Jusoh, Nik Idris, N., Sutikno, T., & Yonis Buswig, Y. (2017). Phase-shifted series resonant converter with zero voltage switching turn-on and variable frequency control. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 8(3), 1184-1192.

Control de Trayectorias para un Robot Diferencial^{*}

Borraz-De Paz, A. * Darías-Hernández, H. *
Morales-Ramos, H. * Lopez-Estrada, F. *
Zepeda-Hernández, J. *

** Tecnológico Nacional de México/ IT Tuxtla Gutiérrez,
TURIX-Dynamics Diagnosis and Control Group, Carretera
Panamericana Km 1080, CP 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
(e-mail: M08270643@tuxtla.tecnm.mx).*

Resumen: En este trabajo se desarrolla la caracterización de motores de corriente directa mediante encoders magnéticos para utilizarlos como actuadores en la construcción de un robot móvil diferencial. Se obtiene el modelo cinemático de dicho robot y en relación con este se implementa un esquema de control en cascada para seguimiento de trayectorias basado en el enfoque de Lyapunov para convergencia asintótica del error. La simulación es realizada en un entorno virtual desarrollado en python y las pruebas experimentales en un sistema embebido (Arduino nano) el cual mediante un módulo bluetooth (HC-05) se comunica con un ordenador. Los resultados demuestran la efectividad del controlador.

Palabras clave: Robot diferencial, seguimiento de trayectoria, Modelado dinámico, sistemas embebidos.

1. INTRODUCCIÓN

Los robots móviles de acción diferencial (WMR, siglas en inglés), debido a su capacidad de autonomía es un tema de actual interés. Se clasifican según el número de ruedas y el grado de libertad que presentan Blažič (2013); la forma más común es construirlos utilizando dos ruedas de tracción diferencial con una o dos ruedas de equilibrio libre, para convertirlo en un mecanismo no holonómico debido a las restricciones de rodadura Shojaei et al. (2011). Sus aplicaciones son varias, presentan ventajas de configuración simple, implementación sencilla y capacidad de cambiar su orientación variando las velocidades angulares en sus dos ruedas motrices, sin ningún mecanismo de dirección adicional Wu et al. (2019); Mathew and Hiremath (2019). El interés sobre el control de los WMR se ve incrementado, debido a que juega un papel importante en el proceso de diseño y desarrollo del mismo, la capacidad de trabajo de un robot móvil depende del rendimiento de su controlador. El objetivo de control es lograr la estabilización y el seguimiento de trayectoria Do Khac Tiep et al. (2018). Esto, plantea un desafío entre la comunidad de control de robots, exploración espacial aeronáutica, inspección de centrales nucleares y agricultura automatizada, motivando el interés en la robótica móvil Wu et al. (2019). Existe apoyo de diferentes métodos para desarrollar modelos matemáticos de los WMR, como: métodos de Lagrange y Newton. Contemplando que la mayoría de los controles

para aplicaciones de seguimiento de trayectorias conocidos actualmente en la literatura, están basados en la cinemática Petrov and Georgieva (2018). Los controladores no lineales son los más utilizados en el control de robot móvil de accionamiento diferencial Mathew and Hiremath (2019). En este trabajo se diseña un robot móvil diferencial utilizando un sistema embebido basado en arduino. Para lograr el seguimiento adecuado de trayectoria se propone un sistema de control en cascada, considerando controladores Proporcionales Integrales Derivativos (PID) para las velocidades de los motores y control basado en Lyapunov para el seguimiento de la trayectoria deseada. Finalmente, los controladores se prueban sobre una plataforma experimental para demostrar la efectividad del mismo.

El documento presentado en la la Sección 2, explica el planteamiento del problema, definiendo la idea central de la investigación. La Sección 3, desarrolla el esquema de control en cascada, presentando el modelado matemático, diseñando los controladores PID de los motores y el controlador de seguimiento de trayectoria para el robot. En la Sección 4 se analizan los resultados para las condiciones iniciales planteadas, considerando gráficas del error de trayectoria y comparación de velocidades de referencia con velocidades reales medidas. Finalmente en la Sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo y propuestas de trabajos futuros.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la Fig. 1., se muestra el diagrama esquemático del sistema, integrado de una unidad central de procesamiento (arduino) que servirá como sistema embebido para el control

^{*} Link del robot diferencial experimental
<https://www.youtube.com/watch?v=BMmqgUuUwAY>

de los motores (giro, velocidad y posición), permitiendo la comunicación con el circuito integrado (L298N) brindando la potencia necesaria en la activación de cada uno de los motores. Dichos motores traen integrados encoders magnéticos, que indican a la unidad de procesamiento las variables a controlar. La unidad de procesamiento se comunica con un ordenador mediante un módulo bluetooth (HC-05) para recibir y transmitir la trayectoria realizada. El sistema cuenta con una alimentación de 12 Volts que lo provee la batería LiPo, es necesario vigilar que el voltaje no disminuya de valores aceptables para su correcto funcionamiento, lográndose mediante una alarma (zumbador) que tiene la función de emitir una alerta cuando la batería disminuye hasta 10.5 Volts.

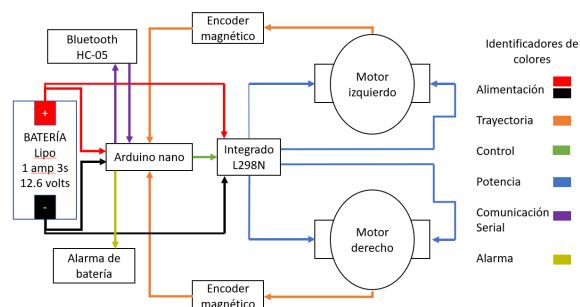


Fig. 1. Diagrama eléctrico de bloques

Uno de los elementos más importantes en el diseño del vehículo son la selección adecuada de los motores, contemplando las siguientes especificaciones técnicas:

- Voltaje de alimentación: 12V
- Relación de reducción: 34:1
- Velocidad sin carga a 12V: 350rpm
- Pulsos por revolución del eje: 11
- Ticks por revolución (34X11): 374

Bajo estas especificaciones las velocidades máximas alcanzadas por el motor son $\omega = 250 \text{ rpm}$ para la velocidad angular y $\mu = 26 \text{ rad/s}$ para la velocidad lineal manteniendo un factor de seguridad de 1.4.

Debido a la tracción diferencial es posible trasladarse en línea recta si ambas ruedas contemplan la misma velocidad angular, incluyendo el contacto de las ruedas con el terreno no es el mismo en ambas ruedas, produciéndose un deslizamiento y la variación de las velocidades angulares; problema a ser solucionado con un sistema de control que permita variar las velocidades hasta lograr una estabilidad del robot Valencia et al. (2009). El objetivo del control es lograr que el sistema sea estable, al ser orientado y posicionado con el mínimo error de seguimiento. Buscando la autonomía (al no necesitar un operador) para controlar la aceleración, posición y orientación al trasladarse de un punto A a otro B o seguir una trayectoria definida para realizar diferentes tareas, indicadas de manera eficiente por la ruta a seguir como se muestra en la Fig. 2.

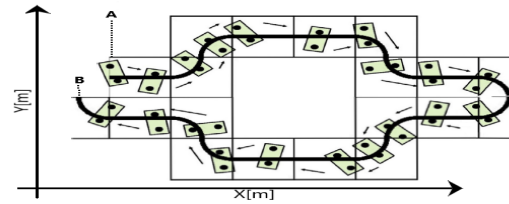


Fig. 2. Trayectoria establecida

3. ESQUEMA DE CONTROL EN CASCADA

Para lograr el seguimiento adecuado de trayectoria se plantea un esquema de control en cascada como se muestra en el diagrama de la Fig. 3. Como primera etapa se diseña un control PID para los motores identificada en la Fig. 3., cuyo objetivo es brindar la acción de control a los actuadores del robot para asegurar las velocidades angulares (ω_r, ω_l) y lineales (μ_r, μ_l) necesarias en cada motor. La segunda etapa se diseña un controlador para el robot considerando el modelo cinemático del mismo. Ilustrándose en el bloque denominado control de trayectoria del diagrama de la Fig. 3. Este controlador brinda las velocidades globales (μ, ω) a seguir por el robot hasta lograr la trayectoria deseada (etapa 3) y después del acondicionamiento de señal debe aportar la referencia a los controles PID.

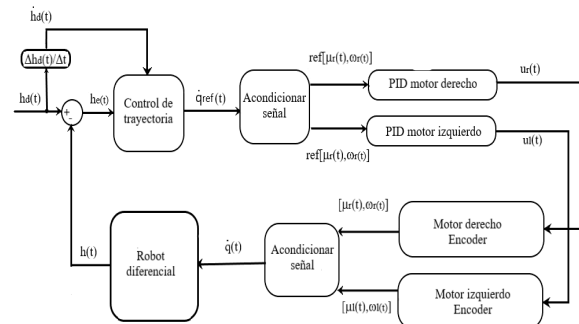


Fig. 3. Diagrama en bloques para el control en cascada.

3.1 Control de los Motores

El modelo del motor se representa en (1) representando el sistema de primer orden con retardo.

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

y en tiempo discreto sería la mostrada en:

$$p_v(k) = \begin{cases} 0 & 0 \leq kt_s < L \\ K(1 - e^{-(\frac{kt_s - L}{\tau})})\Delta c_v & kt_s \geq L \end{cases} \quad (2)$$

donde K es la ganancia, τ es la constante de tiempo en lazo abierto y L es el retardo.

Ingresando los valores, una entrada PWM (C_v) del 40% a los 3 segundos, en el algoritmo desarrollado en python se obtiene la respuesta de velocidad angular (P_{vreal}) de un motor individual como se observa para obtener los valores de K , L y τ , como respuesta en lazo abierto del motor como

se indica en la Fig. 4.

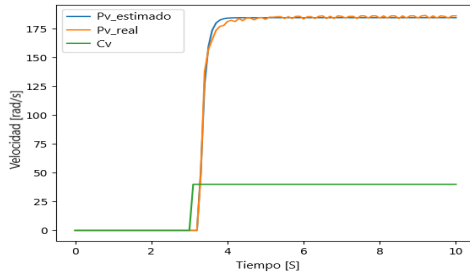


Fig. 4. Respuesta en la lazo abierto del motor.

Como son,

$$K = 4.6176 \quad \tau = 0.1192 \quad L = 0.1613$$

Estos valores se obtienen del algoritmo, utilizando el método de identificación de valores a partir de la curva de reacción del proceso Alfaro (2006), para el diseño del controlador PID representado en (3) y apoyado en el algoritmo desarrollado en python, se utiliza el método de sintonía Lambda Korsane et al. (2014); Hägglund (2019) por que no produce sobrepicos en su respuesta.

$$G(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (3)$$

El valor calculado de dichas constantes son los mostrados en

$$K_p = 0.10 \quad T_i = 0.20 \quad T_d = 0.05$$

donde K_p es la ganancia proporcional de controlador, T_i es el tiempo de integración y T_d es el tiempo derivativo. Para obtener un mejor sintonía se ajustan las ganancias obtenidas siguiendo las siguientes reglas:

- Aumentando la ganancia proporcional se hace más rápido el sistema, afectando la estabilidad.
- Si se disminuye el tiempo de integración disminuye el error de estado estacionario, afectando la estabilidad.
- Aumentando el tiempo derivativo se logra mejorar la estabilidad.

Luego, realizando variaciones en dichas ganancias se obtienen los valores siguientes $K_p = 0.20$, $T_i = 0.18$, $T_d = 0.06$, y con ellos la respuesta observada en la Fig. 5.

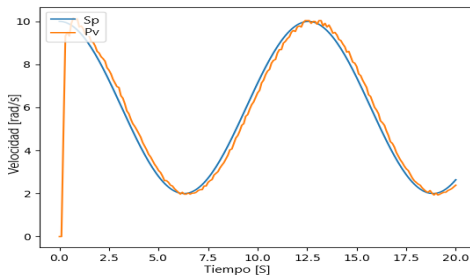


Fig. 5. Respuesta del sistema en lazo cerrado después de variar las ganancias.

3.2 Modelo Cinemático Robot Diferencial

Modelo Cinemático Diferencial

Un modelo cinemático se utiliza para encontrar la relación entre las velocidades del punto de interés $h_{x,y}$ y las velocidades de los actuadores, distinguidas en la Fig. 6. Considerando el punto de interés desplazado ($h_x = x_1 + (x_2 - x_1)$, $h_y = y_1 + (y_2 - y_1)$) como se muestra en la Fig. 6.

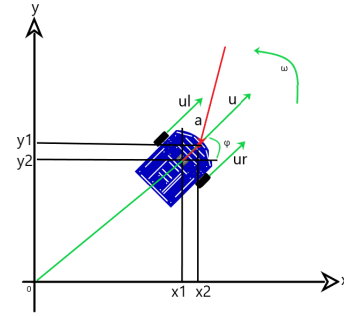


Fig. 6. Diagrama de cuerpo libre robot diferencial con punto de interés desplazado.

se obtiene:

$$h_x = x_1 + a \cos \varphi \quad h_y = y_1 + a \sin \varphi$$

$$\begin{aligned} \dot{h}_x &= \mu \cos \varphi - a\omega \sin \varphi \\ \dot{h}_y &= \mu \sin \varphi + a\omega \cos \varphi \\ \dot{\varphi} &= \omega \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_x \\ \dot{h}_y \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -a \sin \varphi \\ \sin \varphi & a \cos \varphi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde $\dot{h}_x$ y $\dot{h}_y$ son las velocidades del robot con respecto a los ejes de coordenadas, $\dot{\varphi}$ es el ángulo que brinda la orientación del robot respecto al eje de coordenada horizontal, a es la distancia que tiene el punto de interés con respecto al centro del eje de los motores, μ y ω son las velocidades lineales y angulares respectivamente del robot.

Relaciones entre las Velocidades

En las secciones anteriores se discutió de velocidades globales (angulares ω y lineales μ), para la aplicación en el robot experimental es necesario relacionar estas velocidades globales con la velocidad de cada uno de los motores (motor derecho μ_r , motor izquierdo μ_l), con esto nos permite calcular las velocidades globales ω y μ del robot en función a las velocidades de los motores μ_r y μ_l y viceversa. Las velocidades globales están representadas por:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\mu_r + \mu_l}{2} & \omega &= \frac{\mu_r - \mu_l}{D} \\ \begin{bmatrix} \mu \\ \omega \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{D} & -\frac{1}{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_r \\ \mu_l \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

Las velocidades de los motores de la rueda izquierda y derecha por:

$$\mu_r = \mu + \frac{D\omega}{2} \quad \mu_l = \mu - \frac{D\omega}{2}$$

$$\begin{bmatrix} \mu_r \\ \mu_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{D}{2} \\ 1 & -\frac{D}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu \\ \omega \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mu_r = R\omega_r \quad \mu_l = R\omega_l \quad (8)$$

donde D es la distancia entre las dos ruedas, R es el radio de las ruedas, ω_r y ω_l son las velocidades angulares de la rueda derecha e izquierda, respectivamente.

Esta equivalencia es muy importante, puesto que el modelo cinemático (5) considera la velocidad global o total del vehículo y no las velocidades individuales de cada rueda.

3.3 Control de Seguimiento de Trayectoria

El objetivo es determinar un conjunto de velocidades $\dot{q}(t)$ que reproduzca la trayectoria deseada donde:

$$\dot{q}(t) = J^{-1}\dot{h}(t) \quad (9)$$

donde $\dot{q}(t)$ es el vector de velocidades globales, $\dot{h}(t)$ es el vector de velocidades respecto al eje de coordenadas y el valor de J es la matriz de desacoplamiento (5).

Error de trayectoria

$$h_e = h_d - h$$

$$\dot{h}_e = \dot{h}_d - \dot{h} \quad (10)$$

Despejando $\dot{h}$ y sustituyendo en (9) obtenemos:

$$\dot{q} = J^{-1}(\dot{h}_d - \dot{h}_e) \quad (11)$$

Control de Trayectoria

Partiendo de (11), contemplado que la trayectoria deseada es variante en el tiempo, se propone un controlador de la forma (12) Xie et al. (2018) y Cornejo et al. (2018):

$$\dot{q}_{ref} = J^{-1}(\dot{h}_d + K h_e) \quad (12)$$

Si el modelo matemático de robot es $\dot{h} = J\dot{q}$ y asumiendo el seguimiento perfecto $\dot{q} = \dot{q}_{ref}$ y sustituyendo (12) en el modelo matemático se obtiene que

$$\dot{h} = J J^{-1}(\dot{h}_d + K h_e) \quad (13)$$

y sustituyendo (10) en la ecuación anterior se tiene:

$$\dot{h}_e = -K h_e \quad (14)$$

por lo tanto aplicando la función de Lyapunov como la mostarda en (15) se garantiza la convergencia asintótica a 0 del error de trayectoria.

$$V(h_e) = \frac{h_e^T h_e}{2} \quad \dot{V}(h_e) = h_e^T \dot{h}_e, \quad (15)$$

con

$$\dot{V}(h_e) = -h_e^T K h_e < 0 \quad (16)$$

donde K es una matriz de ganancia diagonal definida positiva.

Control de Seguimiento de Camino

Un camino es una trayectoria que no depende del tiempo, es una sucesión de líneas que unen puntos en el espacio o plano Dòria-Cerezo et al. (2019). Por ello se considera que $\dot{h}_d \neq \dot{p}_d$ como se observa en la Fig. 9.

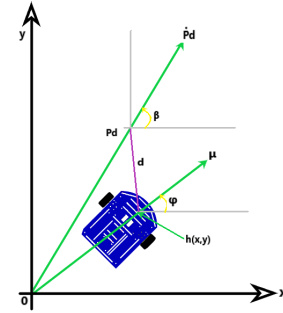


Fig. 7. Dinámica de seguimiento de camino

donde

$$|\dot{p}_d| = \mu_{max}$$

$$\dot{p}_x = |\dot{p}_d| \cos \beta$$

$$\dot{p}_y = |\dot{p}_d| \sin \beta \quad (17)$$

y

$$d = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (18)$$

siendo

$$\Delta x = p_x - h_x$$

$$\Delta y = p_y - h_y \quad (19)$$

donde p_d es el punto deseado, β es la orientación de dicho punto con respecto a la horizontal, μ_{max} será la velocidad máxima que alcanzará el robot y d es la distancia que hay entre el punto deseado y la posición del punto de interés del robot. Luego, partiendo de (12) tenemos que la nueva ley de control será:

$$\dot{q}_{ref} = J^{-1}(\dot{p}_d + K h_e) \quad (20)$$

Asumiendo la función de Lyapunov (15), la (10) y definiendo el error de velocidades ($\dot{\delta}_e$) como

$$\dot{\delta}_e = \dot{h}_d - \dot{p}_d \quad (21)$$

se tiene que

$$\dot{V}(h_e) = -h_e^T K h_e + h_e^T \dot{\delta}_e \quad (22)$$

Donde:

$$|h_e^T K h_e| > |h_e^T \dot{\delta}_e| \quad (23)$$

Para que se cumpla la convergencia asintótica a 0 de los errores se tiene que cumplir que la matriz de ganancia diagonal K sea

$$K = \frac{|\dot{\delta}_e|}{|h_e|} \quad (24)$$

donde $|\dot{\delta}_e|$ y $|h_e|$ son los valores absolutos de los elementos del vector de error de velocidad y del vector de error de trayectoria respectivamente.

4. RESULTADOS

Para el control de seguimiento se seleccionaron las formas tipo “Lemniscata de Geronó”, Fig. 8., y una trayectoria

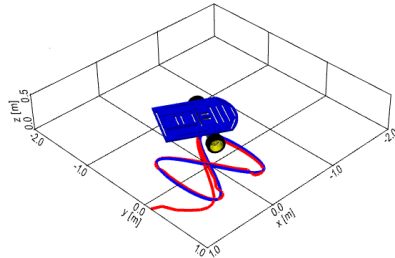


Fig. 8. Trayectoria “Lemniscata de Geronó”.

no dependiente del tiempo definida por puntos, Fig. 9. El

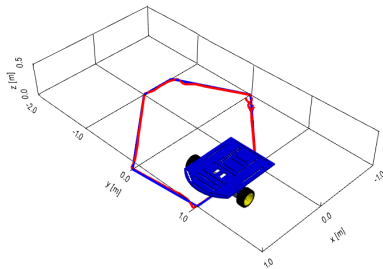


Fig. 9. Trayectoria basada en puntos.

tiempo de simulación en todos los casos es de $t_f = 60$ segundos, el tiempo de muestreo $t_s = 0.1$ segundos y la distancia desde el centro del eje de las ruedas al punto de interés es de $a = 0.1$ m. Para la trayectoria tipo “Lemniscata de Geronó” las condiciones iniciales propuestas fueron $[1; 0; 90]$ y en el caso de la trayectoria de puntos es $[-1; 0; 0]$. En los dos controladores la matriz diagonal de ganancia K inicialmente se tomó como la matriz identidad y se fue variando a prueba y error hasta obtener los desempeños mostrados en los resultados con el valor siguiente:

$$K = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Para analizar el error para la trayectoria tipo “Lemniscata de Geronó”, Fig. 10., existen trayectorias que por sus limitaciones de construcción del robot se dificultan seguir con exactitud y esta es una. Es importante mencionar que pese a estas variaciones del error, el valor de esta se encuentra en el intervalo $(-0.1; 0.1)$ m, siendo un valor aceptable dado que las velocidades globales del robot (μ, ω) medidas siguen eficientemente a las velocidades de referencia del controlador de seguimiento de trayectoria, Fig. 11., y que el ocho ha sido realizado bastante bien como se observa en la Fig. 8.

Observando la Fig. 9., seguimiento de trayectoria basado en puntos unidos por líneas, se realiza la trayectoria satisfactoriamente, lo que es posible asegurar apreciando la Fig. 12., donde se muestra el error de convergencia; este no supera los valores de 0.07 m y esto está dado en los puntos

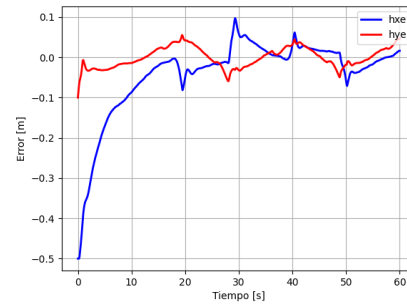


Fig. 10. Error de trayectoria tipo “Lemniscata de Geronó”.

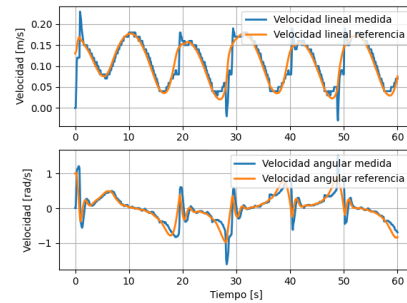


Fig. 11. Velocidades de trayectoria tipo “Lemniscata de Geronó”.

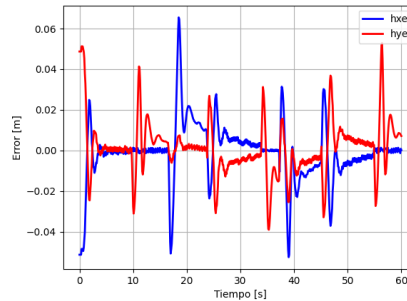


Fig. 12. error de trayectoria basado en puntos.

donde hay cambios abruptos en la trayectoria trazada. En la Fig. 13., las velocidades de referencia son seguidas y se mantienen en valores perfectamente alcanzables por robot, cabe mencionar que en el caso de este controlador aparece un parámetro de velocidad lineal máxima el cual fue acotado a 0.15 m/s observable en la figura antes mencionada donde la velocidad lineal de referencia no supera dicho valor.

5. CONCLUSIONES

Basados en los resultados obtenidos, los controladores se diseñaron de forma correcta, cumpliendo con el objetivo de seguir las trayectorias determinadas, tipo “Lemniscata de Geronó” un camino no dependiente del tiempo basado en puntos unidos por líneas. Se garantiza convergencia global asintótica, esta será más rápida o más lenta dependiendo de la ganancia K ; no se alcanzan velocidades superiores a las establecidas en la sección 2 y el robot sigue las velocidades

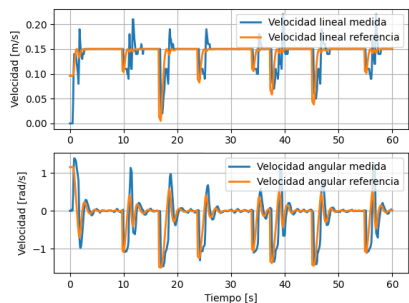


Fig. 13. Velocidades de trayectoria basado en puntos.

de referencia ($\dot{q}_{ref}(t)$) que impone el controlador de seguimiento de trayectoria. En trabajos posteriores, es posible utilizar una unidad de medición inercial para comparar los resultados de los encoders magnéticos, debido a que las ruedas y su adhesión al terreno donde se desplaza el robot sufre deslizamientos. Por otro lado, esta plataforma experimental servirá como base para el desarrollo de controladores más avanzados como controladores no lineales robustos o convexos.

REFERENCIAS

- Alfaro, V.M. (2006). Identificación de modelos de orden reducido a partir de la curvatura de reacción del proceso. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 24(2).
- Blažič, S. (2013). On periodic control laws for mobile robots. *IEEE transactions on industrial electronics*, 61(7), 3660–3670.
- Cornejo, J., Magallanes, J., Denegri, E., and Canahuire, R. (2018). Trajectory tracking control of a differential wheeled mobile robot: a polar coordinates control and lqr comparison. In *2018 IEEE XXV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, 1–4. IEEE.
- Do Khac Tiep, K.L., Im, D.Y., Kwak, B., and Ryoo, Y.J. (2018). Design of fuzzy-pid controller for path tracking of mobile robot with differential drive. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 18(3), 220–228.
- Dòria-Cerezo, A., Biel, D., Olm, J.M., and Repecho, V. (2019). Sliding mode control of a differential-drive mobile robot following a path. In *2019 18th European Control Conference (ECC)*, 4061–4066. IEEE.
- Hägglund, T. (2019). The one-third rule for pi controller tuning. *Computers & Chemical Engineering*, 127, 25–30.
- Korsane, D.T., Yadav, V., and Raut, K.H. (2014). Pid tuning rules for first order plus time delay system. *Int. Journal of Innovative Research in Electrical, Instrumentation and Control Engineering*, 2(1), 582–586.
- Mathew, R. and Hiremath, S.S. (2019). Development of waypoint tracking controller for differential drive mobile robot. In *2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 1121–1126. IEEE.
- Petrov, P. and Georgieva, V. (2018). Vision-based line tracking control for nonholonomic differential-drive mobile

- robots. In *2018 IX National Conference with International Participation (ELECTRONICA)*, 1–4. IEEE.
- Shojaei, K., Shahri, A.M., and Tarakameh, A. (2011). Adaptive feedback linearizing control of nonholonomic wheeled mobile robots in presence of parametric and nonparametric uncertainties. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(1), 194–204.
- Valencia, J.A., Montoya, A., and Rios, L.H. (2009). Modelo cinemático de un robot móvil tipo diferencial y navegación a partir de la estimación odométrica. *Scientia et Technica*, 1(41).
- Wu, X., Jin, P., Zou, T., Qi, Z., Xiao, H., and Lou, P. (2019). Backstepping trajectory tracking based on fuzzy sliding mode control for differential mobile robots. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 96(1), 109–121.
- Xie, D., Wang, S., and Wang, Y. (2018). Trajectory tracking control of differential drive mobile robot based on improved kinematics controller algorithm. In *2018 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2675–2680. IEEE.

Control por Modelo Interno del Suministro de Oxígeno de una Celda de Combustible Tipo PEM Ballard Nexa 1.2-kW

Gerardo Reyes Barragan, Guadalupe López López,
Victor M. Alvarado

*TecNM, CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
62490 Cuernavaca, Morelos, Mexico*

Resumen: En este artículo se presenta el diseño de un controlador por modelo interno y un controlador RST para regular el exceso de alimentación de oxígeno de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico. El desempeño de los controladores es comparado mediante pruebas simuladas en el entorno de Matlab-Simscape. El simulador integra un sistema de generación de energía de celda de combustible con modelos de equipos auxiliares. El modelo de la celda de combustible es multifísico y describe el comportamiento del sistema en los dominios térmico, fluido y eléctrico. Este modelo permite acceder a múltiples variables y analizar el desempeño de la celda de combustible y de su interacción con equipos auxiliares.

Palabras clave: PEMFC, control por modelo interno, control RST, compresor, Ballard Nexa 1.2-kW, suministro de oxígeno.

1. INTRODUCCIÓN

La celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC por sus siglas en inglés) es un dispositivo electroquímico que genera corriente eléctrica a partir de reacciones químicas en su interior. La PEMFC es una fuente de energía limpia, puesto que usa oxígeno e hidrógeno como gases reactivos y tiene como principales residuos, vapor de agua y calor.

Existen diversos modelos propuestos en la literatura para representar la dinámica de las celdas de combustible tipo PEM. Abdin et al. (2016) presentaron un modelo en circuito eléctrico equivalente que integra balances de materia. Wilberforce et al. (2017) desarrollaron un modelo que describe los dominios eléctrico, fluido y térmico, validado posteriormente con datos experimentales. En este mismo trabajo se obtuvieron curvas de polarización que fueron interpretadas para explicar la relación específica de algunos parámetros con la dinámica de la celda. En los artículos de Abdin et al. (2016); Wilberforce et al. (2017) se sugiere que es posible identificar las variables que afectan o mejoran el rendimiento de una PEMFC a partir de la dinámica que predicen sus modelos, de tal forma que este análisis hace posible optimizar el diseño de las celdas de combustible. Randall and DeCaluwe (2020) presentaron un modelo de PEMFC que incorpora datos de la estructura del ionómero de Nafion junto con propiedades de la capa de catalizador del cátodo. Las curvas de polarización que predice el modelo coinciden estrecha-

mente con datos experimentales. Además, los resultados sugieren que incrementar el grosor del ionómero que rodea la superficie aumenta el rendimiento de la celda de combustible debido a que resulta en una conductividad iónica mejorada. Lan and Strunz (2020) desarrollaron un modelo para reproducir los transitorios de una PEMFC debidos a procesos multifísicos que son causados por variaciones de los flujos de corriente eléctrica y gases. La respuesta transitoria del sistema se obtuvo mediante un modelo de circuito eléctrico equivalente formado por elementos eléctricos análogos a los procesos físicos del sistema, los cuales permiten mostrar la interacción entre las variables.

En resumen, Gao et al. (2012) indican que el modelado de celdas de combustible necesita la descripción de fenómenos y procesos que ocurren en los dominios físicos según las variables de interés y estudio. Estos son: dominio eléctrico, dominio fluido, y dominio térmico.

De igual forma, otros estudios sobre celdas de combustible se han centrado en la aplicación de estrategias de control para estos sistemas. Zhao et al. (2017) propusieron un controlador dinámico, con manipulación del par de carga para variar el flujo de masa de aire, y a su vez, eliminar las perturbaciones que provocan los transitorios en el compresor. Liu et al. (2018); Han et al. (2017); Chen et al. (2017); Abbaspour et al. (2018) diseñaron un control del flujo de aire o hidrógeno. Considerando los anteriores trabajos y una revisión de la literatura que fue reportada por Daud et al. (2017) se puede remarcar que el control de flujo de los gases reactivos es determinante para el

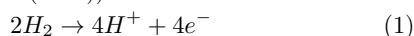
buen desempeño de la celda de combustible, puesto que la reacción entre estos influye directamente en todos los subsistemas, y por lo tanto, en la generación y manejo del calor, agua y energía eléctrica.

Los sistemas de generación de energía eléctrica basados en celdas de combustible son sistemas no lineales, de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Debido a la naturaleza de sus aplicaciones están sometidos a cambios de sus condiciones de operación. Es por esta razón que los sistemas de control deben ser capaces de rechazar perturbaciones provocadas por estas variaciones.

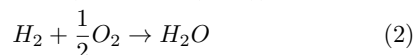
En el presente artículo se muestra el desarrollo y comparación de un control por modelo interno y un control RST para el suministro de oxígeno en la entrada del cátodo de una PEMFC Ballard Nexa de 1,2-kW. Las estructuras de control anteriormente mencionadas permiten el rechazo a perturbaciones y la regulación del exceso de oxígeno ante cambios de referencia.

2. MODELO DE LA PEMFC

La celda de combustible tipo PEM usa una membrana de polímero especial, recubierta con partículas dispersas de catalizador, comúnmente platino. Este electrolito polimérico separa la ruta del flujo de electrones (corriente eléctrica) y el flujo de protones (iones de hidrógeno). En este proceso el hidrógeno es separado de sus electrones por una reacción electroquímica acelerada por el catalizador, como se muestra en la Ecuación (1). Los protones y electrones son transportados por diferentes caminos, haciendo que los electrones circulen hacia el cátodo y que en el transcurso puedan ser aprovechados como corriente eléctrica (Gao et al. (2012)).



La capa catalizadora del cátodo ayuda a la unión de los electrones y protones con las moléculas de oxígeno del aire. La reacción producida en el cátodo, mostrada en la Ecuación (2) genera agua y calor que deben ser gestionados para mantener a la celda en condiciones adecuadas de operación (Gao et al. (2012)).



Los flujos másicos de oxígeno e hidrógeno que se consumen durante la reacción electroquímica están determinados por la corriente aplicada a la celda:

$$q_{O_2,rxn} = \frac{M_{O_2} I_{stack}}{4F} N_{cell} \quad (3)$$

$$q_{H_2,rxn} = \frac{M_{H_2} I_{stack}}{2F} N_{cell} \quad (4)$$

Donde I_{stack} es la corriente en el apilamiento de celdas de combustible (A), $M_{O_2} = 32 \times 10^{-3}$ es la masa molar del oxígeno ($\frac{kg}{mol}$), $M_{H_2} = 2 \times 10^{-3}$ es la masa molar del hidrógeno ($\frac{kg}{mol}$), $F = 96485$ es la constante de Faraday y $N_{cell} = 47$ es el número de celdas que conforman el apilamiento.

El sistema de PEMFC que se considera en el presente trabajo es una Ballard Nexa de 1.2 kW compuesta por un arreglo en serie de 47 celdas. El sistema cuenta con un compresor que suministra aire en la entrada del cátodo.

Se usó el modelo de la celda de combustible de Gao et al. (2012). Las ecuaciones describen el comportamiento de la PEMFC a nivel de capa, el modelo global corresponde a una monocelda, por lo tanto, el voltaje de salida se multiplica por el número de celdas del apilamiento (47 celdas).

$$V_{cell} = V_{C,cata} + V_{mem} + V_{A,cata} - V_{corr} \quad (5)$$

$$V_{stack} = V_{cell} \times 47 \quad (6)$$

donde V_{cell} , $V_{C,cata}$, $V_{A,cata}$, V_{mem} son el voltaje en la celda, la capa catalítica del cátodo, la capa catalítica del ánodo y la membrana, respectivamente (V). V_{corr} es el voltaje de corrección (V) multiplicado por la diferencia entre el voltaje teórico y el voltaje real (Gao et al. (2012)).

2.1 Modelo de compresor

Ramos-Paja et al. (2009) presentaron un modelo empírico del compresor integrado de fábrica al apilamiento Ballard Nexa 1.2-kW. El modelo fue obtenido mediante técnicas de identificación, realizando mediciones en el compresor que está conectado al sistema PEMFC. La ecuación para calcular la relación entre la señal de entrada del compresor y el flujo volumétrico de aire que ingresa al apilamiento de celdas incluye los efectos de presión en los canales del cátodo de la PEMFC. El modelo obtenido es:

$$W_{cp} = G_{cm}(s)V_{cp} - 45 \quad (7)$$

$$G_{cm}(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{0,1437s^2 + 2,217s + 8,544}{s^3 + 3,45s^2 + 7,324s + 5,745} \quad (8)$$

Donde V_{cp} es la señal de control que ingresa al compresor en un rango de 0% - 100% y W_{cp} es el flujo volumétrico de aire (SLPM) suministrado al apilamiento.

El compresor es alimentado con la energía que genera la PEMFC, por lo que la corriente que demanda el compresor I_{cm} se suma a la corriente de carga I_{net} . Ramos-Paja et al. (2009) también presentaron una relación entre la corriente I_{cm} del compresor y el flujo másico que este provee W_{cp} .

$$I_{stack} = I_{cm} + I_{net} \quad (9)$$

$$I_{cm} = -323,1 \times 10^{-5} W_{cp}^2 + 0,018 W_{cp} + 0,616 \quad (10)$$

2.2 Exceso de alimentación de oxígeno

El exceso de alimentación de oxígeno λ_{O_2} es la relación entre el flujo másico de oxígeno que entra en el cátodo de la celda q_{O_2} y el flujo másico de oxígeno que, de acuerdo con la estequiometría, debería ser consumido $q_{O_2,rxn}$.

$$\lambda_{O_2} = \frac{q_{O_2}}{q_{O_2,rxn}} \quad (11)$$

La salida del modelo de compresor W_{cp} está dada en SLPM (litros estándar por minutos), por lo que es necesario convertir a unidades de flujo másico ($\frac{kg}{s}$). El flujo

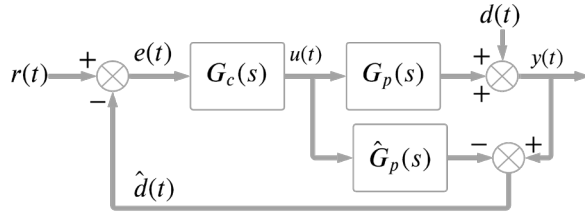


Fig. 1. Estructura de control por modelo interno.

másico en la entrada del cátodo de la celda $q_{C,in}$ es calculado con la ecuación (12) Ramos-Paja et al. (2009).

$$q_{C,in} = \frac{W_{cp}}{22,4 \times 60} M_{am} \quad (12)$$

$$M_{am} = (1 - x_v)M_{air} + x_v M_{H_2O} \quad (13)$$

$$x_v = \frac{\phi_{ca,in} P_{sat}(T_{st})}{1 - \phi_{ca,in} P_{sat}(T_{st})} \quad (14)$$

donde $M_{air} = 28,8 \times 10^{-3}$ y $M_{H_2O} = 18 \times 10^{-3}$ son las masas molares del aire y del agua ($\frac{kg}{mol}$), respectivamente, $\phi_{ca,in}$ es la humedad relativa del aire en la entrada del cátodo y $P_{sat}(T_{st})$ es la presión de saturación del vapor de agua (bar) que es una función de la temperatura:

$$\log_{10}(P_{sat}) = (-1,69 \times 10^{-10})T^4 + (3,85 \times 10^{-7})T^3 + (-3,39 \times 10^{-4})T^2 + 0,143T - 20,92 \quad (15)$$

El control del exceso de oxígeno es necesario para una operación adecuada de la celda de combustible. Una concentración de oxígeno en el cátodo por debajo de la requerida, según la relación estequiométrica (2) de la reacción, puede provocar la degradación de la PEMFC y un bajo rendimiento en la producción de energía, al mismo tiempo que se reduce la vida útil de la PEMFC, Bordons et al. (2006). El exceso de oxígeno debe mantenerse en todo momento $\lambda_{O_2} \geq 1$.

3. DISEÑO DE CONTROLADOR

3.1 Control por modelo interno

El control por modelo interno (CMI) es un control robusto, puesto que soporta errores de modelado, tolera perturbaciones y permite monitorear perturbaciones no medibles. La estructura del controlador se muestra en la Fig. 1, donde $r(t)$ es la referencia, $e(t)$ es el error, $u(t)$ es la entrada de control, $d(t)$ es la perturbación, $\hat{d}(t)$ es la estimación de la perturbación, $y(t)$ es la salida, $G_p(s)$ es la planta, $\hat{G}_p(s)$ es la estimación de la planta, y $G_c(s)$ es el controlador.

La salida del sistema en lazo cerrado se expresa como:

$$y(t) = G_p(s)G_c(s)e(t) + d(t) \quad (16)$$

Suponiendo que $d(t) = 0$, la salida del sistema en lazo cerrado (16) se reescribe de la siguiente forma:

$$y(s) = G_p(s)G_c(s)e(t) \quad (17)$$

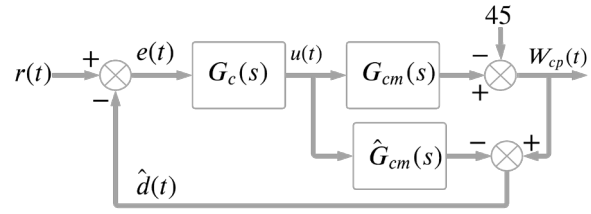


Fig. 2. Estructura de control para el modelo de compresor.

El modelo del compresor (7) tiene una parte representada por una función de transferencia $G_{cm}(s)$ y un término que no agrega dinámica y que no es influenciado por la ley de control. En la Fig. 2 se observa que el término restado en (7) actúa como una perturbación interna del sistema y es posible omitirlo en el modelo para el diseño del CMI. El modelo dinámico se expresa únicamente por la función de transferencia:

$$\frac{W_{cp}(s)}{V_{cp}(s)} = \frac{0,1437s^2 + 2,217s + 8,544}{s^3 + 3,45s^2 + 7,324s + 5,745} \quad (18)$$

De esta forma el modelo del compresor es invertible, por lo tanto el controlador es la función de transferencia inversa de la planta.

$$G_p(s)^{-1} = \frac{s^3 + 3,45s^2 + 7,324s + 5,745}{0,1437s^2 + 2,217s + 8,544} \quad (19)$$

Debido a que el modelo inverso resulta en una función de transferencia impropia es necesario agregar un filtro para construir una ley de control propia. La estructura del filtro es:

$$f(s) = \frac{n\lambda s + 1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (20)$$

Donde $n \geq 2$ y λ es el parámetro a sintonizar. Los valores pequeños de λ proporcionan una respuesta rápida, mientras que los valores grandes presentan una respuesta lenta. En la Fig. 3 se muestra la respuesta del modelo del compresor con el CMI considerando $n = 3$ y diferentes valores para λ .

Dadas las respuestas del controlador en la Fig. 3, se ha seleccionado $\lambda = 1,4$ para el filtro (20). Por lo tanto la función de transferencia del controlador $G_c(s)$ queda de la siguiente forma:

$$G_c(s) = f(s)\hat{G}_p(s)^{-1} \quad (21)$$

$$G_c(s) = \frac{4,2s^4 + 15,49s^3 + 34,208s^2 + 24,129s + 5,745}{0,3943s^5 + 6,9284s^4 + 36,9118s^3 + 59,6938s^2 + 38,1018s + 8,544} \quad (22)$$

3.2 Control RST

El control RST (Reference Signal Tracking) es un control de dos grados de libertad sintonizado por el método de colocación de polos. La estructura de control RST se muestra en la Fig. 4, donde R , S , y T son los polinomios del controlador que obedecen las siguientes restricciones de grado:

$$\deg R \leq \deg S \quad (23)$$

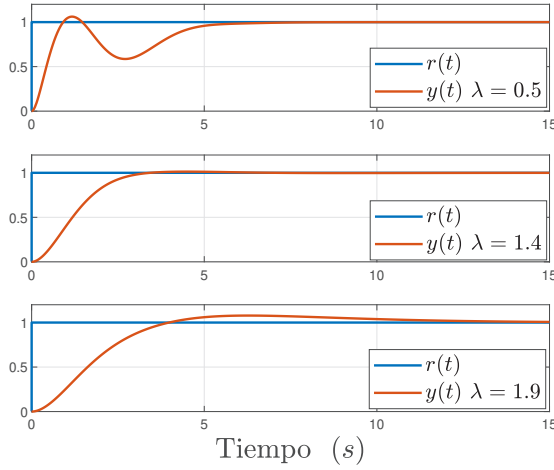


Fig. 3. Respuesta del CMI ante diferentes valores de λ .

$$\deg T \leq \deg S \quad (24)$$

$$\deg A + \deg B \leq \deg P_c \quad (25)$$

P_c es el polinomio característico de la función de transferencia en lazo cerrado del diagrama de bloques de la Fig. 4:

$$\frac{y(t)}{r(t)} = \frac{B(s)T(s)}{A(s)S(s) + B(s)R(s)} \quad (26)$$

Se ha considerado añadir un integrador al polinomio $S(s)$ del controlador RST para permitir un rechazo a perturbaciones y asegurar que la salida del sistema alcance la referencia deseada. La forma de los polinomios resulta de la siguiente manera:

$$T(s) = t_0 \quad (27)$$

$$S(s) = (s + c_0)(s) = s^2 + c_0s \quad (28)$$

$$R(s) = r_2s^2 + r_1s + r_0 \quad (29)$$

Para el diseño del control RST se considera el modelo dinámico del compresor (18). puesto que al igual que en el diseño del CMI, el término restado en (7) se considera una perturbación del sistema.

Los polos del modelo de compresor (18) son: $s = -1,0959 + 1,8345i$, $s = -1,0959 - 1,8345i$ y $s = -1,2581$. Los polos propuestos para el sistema en lazo cerrado (26) son: $s = -5$, $s = -10$, $s = -1,0959 + 1,8345i$, $s = -1,0959 - 1,8345i$ y $s = -1,2581$. Por lo que el polinomio característico propuesto P_c resulta como:

$$P_c = s^5 + 18,45s^4 + 109,074s^3 + 288,105s^2 + 452,375s + 287,25 \quad (30)$$

Los valores de los coeficientes c_0 , r_2 , r_1 y r_0 se obtienen al resolver la ecuación de Bézout (31).

$$P_c = A(s)S(s) + B(s)R(s) \quad (31)$$

Se usó una aproximación de mínimos cuadrados por el método de pseudoinversa para resolver la ecuación de Bézout. Los polinomios $R(s)$ y $S(s)$ del controlador resultan de la siguiente manera:

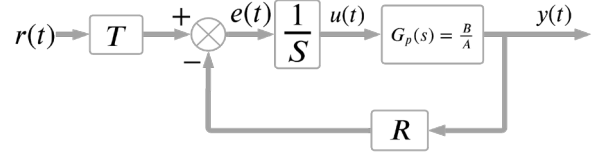


Fig. 4. Estructura de control RST.

$$S(s) = s^2 + 36,7824s \quad (32)$$

$$R(s) = -1,3457s^2 + 19,4703s + 33,6233 \quad (33)$$

Los polos del sistema en lazo cerrado con el controlador RST son: $s = -1,6988 + 2,5842i$, $s = -1,6988 - 2,5842i$, $s = -0,7746 + 6,0347i$, $s = -0,7746 - 6,0347i$, $s = -1,4083$.

$T(s)$ actúa como una ganancia que permite llegar al valor de la referencia un tiempo finito. Para encontrar el valor de $T(s)$ se usa el teorema de valor final ante un escalón unitario en la función de transferencia del sistema en lazo cerrado (26).

$$1 = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{T(s)B(s)}{A(s)S(s) + B(s)R(s)} \frac{1}{s} \quad (34)$$

$$T(s) = 33,6233 \quad (35)$$

4. IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES EN SISTEMA PEMFC PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los controladores diseñados anteriormente se implementaron en un sistema de PEMFC como se muestra en la Fig. 5, simulado en el entorno de Matlab-Simscape. El sistema está compuesto por un apilamiento Ballard Nexa de 1.2-kW, un ventilador para enfriamiento, un humidificador y un compresor.

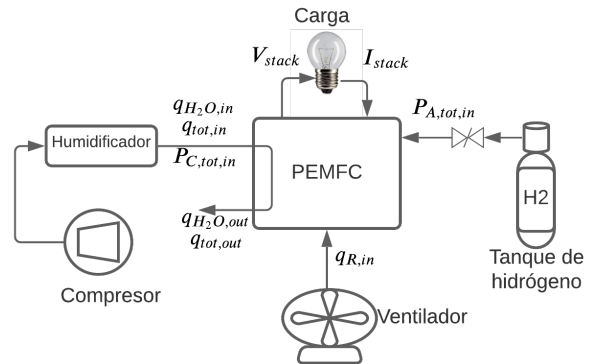


Fig. 5. Sistema de una celda de combustible con componentes auxiliares.

Las pruebas se realizaron con el modelo multifísico de celda de combustible presentado por Gao et al. (2012). Las

Tabla 1. Condiciones de operación de la PEMFC.

Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura ambiente	298.15	K
Presión en la entrada del ánodo	$1,5 \times 10^5$	Pa
Humedad relativa en la entrada del cátodo	1	
Humedad relativa en la entrada del ánodo	0	
Flujo másico en canal de enfriamiento	4×10^{-4}	$\frac{kg}{s}$
Temperatura de gas de enfriamiento	298.15	K
Voltaje de corrección	0.125	V

condiciones de operación consideradas para la simulación se muestran en la Tabla 2.

La referencia del controlador es el exceso de alimentación de oxígeno, esta inicia en $\lambda_{O_2} = 6$ y en el segundo $t = 800s$ cambia a $\lambda = 2$. En la figura 8 se observa que el controlador es capaz de alcanzar la referencia adecuadamente. Durante la simulación se realizan cambios en la corriente de carga (Fig. 6) que para el controlador representan perturbaciones en el sistema y en consecuencia realiza una acción correctiva para regresar al valor de referencia. En la Fig. 8 se observa que las variaciones de carga en corrientes bajas producen perturbaciones mas grandes.

La Fig. 7 muestra el flujo másico de oxígeno que se requiere para mantener la relación de exceso de alimentación de oxígeno λ_{O_2} y el flujo másico de oxígeno que ingresa a la PEMFC.

La Fig. 6 muestra la corriente de carga aplicada al apilamiento I_{net} y la corriente total I_{st} que se obtiene sumando el consumo del compresor. La Fig. 10 indica la señal V_{cp} que ingresa al driver del compresor para mantener el exceso de oxígeno deseado.

En la Fig. 9 se observa que el voltaje que brinda la PEMFC es mayor cuando λ_{O_2} es más grande, de esta forma la celda tiene un mayor rendimiento.

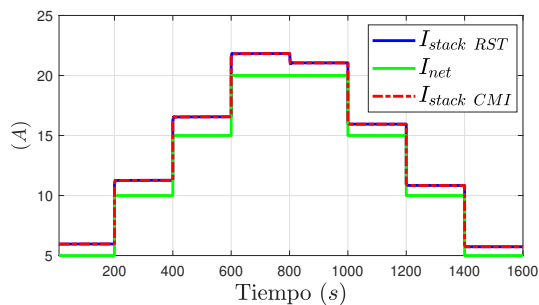


Fig. 6. Corriente de carga y corriente total en el stack.

4.1 Índices de desempeño.

Los controladores se compararon mediante los índices de desempeño: integral del error absoluto (IAE), integral del tiempo por el error absoluto (ITAE) e integral del error cuadrático (ISE).

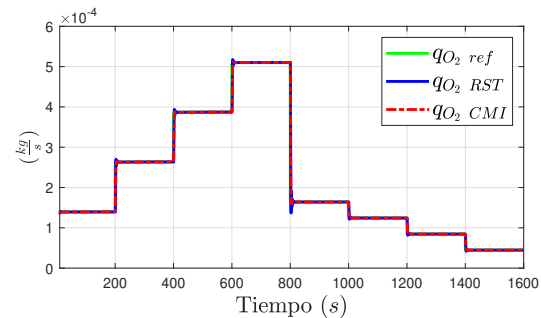


Fig. 7. Flujo másico de oxígeno que ingresa a la PEMFC.

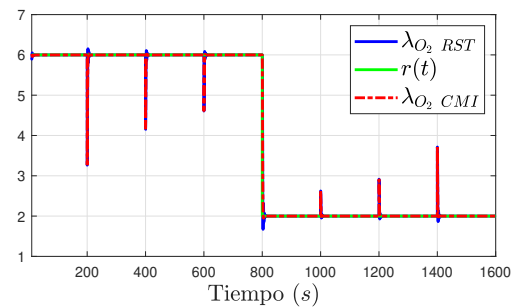


Fig. 8. Exceso de alimentación de oxígeno en la PEMFC.

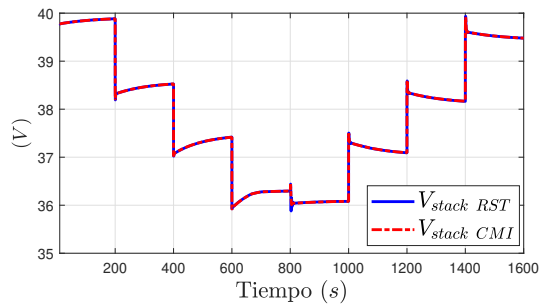


Fig. 9. Voltaje de salida del stack.

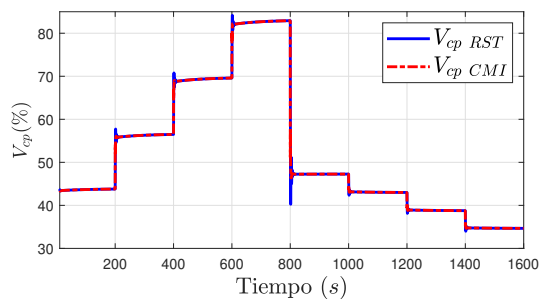


Fig. 10. Señal de control de compresor.

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (36)$$

$$ITAE = \int_0^t t |e(t)| dt \quad (37)$$

$$ISE = \int_0^t |e(t)|^2 dt \quad (38)$$

Tabla 2. Índices de desempeño

Controlador	IAE	ITAE	ISE
RST	21.1	14250	36
CMI	18.68	12520	29.74

En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos por los controladores para los índices de desempeño. El controlador por modelo interno obtuvo valores mas pequeños en todos los índices, lo cual indica un mejor desempeño, comparado con el desempeño del controlador RST.

5. CONCLUSIONES

Se han diseñado dos controladores para la regulación del exceso de oxígeno de alimentación de una PEMFC Ballard Nexa de 1.2-kW, considerando el modelo del compresor. El control RST y el CMI son capaces de regular λ_{O_2} en los valores de referencia impuestos durante la prueba, además de lograr el rechazo a las perturbaciones provocadas por las variaciones de corriente.

La evaluación mediante los índices IAE, ITAE e ISE indican que el CMI tuvo mejor desempeño durante las pruebas realizadas. Esta ley de control presenta sobrepaso máximo de 1,25 % y un tiempo de estabilización de aproximadamente 4 segundos. Por otro lado el controlador RST presenta un sobrepaso máximo de 8,25 % y un tiempo de estabilización de aproximadamente 10 segundos.

Se observó que las variaciones de corriente a cargas pequeñas representan perturbaciones más grandes para el controlador. Debido a esas grandes variaciones es necesario que cuando la PEMFC opere en cargas bajas se considere un exceso de alimentación de oxígeno mayor para evitar que los picos de demanda provoquen que $\lambda_{O_2} < 1$ y que ocurran daños en la celda.

El voltaje producido por la PEMFC logra aumentar cuando se tiene un exceso de alimentación de oxígeno. La implementación de un control de exceso de oxígeno permite proteger a la celda de daños provocados por la subalimentación de aire y al mismo tiempo mejorar su desempeño.

REFERENCIAS

- Abbaspour, A., Yen, K.K., Forouzaneshad, P., and Sargolzaei, A. (2018). Active adaptive fault-tolerant control design for pem fuel cells. 3616–3622.
- Abdin, Z., Webb, C., and Gray, E.M. (2016). Pem fuel cell model and simulation in matlab–simulink based on physical parameters. *Energy*, 116, 1131–1144.

- Bordons, C., Arce, A., and Del Real, A. (2006). Constrained predictive control strategies for pem fuel cells. In *2006 American Control Conference*, 6–pp. IEEE.
- Chen, J., Liu, Z., Wang, F., Ouyang, Q., and Su, H. (2017). Optimal oxygen excess ratio control for pem fuel cells. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 26(5), 1711–1721.
- Daud, W.R.W., Rosli, R., Majlan, E., Hamid, S., Mohamed, R., and Husaini, T. (2017). Pem fuel cell system control: A review. *Renewable Energy*, 113, 620–638.
- Gao, F., Blunier, B., and Miraoui, A. (2012). *Proton exchange membrane fuel cells modeling*. Wiley Online Library.
- Han, J., Yu, S., and Yi, S. (2017). Adaptive control for robust air flow management in an automotive fuel cell system. *Applied energy*, 190, 73–83.
- Lan, T. and Strunz, K. (2020). Modeling of multi-physics transients in pem fuel cells using equivalent circuits for consistent representation of electric, pneumatic, and thermal quantities. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 119, 105803.
- Liu, J., Gao, Y., Su, X., Wack, M., and Wu, L. (2018). Disturbance-observer-based control for air management of pem fuel cell systems via sliding mode technique. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 27(3), 1129–1138.
- Ramos-Paja, C.A., Giral, R., Martinez-Salamero, L., Romano, J., Romero, A., and Spagnuolo, G. (2009). A pem fuel-cell model featuring oxygen-excess-ratio estimation and power-electronics interaction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(6), 1914–1924.
- Randall, C.R. and DeCaluwe, S.C. (2020). Physically based modeling of pemfc cathode catalyst layers: Effective microstructure and ionomer structure–property relationship impacts. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 17(4).
- Wilberforce, T., El-Hassan, Z., Khatib, F., Al Makky, A., Baroutaji, A., Carton, J.G., Thompson, J., and Olabi, A.G. (2017). Modelling and simulation of proton exchange membrane fuel cell with serpentine bipolar plate using matlab. *international journal of hydrogen energy*, 42(40), 25639–25662.
- Zhao, D., Xu, L., Huangfu, Y., Dou, M., and Liu, J. (2017). Semi-physical modeling and control of a centrifugal compressor for the air feeding of a pem fuel cell. *Energy Conversion and Management*, 154, 380–386.

Rectificador sin Puente de Diodos Multinivel con Corrección del Factor de Potencia

Ana Luz Hernández Trujillo*. Carlos
Aguilar Castillo. **

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
México (Tel: 2291602473; e-mail:
ana.hernandez19ea@cenidet.edu.mx).

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
México (e-mail: carlos.ac@cenidet.tecnm.mx)

Resumen: Este artículo se orienta al análisis del funcionamiento de un rectificador sin puente de diodos multinivel operando en modo de conducción continuo. El rectificador sin puente de diodos de varios niveles se plantea como una opción para reducir los esfuerzos de tensión en los dispositivos de conmutación y que sea posible utilizar dispositivos semiconductores comerciales en aplicaciones con niveles de tensión altos.

Palabras clave: Rectificador sin puente de diodos, rectificador multinivel, convertidor multinivel, corrección del factor de potencia.

1. INTRODUCCIÓN

Es bien conocido el debate que se llevó a cabo para determinar el uso de la corriente directa y la corriente alterna. Finalmente, se decidió que el uso y distribución se llevara a cabo en corriente alterna. Hoy en día, prácticamente toda la distribución se lleva a cabo de esta manera; aunque existen algunos tramos de distribución que se realiza en corriente directa en alta tensión (China, Rusia, Brasil, etc.). Sin embargo, hoy en día la gran mayoría de los equipos eléctricos y electrónicos necesitan una fuente de tensión de corriente directa.

Tradicionalmente, la conversión de corriente alterna a corriente directa, se lleva a cabo mediante rectificadores no controlados llamados diodos. Algunas de las ventajas de utilizar diodos son su simplicidad, bajo costo y la disposición para aplicaciones de baja y media tensión. Sin embargo, al no ser controlados, no es posible modificar el nivel de tensión obtenido, además generan contaminación armónica (Srdan Lale, 2017).

Para reducir la contaminación armónica producida por el uso de diodos no controlados, se utilizan topologías de convertidores conmutados que permiten corregir el factor de potencia. Aunque existen algunas técnicas pasivas (emplean inductores y capacitores sin empleo de dispositivos controlados), comúnmente se utilizan métodos activos (convertidores conmutados). La idea fundamental es que el convertidor conmutado se comporte como una carga resistiva a la línea de corriente alterna, de esa manera es posible obtener factor de potencia muy cercano a uno, que es el ideal.

La Fig. 1 muestra el circuito de un convertidor conmutado que se usa típicamente para corregir el factor de potencia. Se trata

de un esquema que implica un rectificador basado en puente de diodos seguido de un convertidor CD-CD del tipo Boost. Esta estructura es bastante conveniente desde el punto de factor de potencia obtenido; aunque la conexión en serie reduce la eficiencia. Durante cada ciclo de conmutación, hay al menos dos diodos y un interruptor activo. En el afán de mejorar la eficiencia de esta configuración se han propuesto algunas variantes.

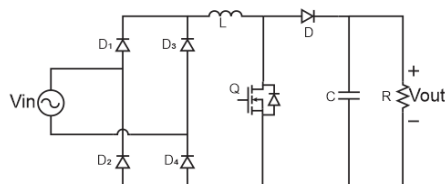


Fig. 1 Circuito corrector del factor de potencia.

Una propuesta alternativa al circuito de la Fig. 1 es un circuito llamado rectificador sin puente de diodos. Un rectificador sin puente de diodos permitiría incrementar la eficiencia (al contener menor número de semiconductores conduciendo simultáneamente) pero deberá conservar las propiedades de corregir el factor de potencia. En general, un rectificador sin puente de diodos permite que la corriente fluya a través de un número reducido de dispositivos de conmutación comparado con un rectificador convencional (Abbas A. Fardoun, 2012).

La Fig. 2 muestra una estructura de rectificador sin puente de diodos basada en un convertidor Boost; tiene las ventajas de menor costo y más simple (comparada con la estructura de la Fig. 1), y factor de potencia muy alto con alta eficiencia.

Quizás, una de las desventajas es que la tensión de salida es mayor que la entrada y presenta regulación *pobre* (Tiwari, 2020).

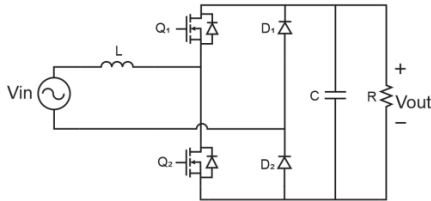


Fig. 2 Rectificador sin puente de diodos.

Los rectificadores con corrección de factor de potencia son necesarios para una amplia gama de aplicaciones: los centros de datos (*data centers*), la tracción de trenes y los transformadores de estado sólido (SST por sus siglas en inglés), por mencionar algunas de ellas. Algunas de estas aplicaciones, han aumentado continuamente su demanda de energía o mejorado sus procesos mediante nuevas técnicas de conversión (José Rodríguez, 2009). Por ejemplo, el consumo de energía en los centros de datos ha ido en aumento debido a la popularización de los servicios de internet y el almacenamiento de datos. Para una eficiencia alta a potencia elevada, se ha vuelto más atractivo realizar la alimentación de estos centros de datos a 400V de corriente directa. Por otro lado, debido a los niveles de potencia que utilizan, la alimentación se realiza a través de una red de media tensión (Yuzhi Zhang, 2017). Otra de las aplicaciones que en los últimos años ha sido ampliamente investigada son los transformadores de estado sólido (SST). Estos tienen por objeto sustituir a los transformadores convencionales usando técnicas de conversión de la energía en alta frecuencia. Tienen la ventaja de integrar nuevas funciones a la operación y gestión de la red eléctrica, además de tener un tamaño y peso reducido en relación a los transformadores tradicionales (Jiepin Zhang, 2019).

Las aplicaciones mencionadas se desarrollan en el rango de media tensión, con el fin de implementarlas los investigadores y la industria han reaccionado de dos maneras: desarrollando la tecnología de semiconductores para alcanzar tensiones más altas y utilizar las topologías existentes o desarrollando nuevas topologías de convertidores y utilizar los semiconductores existentes (José Rodríguez, 2009). La desventaja de la primera opción es que la tecnología de semiconductores aún se encuentra en investigación y los semiconductores para niveles de media tensión existentes en el mercado tienen costos muy elevados. La segunda opción, propone a las topologías multinivel, como la de la Fig. 3, como una opción para reducir los esfuerzos de tensión en los semiconductores de potencia, lo que hace posible utilizar dispositivos comerciales de tensiones menores (Cong Wang Y. Z., 2017). Al contar con n niveles el rectificador puede ser conectado directamente a media/alta tensión. Las desventajas de un rectificador multinivel es que la

complejidad y el costo se vuelve mayor a tensiones mayores (Cong Wang Y. Z., 2017).

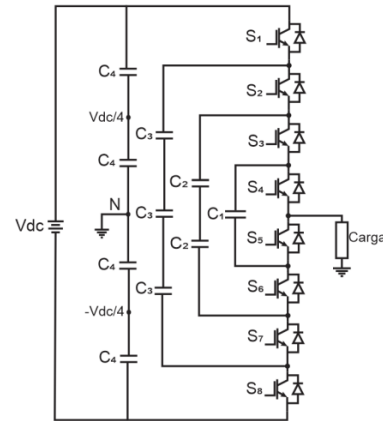


Fig. 3 Convertidor multinivel.

2. RECTIFICADOR MULTINIVEL SIN PUENTE DE DIODOS

En la Fig. 4 se muestra la extensión del concepto de conversión multinivel a un rectificador sin puente de diodos con corrección del factor de potencia (CFP). La aplicación de este tipo de rectificador puede ser la etapa de entrada de un sistema de alimentación para un *data center* conectado a media tensión. Debido a la tensión de entrada, no es posible usar convertidores convencionales, ya que no existe disposición comercial de dispositivos semiconductores de esa tensión (mayor a 2kV). Obviamente, puede ampliarse el número de niveles para extender el uso a tensión más alta.

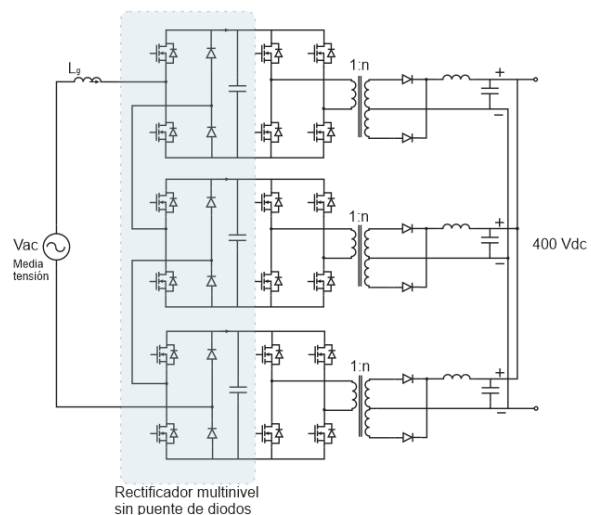


Fig. 4 Sistema de alimentación para *data centers* empleando un rectificador de tres niveles sin puente de diodos.

El rectificador multinivel con CFP operando en modo de conducción continuo tiene dos circuitos equivalentes durante la polaridad positiva de la tensión de entrada, y otros dos diferentes con la polaridad negativa. En la Fig. 5 se muestran los circuitos equivalentes del rectificador sin puente de diodos de tres niveles. La Fig. 5a muestra la carga del inductor durante la polaridad positiva de la tensión de entrada. La Fig. 5b muestra la descarga del inductor. Las Figs. 5c y d muestran las condiciones anteriores, pero ahora durante la polaridad negativa de la tensión.

- La tensión de entrada carga el inductor L mientras Q2, Q4 y Q6 están conduciendo. La carga se alimenta por la energía almacenada en el capacitor de salida de cada nivel.
- En este momento del ciclo positivo, se descarga la energía que se almacenó en el inductor L durante el inciso a. La corriente fluye a través de los diodos 2, 4 y 6 y a través de los diodos internos de los transistores Q1, Q3 y Q5.
- Durante la parte negativa del ciclo de línea, la corriente de carga del inductor L circula a través de los diodos 5, 3 y 1, y los transistores Q5, Q3 y Q1 se encuentran encendidos.
- Durante esta etapa de la tensión negativa de la tensión de entrada, se descarga el inductor L. La corriente circula a través de los diodos 5, 3 y 1, y a través de los diodos internos de los transistores Q6, Q4 y Q2.

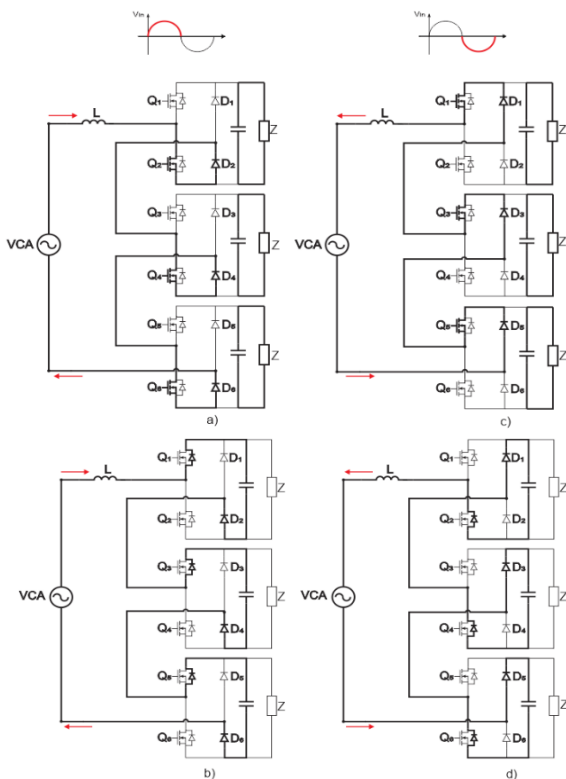


Fig. 5 Circuitos equivalentes durante un periodo de conmutación. a) Carga, b) Descarga, del inductor durante Semiciclo positivo. c) Carga, b) Descarga, del inductor durante semiciclo negativo.

Como se observa en los circuitos equivalentes, la carga y descarga del inductor es similar a la de un convertidor de un nivel, por lo tanto, la ecuación para seleccionar su valor es similar a la reportada previamente, es decir (Wang, 2009):

$$L = \frac{\eta * V_{RMS}^2}{\%rizo * f_{sw} * P_{out}} \left(1 - \frac{\sqrt{2}V_{RMS}}{V_O}\right) \quad (1)$$

Donde:

η	Eficiencia
V_{RMS}	Tensión rms de entrada
$\%rizo$	Porcentaje de rizo deseado
f_{sw}	Frecuencia de conmutación
P_{out}	Potencia de salida
V_O	Tensión de salida

El inductor se encuentra antes del rectificador, por lo tanto, su valor no depende del número de niveles que tenga el convertidor. Sin embargo, el capacitor de cada nivel soporta la tensión de salida dividida por el número de niveles, así también la potencia que debe sostener, es decir:

$$C = \frac{\frac{P_{out}}{n}}{\%rizo * \omega * \left(\frac{V_O}{n}\right)^2} \quad (2)$$

Donde:

n	Número de niveles
P_{out}	Potencia a la salida
ω	Frecuencia angular
V_O	Tensión de salida
$\%rizo$	Porcentaje de rizo deseado para la tensión de salida

En cuanto a la carga, cada nivel debe alimentar la potencia total entre el número de niveles.

3. CONTROL DEL RECTIFICADOR CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA SIN PUENTE DE DIODOS.

El objetivo del control es emular el comportamiento de las cargas de cada nivel a cargas puramente resistivas, haciendo que la corriente de entrada que procede de la línea de corriente alterna tenga la misma forma de onda que la tensión de entrada,

consiguiendo así un factor de potencia cercano a la unidad (Usama Anwar, 2017).

La operación del rectificador multinivel se considera en modo de conducción continuo con control por corriente promediada. El control está formado por dos lazos: el lazo interno de corriente y el lazo externo de tensión. El lazo interno de corriente se encarga de que la corriente del inductor “siga” a la tensión de entrada, mientras que el lazo de externo de tensión realiza la regulación de la tensión de salida. Para la regulación de la tensión de salida, el amplificador de error detecta las variaciones entre la tensión de salida y una tensión de referencia de CD fija. Esta tensión se multiplica con la tensión de línea rectificada para controlar la amplitud de la corriente del inductor, el esquema del control se muestra en la Fig. 6 (Chen Zhou, 1990).

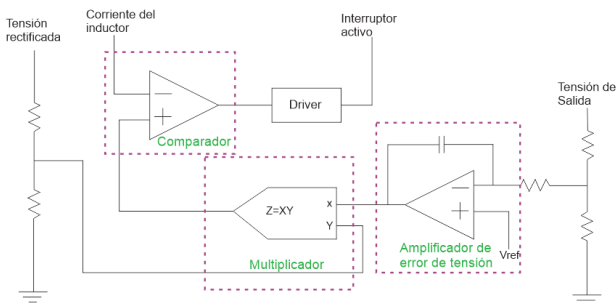


Fig. 6 Esquema de control modo corriente promediada.

Mediante el esquema de control de la Fig. 6, se determina el instante en que se debe cargar y descargar el inductor, pero dependiendo de la polaridad de la tensión de entrada, es necesario encender determinados interruptores que permitirían tal situación. En la Tabla 1 se muestra el estado de los transistores del rectificador de tres niveles durante el ciclo positivo y el ciclo negativo. PWM indica que el transistor debe ser controlado mediante la señal obtenida del circuito de control (Fig. 6). El 0 indica que el transistor debe estar apagado durante todo el semiciclo en cuestión. Es importante mencionar que dos transistores de un mismo nivel no pueden estar encendidos al mismo tiempo ya que se provocaría un corto circuito.

Tabla 1 Estado de los transistores durante un ciclo de la tensión de entrada.

	Ciclo Positivo	Ciclo Negativo
Q1	0	PWM
Q2	PWM	0
Q3	0	PWM
Q4	PWM	0
Q5	0	PWM
Q6	PWM	0

En la Fig. 7 se muestran las señales que deben ser aplicadas a los interruptores del rectificador de tres niveles. La señal PWM se obtiene del circuito de control modo corriente promediado de la Fig. 6. Por otro lado, a partir de la polaridad de la tensión de entrada, se generan pulsos de referencia “positivo” y “negativo”. Finalmente, con un circuito digital simple, se obtienen las señales para cada uno de los interruptores.

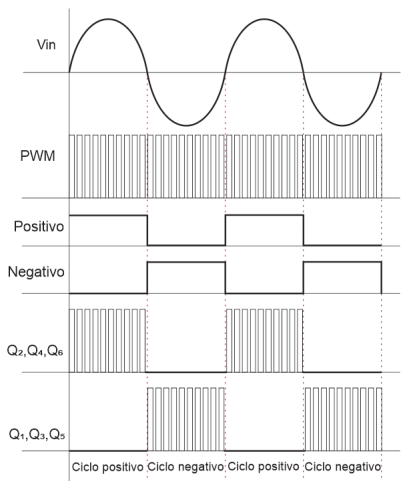


Fig. 7 Señales de activación de los transistores.

La Fig. 8 muestra el circuito digital para determinar el encendido adecuado de cada uno de los interruptores.

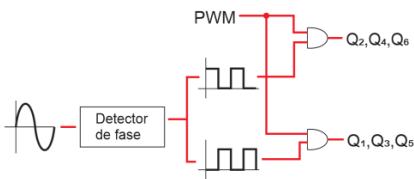


Fig. 8 Control de encendido de los transistores.

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

La Tabla 2 muestra los parámetros para el diseño de un sistema de alimentación para un *data center*, como el mostrado en la Fig. 4. Es un circuito de tres niveles formado por un rectificador sin puente de diodos con corrección del factor de potencia seguido de un convertidor DC-DC puente completo en cada uno de los niveles, las salidas de los convertidores DC-DC puente completo se encuentran conectadas en paralelo. Los valores del inductor y de los capacitores del rectificador sin puente de diodos se encontraron con las ecuaciones mostradas en la sección 2.

Tabla 2 Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
Tensión de entrada	1 kVrms
Tensión de salida	400 Vcd
Rectificador sin puente de diodos:	
Tensión de cada nivel	500 Vcd
Potencia total	3 kW
Potencia en cada nivel	1 kW
Frecuencia de conmutación	50 kHz
%Rizo de la corriente del inductor	20%
%Rizo de la tensión de salida	5%
Inductor	1.9 mH
Capacitor en cada nivel	212.1 uF
Convertidor DC-DC puente completo:	
Inductor en cada nivel	1.6 mH
Capacitor de salida en cada nivel	31.25 uF

Con los parámetros y valores obtenidos se simula el sistema de alimentación para un *data center* para determinar el correcto funcionamiento. La Fig. 9 muestra la tensión (forma de onda en color rojo) y la corriente de entrada (forma de onda en color verde). El rectificador consigue un factor de potencia de 0.96.

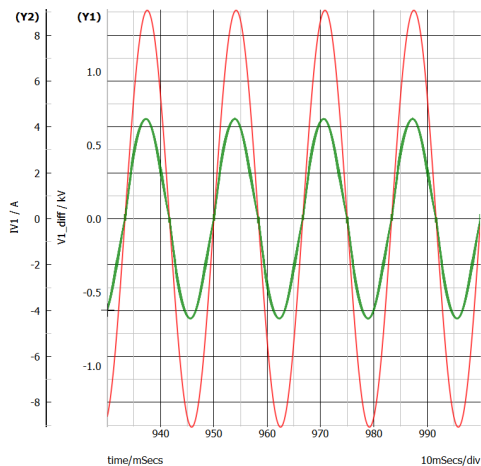


Fig. 9 Tensión y corriente de entrada.

La Fig. 10 muestra la forma de onda de corriente del inductor de entrada; como se observa, el rectificador está operando en modo de conducción continuo.

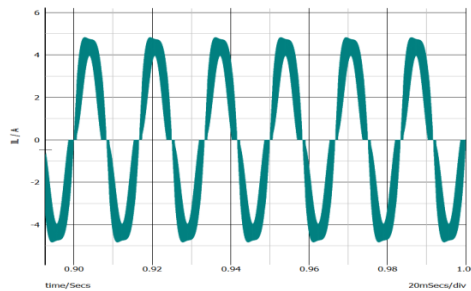


Fig. 10. Forma de onda de corriente del inductor de entrada.

La tensión total después de los rectificadores sin puente de diodos es de 1.5 kVdc, esta se divide entre el número de niveles. Por lo tanto, la tensión de cada uno de los niveles del rectificador es igual a 1500/3 Vdc. En la Fig. 11 se observa la tensión en cada uno de los niveles que es de 505.02 V. Esta es la tensión de entrada para cada uno de los convertidores DC-DC puente completo.

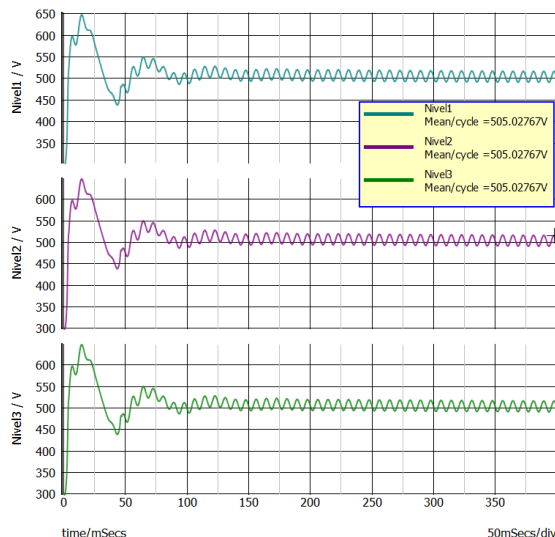


Fig. 11 Tensión de salida en cada nivel.

En la Fig. 12 se muestra la tensión de salida con los convertidores DC-DC puente completo conectados en paralelo. Esta tensión de salida es ideal para la alimentación de un *data center* conectado a media tensión.

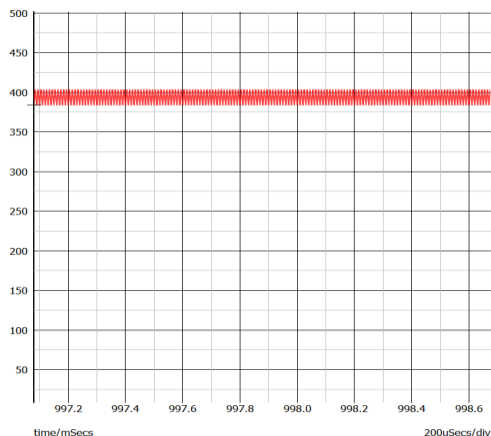


Fig. 12 Tensión de salida.

En la Fig. 13 se observa el esfuerzo de tensión en cada uno de los transistores del rectificador de tres niveles. El esfuerzo de tensión en cada uno de ellos es igual a la tensión que hay después del rectificador del nivel en que se encuentran, en este caso 500 V aproximadamente.

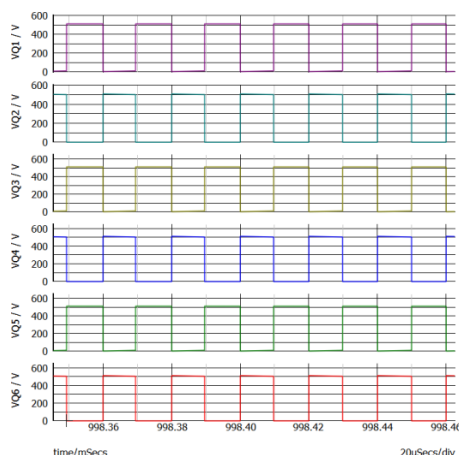


Fig. 13 Esfuerzo de tensión en los transistores.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se analiza el comportamiento de un rectificador sin puente de diodos multinivel con corrección del factor de potencia. Se describió la operación y las ecuaciones básicas del diseño, así como los resultados obtenidos mediante simulación. Un convertidor sin puente de diodos permite corregir el factor de potencia, reduciendo la complejidad del circuito e incrementando la eficiencia. Además, la configuración multinivel permite reducir los esfuerzos de tensión sobre los dispositivos. De esta manera, es posible incursionar en el uso de convertidores conmutados en el rango de media tensión. En este artículo se propusieron parámetros en la simulación para la alimentación de un *data center*, sin embargo, cabe señalar que

esto abre las posibilidades a un gran número de aplicaciones que requieren emplearse a ese nivel de tensión. Como se observa en los resultados de simulación, la tensión total después de los rectificadores se divide entre el número de niveles, por lo tanto, incrementando el número de niveles, la tensión en cada uno de ellos será menor, al igual que el esfuerzo de tensión en los transistores. Para valores de tensión altos basta con incrementar el número de niveles, pero la complejidad, cantidad de componentes y por lo tanto el costo total del convertidor aumentará.

REFERENCIAS

- Abbas A. Fardoun, E. H.-S. (2012). New efficient bridgeless cuk rectifiers for PFC applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 3292-3301.
- Chen Zhou, R. B. (1990). Design and analysis of a hysteretic boost power factor correction circuit. *21st Annual IEEE Conference on Power Electronics Specialists*, (pp. 800-807). San Antonio, TX, USA.
- Cong Wang, Y. Z. (2017). Revised topology and control strategy of three-phase cascaded bridgeless rectifier. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, (pp. 1499-1504).
- Cong Wang, Y. Z. (2017). Topologies and control strategies of cascaded bridgeless multilevel rectifier. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 432-444.
- Jiepin Zhang, J. L. (2019). A power electronic traction transformer configuration with low-voltage IGBTs for onboard traction applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 8453-8467.
- José Rodríguez, L. G. (2009). Multilevel converters an enabling technology for high-power applications. *Proceedings of the IEEE*, 1786-1817.
- Srdan Lale, M. Š. (2017). Unipolar switched bidirectional bridgeless power factor correction boost rectifier with adaptive dual current mode control. *2017 International Symposium on Power Electronics*, (pp. 1-6). Novi Sad, Serbia.
- Tiwari, A. S. (2020). Analysis of bridge and bridgeless type PFC AC-DC boost converter. *2020 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3)*, (pp. 178-183). Gorakhpur, India.
- Usama Anwar, R. E. (2017). A control architecture for low current distortion in bridgeless boost power factor correction rectifiers. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, (pp. 82-87).
- Wang, P. (2009). ND8322/D, Four keys steps to design and continuous conduction mode PFC stage using the NCP1654. *On semiconductor*.
- Yuzhi Zhang, R. K. (2017). Cascaded bridgeless Totem-pole multilevel converter with model predictive control for 400 V dc-powered data centers. *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, (pp. 2745-2750).

Estimación de la Capacidad de Generación de Energía Fotovoltaica a Partir de Imágenes Satelitales

Corona-Morales C. A.*, García-Beltrán C. D*

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, C.P. 62490

Cuernavaca, Morelos, México.

(e-mail: cristian.corona19ee@cenidet.edu.mx)

Resumen: El objetivo de este artículo es presentar una estrategia de predicción de la capacidad de generación de energía eléctrica a partir de sistemas fotovoltaicos, con el fin de obtener una referencia de la producción de energía eléctrica con cierto grado de confiabilidad aplicando redes neuronales feedforward para integrar factores climáticos que influyen en el sistema. Utilizando dos redes neuronales, una para la predicción de los cúmulos de nubosidad y otra para realizar un ajuste a en el modelo de irradiación solar y obtener la irradiación solar global sobre una superficie inclinada. Con todo lo anterior se encontró que es posible obtener datos predictores de irradiación en diferentes superficies de análisis.

Palabras clave: Irradiación solar, red neuronal feed-forward, energía fotovoltaica, predicción, panel fotovoltaico, irradiación sobre una superficie inclinada.

1. INTRODUCTION

Hoy en día la energía eléctrica se ha convertido en un recurso prácticamente necesario para el ser humano, actualmente existen diversas opciones de generar electricidad de forma no renovable, carbón, petróleo, nuclear entre otras y de forma renovable, eólica, hidráulica, fotovoltaica entre otras (Viloria, 2008). El beneficio que aportan las energías renovables son diversos y su desempeño varía según las condiciones en las que se encuentren. Una de las fuentes de energía renovable que ha ganado gran popularidad en estos últimos años ha sido la generación de energía a partir de sistemas fotovoltaicos; Un ejemplo es México que según el Reporte de Avance de Energías Limpias del Primer Semestre 2018, el crecimiento de generación de energía a partir de sistemas fotovoltaicos del 2017 al 2018 representa un aumento del 340.50% (SENER, 2018). Por lo antes mencionado es necesario seguir analizando este tipo de fuentes de energía con el fin de mejorar su adaptación a la vida cotidiana de las personas y, a su vez, obtener el máximo aprovechamiento.

La generación de energía fotovoltaica se considera que es de todas las fuentes renovables una de las más disponibles y fáciles de aprovechar, sin embargo, su dependencia climatológica la convierte en una fuente variable, por lo que se ha buscado de diversas formas realizar una previsión de la capacidad de generación fotovoltaica como, métodos de convolución (Rajendra Narayan Senapati, 2016), modelos determinísticos (Fatih Serttas, 2018), con redes neuronales (Kanzhuang Guo, 2020), entre otros, buscando predecir en sus respectivos enfoques las diferentes variables, uno de los factores que más interviene en la generación de energía fotovoltaica es la aparición de cúmulos de nubes, los cuales disminuyen considerablemente la producción de energía y al ser una

condición sumamente variable provoca intermitencia en la generación de energía eléctrica.

Este artículo se enfoca en presentar un esquema híbrido para obtener una predicción del estado de nubosidad en una zona determinada utilizando modelos matemáticos y realizando correcciones con redes neuronales esto con el fin de visualizar una referencia con respecto al nivel de irradiancia siendo este el factor primario para evaluar el nivel de energía producido por sistemas fotovoltaicos.

Para el desarrollo de esta investigación en la ilustración 1 se muestra el esquema general utilizado, este inicia con la extracción de imágenes satelitales obtenidas de Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) (T. Ushio, 2020), localizando y señalizando un cuadrante de análisis, además de proporcionar la fecha y hora en cuestión, posteriormente se aplica un tratamiento de imágenes en escala de grises para después extraer el valor de pixel (VPx), valor que utiliza como entrada la red neuronal artificial 1 (ANN1) para realizar la predicción de VPx en las horas siguientes obteniendo el valor de pixel predicho ($\widehat{VPx}$), Posteriormente es necesario obtener la irradiación solar global horizontal calculada ($\widehat{I_H}$) obtenida del modelo matemático al cual se le proporciona los datos de hora (h), día (d) y mes (m). Una vez obtenido $\widehat{VPx}$ y $\widehat{I_H}$ se introducen a la red neuronal artificial 2 (ANN2) junto con h para realizar una corrección a $\widehat{I_H}$ ya introduciendo $\widehat{VPx}$ que indicaría el nivel de nubosidad influyendo sobre $\widehat{I_H}$ y obteniendo finalmente la irradiación solar global horizontal real (I_H), valor que regresa al modelo teórico el cual depende de I_H para obtener la irradiación solar global sobre una superficie inclinada (G) este último cálculo agregando la inclinación que tienen los sistemas

fotovoltaicos y con esto precisar mejor el cálculo de producción de energía.

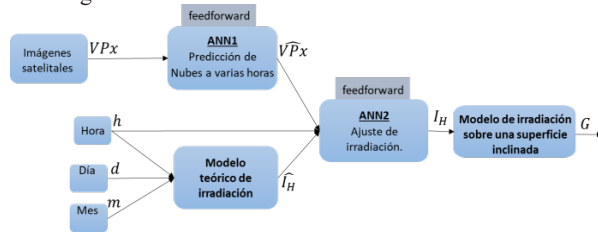


Fig. 1. Diagrama general de desarrollo

2. PREDICCIÓN DE NUBOSIDAD

2.1 Extracción de datos

Para la extracción de imágenes satelitales fueron obtenidas de Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) y the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) (T. Ushio, 2020) extrayendo hora a hora una imagen satelital en formato Portable Network Graphics (PNG). Como podemos observar en la Figura 2, el punto de observación las imágenes fueron centradas en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ya que es en ese lugar es donde se extrajo la información de irradiación solar utilizados en esta investigación.

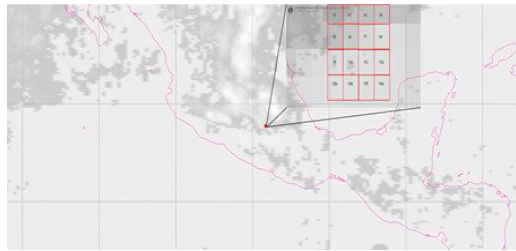


Fig. 2. Punto de análisis.

Una vez indicado el punto de observación se traza un cuadrante el cual para este caso está compuesto de 16 pixeles diferentes, que cubren municipios como Huitzilac, Tepoztlán, Jiutepec, Yautepec, Temixco, Zapata y Cuernavaca, como se muestra en la Ilustración 3, para posteriormente aplicar un tratamiento de imágenes en escala de grises a cada imagen.

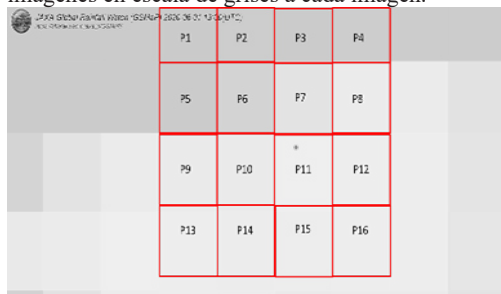


Fig 3. Cuadrante de análisis.

El tratamiento aplicado consiste en convertir las imágenes obtenidas a escala de grises y según las coordenadas de cada pixel extraer su valor en nivel de gris, obteniendo con esto una matriz de $[1 \times 16]$ en cada hora analizada.

2.2 Nivel de nubosidad

Para obtener el nivel de nubosidad y a su vez realizar una predicción para las horas próximas se hace uso de una red neuronal artificial tipo feedforward a la cual se le ingresan los valores de pixel (VPx) de 4 horas para poder obtener el valor de pixel predicho ($\widehat{VPx}$) en las horas siguientes, es posible aplicar este método para diversas horas, sin embargo, para esta investigación solo se tomaron los siguientes cinco pasos como datos fiables, tomando en cuenta el porcentaje de error.

2.2.1 Red neuronal artificial 1 (ANN1)

Datos de entrada:

Se vectorizaron las matrices de pixeles $P_n \in \mathbb{R}^{V \times 4}$ hacia vectores $V \in \mathbb{R}^{16}$ para cada instante de muestra 16 pixeles en cada hora, en secciones de 4 horas y recorriendo en cada renglón la hora siguiente obteniendo una matriz de entrada (int) de $[192 \times 16]$, es decir:

$$V = [v_{k-3}; v_{k-2}; v_{k-1}; v_k]$$

$$v_i \in \mathbb{R}^{16}$$

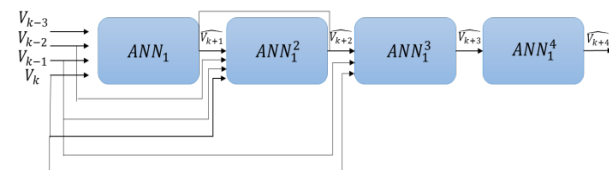


Fig. 4. Diagrama ANN1.

2.2.2 Estructura de ANN1

Numero de capas 2.

Numero de neuronas en la primera capa: 220.

Numero de neuronas en la segunda capa 16.

Primera capa

$$f_1 = \text{Tangente sigmoide}$$

$$a_i = f_1 \left(\sum_{i=1}^{220} x_h w_{h,i} + b \right)$$

Segunda capa

$$f_2 = \text{Lineal}$$

$$y_j = f_2 \left(\sum_{j=1}^{16} w_{i,j} a_i + b \right)$$

3. MODELO MATEMÁTICO DE IRRADIACIÓN SOLAR

El modelo de irradiación solar global se divide en dos partes, la primera parte se presenta el modelo de irradiación solar global

sobre una superficie horizontal (I_H) y para la segunda parte el modelo de irradiación sobre una superficie inclinada (G), esto es necesario puesto que al tomar la irradiación solar sobre una superficie inclinada aporta datos más reales a la cantidad de irradiación que percibe un sistema fotovoltaico.

3.1 Irradiación solar global sobre una superficie horizontal

La radiación solar global sobre superficies horizontales se puede medir utilizando un piranómetro, el cual tiene la capacidad de medir el flujo de radiación solar sobre una superficie plana en un ángulo de 180° . La radiación solar global en superficies horizontales se puede clasificar en la suma de dos tipos de irradiación, la irradiación solar directa (I_b) y la irradiación solar difusa (I_d) (John A. Duffi, 2013).

$$I_H = I_d + I_b \quad (1)$$

La irradiación difusa (I_d), es la que se recibe del sol después de ser desviada por dispersión atmosférica, es decir es aquella radiación que pasa a través de las nubes, así como factores climáticos en el ambiente. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro aun de día, como sucede con la Luna (Adalberto Tejeda Martínez, 2015).

Para obtener la irradiación solar difusa en una superficie horizontal (I_d) se calcula la irradiación de haz solar (I_{bN}) extraída de valores constantes (A, B, C) mostrada (Seyed Abbas Mousavi Maleki H. H., 2017). y en que dependen de la fecha analizada y del ángulo de cenital (θ_z) calculado previamente.

$$I_{bN} = A \exp\left(-\frac{B}{\cos\theta_z}\right) \quad (2)$$

donde:

I_{bN} : Irradiación de haz solar.

A, B, C : son valores constantes de tabla.

Posteriormente se calcula el índice de claridad (M_t), del cual depende de I_{d1} y de I_{H1} , obtenidos con modelos paramétricos (Seyed Abbas Mousavi Maleki H. H., 2017).

$$I_{H1} = I_{bN} \cos\theta_z + I_{d1} \quad (3)$$

$$I_{d1} = C I_{bN} \quad (4)$$

Una vez obtenido índice de claridad (M_t) con la irradiación global horizontal (I_{H1}) y la irradiación extraterrestre se evalúa M_t con respecto de los siguientes parámetros, para finalmente obtener la irradiación difusa sobre una superficie horizontal (I_d).

$$M_t = \frac{I_{H1}}{I_0} \quad (5)$$

$$0 < M_t \leq 0.24, \quad I_d = (1.0086 - 0.178M_t) \quad (6)$$

$$0.24 < M_t \leq 0.8,$$

$$I_d = (0.9686 + 0.1325M_t + 1.4183M_t^2 - 10.1862M_t + 8.3733M_t^4)I_{H1} \quad (7)$$

$$0.8 < M_t \leq 1, I_d = (1.0086 - 0.178M_t)I_{H1} \quad (8)$$

La irradiación solar directa es la parte que se recibe directamente del sol sin sufrir ninguna dispersión atmosférica, por lo tanto, la radiación extraterrestre es radiación directa.

$$I_b = I_{bN} \cos\theta_z \quad (9)$$

4. AJUSTE DE IRRADIACIÓN SOLAR

La red neuronal artificial 2 (ANN2) es la encargada de realizar la corrección que existe entre en el cálculo teórico de la irradiación solar global sobre una superficie horizontal, puesto que el modelo no contempla los cambios provocados por los cúmulos de nubosidad, esta red busca integrar ese dato indispensable, influyendo directamente sobre el cálculo matemático de I_H

4.1 Red neuronal artificial 2 (ANN2)

Para obtener la irradiación solar global horizontal real ($\hat{I}_H$) es necesario ingresar en como datos de entrada los 16 niveles de pixel obtenidos de ANN1, los datos de irradiación solar horizontal calculada del modelo teórico de irradiación solar global horizontal (I_H) y la hora local (h) del día en cuestión, todos los datos concatenados para después ser procesados en la red neuronal 2. Cabe mencionar que ANN2 no solo realiza la corrección de I_H , también al realizar la corrección utilizando $\sqrt{VPx}$ se obtiene una estimación de $\hat{I}_H$ para las horas siguientes.

Datos de entrada:

1. Irradiación solar horizontal calculada del modelo teórico de irradiación solar global horizontal (I_H).
2. Valor de pixel predicho (VPx).
3. Hora local (h).

4.2 Estructura de ANN2

Numero de capas 2.

Numero de neuronas en la primera capa: 5.

Numero de neuronas en la segunda capa 1.

f_1 = Tangente sigmoide

$$a_j = f_1 \left(\sum_{i=1}^{18} x_i w_{h,i} + b \right)$$

f_2 = Lineal

$$y_j = f_2 \left(\sum_{j=1}^5 w_{i,j} a_i + b \right)$$

5. MODELO DE IRRADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA

5.1 Introducción del I_H

La predicción de I_H , así como el efecto de la nubosidad sobre la irradiación se introduce en las ecuaciones de la irradiación inclinada realizando un despeje de I_H obteniendo los valores de I_d y también I_b de los cuales depende el cálculo de la irradiación inclinada

$$I_H = I_d + I_b \quad (10)$$

$$I_H = I_{bN} \cos\theta_z + I_d \quad (11)$$

$$I_d = I_H - I_{bN} \cos\theta_z \quad (12)$$

$$I_b = I_H - I_d \quad (13)$$

5.2 Irradiación solar global sobre una superficie inclinada

En la literatura nos podemos encontrar con una infinidad de modelos de irradiación solar difusa en una superficie inclinada, los cuales se desempeñan con mejor eficacia en diferentes tipos de condiciones climáticas, en esta tesis se utilizó el modelo de Pérez (Seyed Abbas Mousavi Maleki H. H., 2017).

Modelo de Pérez:

$$I_{d\beta} = I_d \left[1 + \frac{\cos\beta}{2} (1 - F_1) + \frac{F_1 a_1}{a_2} + F_2 \sin\beta \right] \quad (14)$$

Donde:

$I_{d\beta}$: irradiación solar difusa sobre una superficie inclinada.

I_d : irradiación solar difusa sobre una superficie horizontal.

F_1 y F_2 : Coeficientes de brillo del cielo.

a_1 y a_2 : Ángulos de región circunsolar.

β : Inclinación del panel en grados.

$$a_1 = \max \{0, \cos\theta\} \quad (15)$$

$$a_2 = \max \{\cos 85^\circ, \cos\theta_z\} \quad (16)$$

$$F_1 = \max \left\{ 0, \left[F_{11} + F_{12}\Delta + F_{13}\theta_z \left(\frac{\pi}{180} \right) \right] \right\} \quad (17)$$

$$F_2 = \left[F_{12} + F_{22}\Delta + F_{23}\theta_z \left(\frac{\pi}{180} \right) \right] \quad (18)$$

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_0} \quad (19)$$

$$m = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (20)$$

donde:

m : Masa del aire.

I_0 : Radiación extraterrestre $\left(\frac{W}{m^2} \right)$

Es necesario calcular ε que está en función de la irradiación difusa para obtener $F_{i,j}$ propuesto en el modelo de Pérez:

$$\varepsilon = I_d + \frac{I_b}{I_d} + 5.535 \times \frac{10^{-6}\theta_z^3}{1 + 5.535 \times 10^{-6}\theta_z^3} \quad (21)$$

Irradiación solar directa sobre una superficie inclinada ($I_{b\beta}$).

El valor de radiación de haz directo en una superficie en ángulo se puede calcular utilizando la siguiente ecuación (Seyed Abbas Mousavi Maleki, 2017):

$$I_{b\beta} = r_b I_b \quad (22)$$

Donde, r_b es la proporción de radiación por hora recibida por una superficie en ángulo con respecto a una superficie horizontal fuera de la atmósfera terrestre.

$$r_b = \cos\theta \cos\theta_z \quad (23)$$

θ_z : Ángulo de zenith solar.

θ : Ángulo de incidencia.

6. SIMULACIONES

En las figuras 5, 6, 7 y 8 se muestran los resultados de las simulaciones en las que, como podemos observar, difieren en ciertos puntos, sin embargo, es importante resaltar que las muestras de irradiación extraídas del IMTA con coordenadas 18.8850777, -99.1583316, del día 21 de junio del 2020, solo competen al pixel 11 (P11), el cual es señalado en estas mismas ilustraciones.

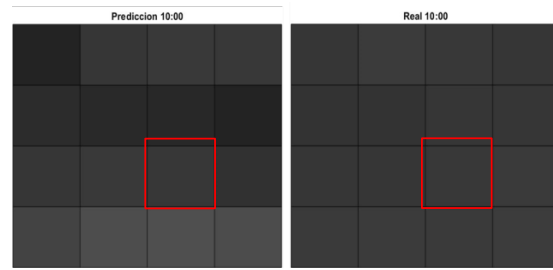


Fig. 5. Comparación a las 10:00 horas.

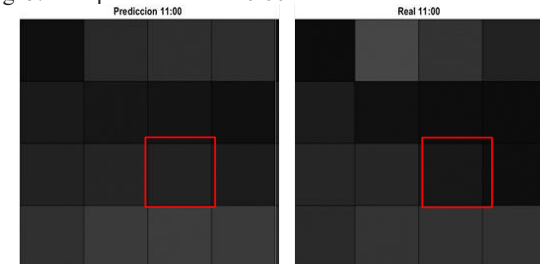


Fig. 6. Comparación a las 11:00 horas.

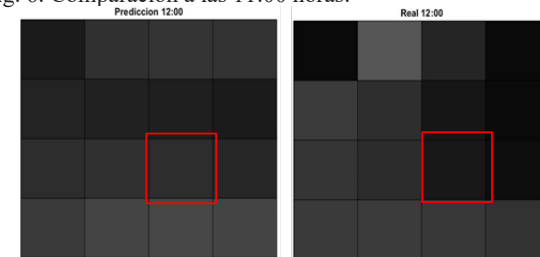


Fig. 7. Comparación a las 12:00 horas.



Fig. 8. Comparación a las 13:00 horas.

En la figura 9 podemos observar una discrepancia mayor, aun en el punto de análisis directo, esto es por que mientras más va aumentado el número de pasos de predicción, el error también incrementa, por lo cual en este punto empieza a ser más visible el error.



Fig. 9. Comparación a las 14:00 horas.

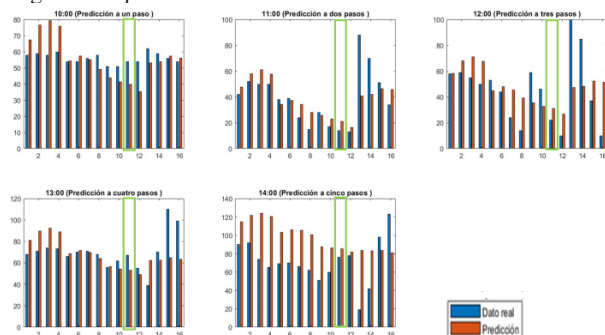


Fig. 10. Gráficas de las comparaciones.

En las Tabla 1, se muestra el error cuadrático medio porcentual que existe entre cada una de los resultados comparando, con esto, podemos evaluar el nivel de confiabilidad de este proceso en cada uno de sus puntos de análisis.

Tabla 1. Error Cuadrático Medio (ERMS) porcentual.

ERMS	
10:00	11.1859 %
11:00	15.4754 %
12:00	18.2533 %
13:00	23.6643 %
14:00	37.5732 %
Promedio total (%)	27.5445 %

7. CONCLUSIONES

Como podemos observar es posible obtener datos predictores de irradiación solar, las predicciones presentan cierto margen de error que como se puede apreciar en los niveles de ERMS conforme aumentan los pasos en la predicción también aumenta en cierto grado el error, es por esto, que se documentaron las predicciones en los primeros 5 pasos puesto que el error aún permanece relativamente pequeño para la predicción. Por otra parte, otro dato importante de resaltar es que el método híbrido entre las redes neuronales y los modelos teóricos representan resultados congruentes. Este modelo de predicción será utilizado en conjunto con un modelo de panel fotovoltaico y convertidor.

REFERENCIAS

Beltrán, L., Villanueva, E., Muñozcano, L., Rodríguez, J., Michelle, R., Ana, P., Antonio, R., & David, R. (2018). Reporte de Avance de Energías Limpias Primer Semestre 2018 Secretaría de Energía: Elaboración y Revisión. Sener, 21. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/418391/RAE_L_Primer_Semestre_2018.pdf

Maleki, S. A. M., Hizam, H., & Gomes, C. (2017). Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: Models re-visited. *Energies*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/en10010134>

Vargas, G., Neira, O., Arango, R., & Fernando, D. (2013). Métodos de segmentación de nubes en imágenes satelitales Cloud segmentation methods applied to satellite images. *Tecnura*, 17(36), 96–110. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0

GPM Global Rainfall Map Algorithm Development Team. (2014). Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) for GPM Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD): Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD): Algorithm Ver.6. September, 17. <http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/>

Alsadi, S. Y., & Nassar, Y. F. (2017). Estimation of Solar Irradiance on Solar Fields: An Analytical Approach and Experimental Results. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(4), 1601–1608. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2697913>

Maleki, S. A. M., Hizam, H., & Gomes, C. (2017). Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: Models re-visited. *Energies*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/en10010134>

Chaibi, Y., Allouhi, A., Malvoni, M., Salhi, M., & Saadani, R. (2019). Solar irradiance and temperature influence on the photovoltaic cell equivalent-circuit models. *Solar Energy*, 188(January), 1102–1110. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.005>

Senapati, R. N., Sahoo, N. C., & Mishra, S. (2017). Convolution integral based multivariable grey prediction model for solar energy generation forecasting. *PECON 2016 - 2016 IEEE 6th International Conference on Power and Energy, Conference Proceeding*, 663–667. <https://doi.org/10.1109/PECON.2016.7951643>

Dhoot, R., Agrawal, S., & Shushil Kumar, M. (2019). Implementation and Analysis of Arima Model and Kalman Filter for Weather Forecasting in Spark Computing Environment. 2019 Proceedings of the 3rd International Conference on Computing and Communications Technologies, ICCCT 2019, 105–112. <https://doi.org/10.1109/ICCCT2.2019.8824870>

Generación de Luz en el Espectro Visible Utilizando Lofina Como Medio Fluorescente

Marcoantonio Ramírez Morales*, Jorge Luis Camas Anzueto*, Rubén Grajales Coutiño*,
Madain Pérez Patricio**, Ariel Fong González**, Carlos Alberto Megchum Ruedas**

*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica.

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica.

Resumen: En este trabajo de investigación la combinación de diversas fuentes de luz ultravioleta que inciden sobre las muestras de lofina, generan diversas tonalidades de luz visible (400 nm – 700 nm) a la vez sintonizadas por las variaciones de temperatura en el material fluorescente. Algunas muestras específicas a diferentes temperaturas en combinación con longitudes de onda ultravioletas, generan luz blanca. En los resultados obtenidos, se observa que al variar la temperatura el ancho espectral y la amplitud de emisión cambian, por lo que es posible generar fuentes de luz sintonizables.

Palabras clave: Espectro visible, Luz blanca, Fluorescencia, Temperatura, Fuentes sintonizables.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo los dispositivos luminiscentes generan radiación en el visible, éstos han tenido diferentes etapas de evolución en áreas de diseño, fabricación, investigación e innovación para generar luz de manera más eficiente, la luz visible se sitúa en el rango de los 400 nm a 700 nm de espectro electromagnético.

Actualmente el uso del LED, tomo en cuestión de décadas sustituir la mayor parte de antiguas fuentes de iluminación, contemplando su gran eficiencia en comparación de sus antecesoras como se muestra en la Fig. 1.

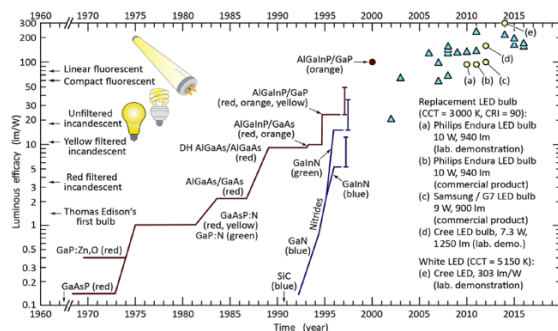


Fig. 1. Eficiencia lumínica (Cho et al., 2017).

La generación de luz a partir del uso de materiales fluorescentes esta dado por la capacidad que tienen ciertos elementos químicos para absorber energía en forma de radiación y emitirlos a longitudes de onda mayores como se muestra en la Fig. 2. El uso del fosforo YAG: Ce para la generación de luz blanca.

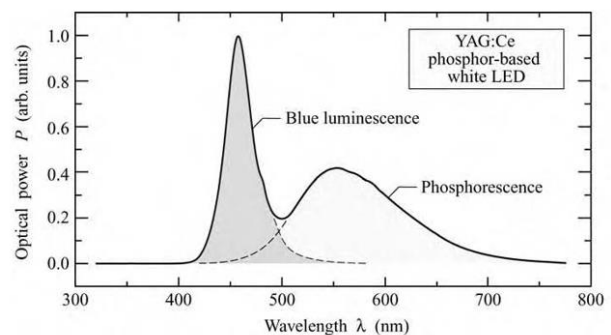


Fig. 2. Fluorescencia (Y₃Al₅O₁₂: Ce³⁺) (Schubert 2006, p. 354).

En la literatura se menciona que para generar luz blanca a partir de chips RGB requiere un complejo acoplamiento de circuitos, lo cual resulta muy costoso, proponen capas de fósforos RGB en forma de matriz con nueve configuraciones para generar luz multicolor (Zhu et al., 2020).

En el 2019, se realizó una investigación donde se describe el uso de fósforos cristalizados, tienen ventajas únicas que los polvorientos (fósforos en polvo para la generación de luz blanca), elaboraron un fósforo $C_{52}X_{16}:Mn^{4+}$ basado en cristales milimétricos, mostrando una eficiencia luminosa significativamente mejorada en la generación de luz (Wang *et al.*, 2019).

Investigadores en 2017 hacen referencia al uso de puntos de carbono para la creación de dispositivos optoelectrónicos, desarrollaron puntos de carbono de emisión blanca, utilizados como fósforos indicaron que se puede emitir luz blanca tanto en estado sólido como en líquido (Ping *et al.*, 2017).

Científicos desarrollaron un nuevo fósforo a base de oxifloruro el cual dopado con Mn^{4+} , el oxiofluoroniobato $Rb_5Nb_5OF_{18}:Mn^{4+}$ tiene una amplia banda de excitación que cumple con el requisito del chip azul GaN, un conjunto de diodos leds fueron fabricados recubriendo con este fosforo como medio fluorescente (Yang *et al.*, 2019).

Hana en el 2018, menciona que los puntos de carbono son nuevos materiales luminosos, desarrollan fósforos para emitir longitudes de onda rojos y verdes a base de puntos de carbono y estos fósforos se depositaron en un chip azul y el resultado fue luz blanca con una eficiencia de 44.15lm/W (Hana *et al.*, 2018).

En este proyecto de investigación se estudia el fenómeno físico de fluorescencia en la lofina, que es un material orgánico ópticamente activo y dependiente de la temperatura.

2. ARREGLO EXPERIMENTAL

En el arreglo experimental se usaron dos fuentes de luz ultravioleta una de 370 nm y otra de 385 nm propuesto para esta investigación. Se incluyó un porta Led que es la base para los diodos emisores de luz, éstos se introducen en una de las cavidades del QPOD formando un ángulo de 90° con relación al espectrómetro Ocean Optics HR4000CG-UV-NIR para medir la fluorescencia, y en el centro del QPOD se coloca la muestra (Lofina), como se muestra en la Fig. 3.

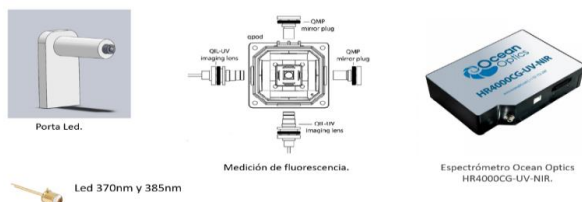


Fig. 3. Materiales para el arreglo experimental.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Fig. 4. Se observa el comportamiento de la lofina a una temperatura de 0°C con una fuente de excitación de 385 nm y en la Fig.5. Se visualiza el aumento de temperatura de 50°C donde se aprecia en ambas figuras la diferencia de comportamiento de la fuente de absorción (fuente de luz uv) y de emisión de fluorescencia.

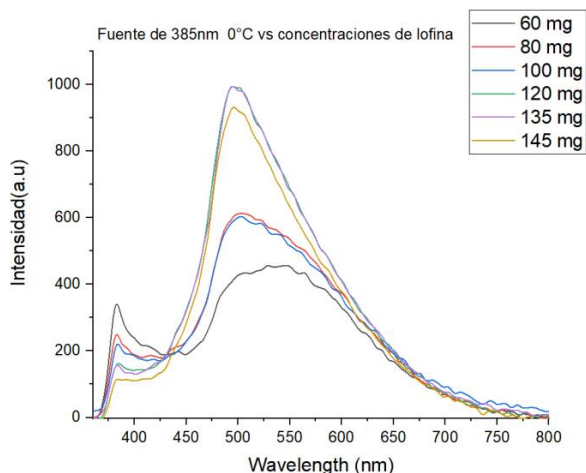


Fig. 4. Led 385 nm 0°C vs concentraciones.

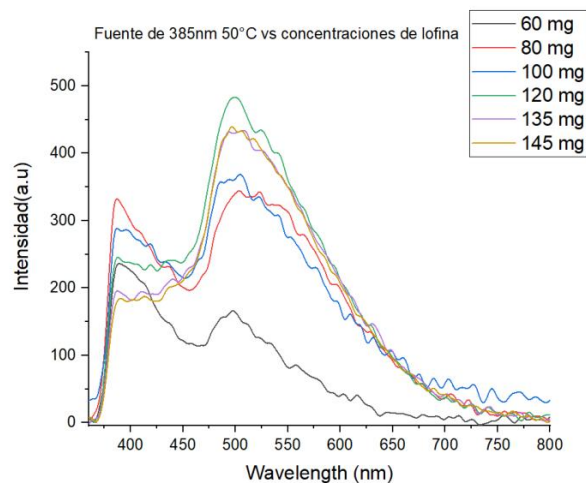


Fig. 5. Led 385 nm 50°C vs concentraciones.

3.1 Colorimetría

La colorimetría llamada ciencia del color es un tipo de estudio que permite la caracterización de las tonalidades cromáticas de las muestras que se estudiaron y está dado por las siguientes ecuaciones:

Las funciones de color CIE 1931 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$ son valores tabulados que representan el hecho que el ojo humano es trimétrico es decir que cualquier fuente de luz se puede describir con esas tres funciones, cabe destacar que estas funciones y el diagrama de cromaticidad no son únicos.

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Los valores de X, Y y Z de la ecuación (1), (2), y (3) representan los valores triestímulos que dan la estimulación de los colores primarios, $P(\lambda)$ representa la potencia de la longitud de onda.

Las coordenadas de cromaticidad x, y se calculan a partir de los valores triestímulos como indican las siguientes ecuaciones.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (5)$$

El valor de cada coordenada de cromaticidad es la estimulación de cada luz primaria dividida entre toda la estimulación que percibe el ojo humano. Las ecuaciones (4) y (5) se representan en el diagrama de cromaticidad CIE 1931 como se muestra en la Fig.6.

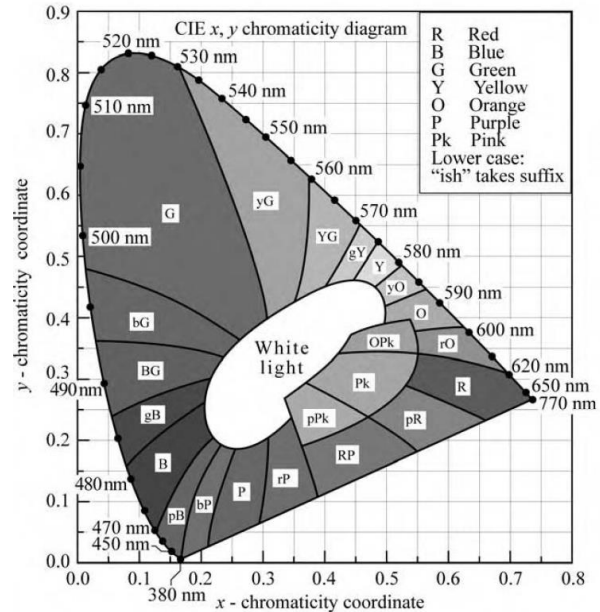


Fig. 6. Distribución de colores en el diagrama de cromaticidad CIE 1931 (Schubert 2006, p. 296).

En la Fig.7. Se muestra el comportamiento del material termocrómico de 100 mg variando la temperatura y en la figura 8, se observa el diagrama de cromaticidad de este análisis al variar la temperatura de 0°C a 50°C.

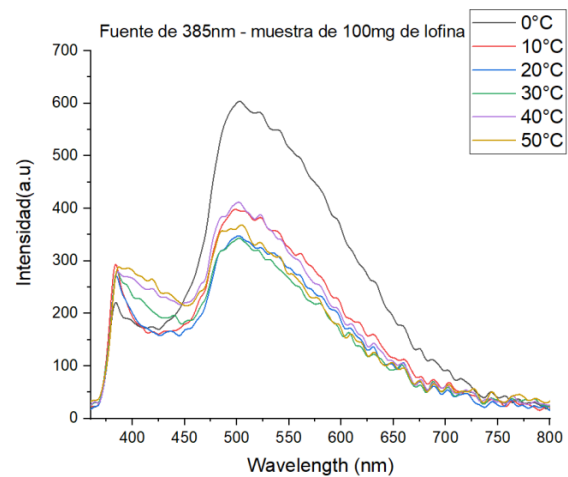


Fig. 7. Led 385nm muestra 100 mg vs Temperaturas.

Aplicando las ecuaciones mencionadas con anterioridad para el análisis de colorimetría se obtienen los siguientes valores como se muestra en la tabla 1. La representación de cromaticidad de la muestra que se analizó Fig.7. Se tabulan en el CIE 1931 como se muestra en la Fig.8.

Tabla 1. CIE 385 nm a 100 mg de lofina.

	x	y
0°C	0.2443	0.3420
10°C	0.2365	0.2932
20°C	0.2179	0.3752
30°C	0.2067	0.3783
40°C	0.2114	0.4352
50°C	0.2477	0.4079

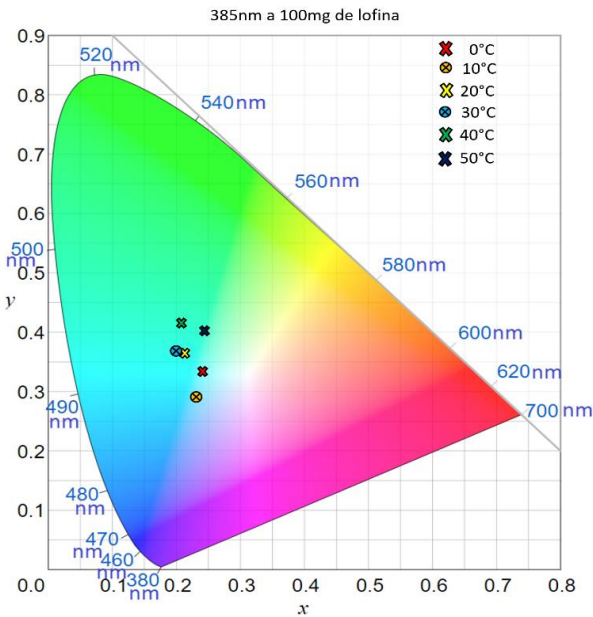


Fig. 8. Diagrama CIE 1931 Led de 385 nm – muestra de 100 mg.

Análisis de resúltalos en Led 370 nm

En la Fig.9. Se aprecia el comportamiento de una muestra de lofina de 100 mg con una fuente de luz de 370 nm.

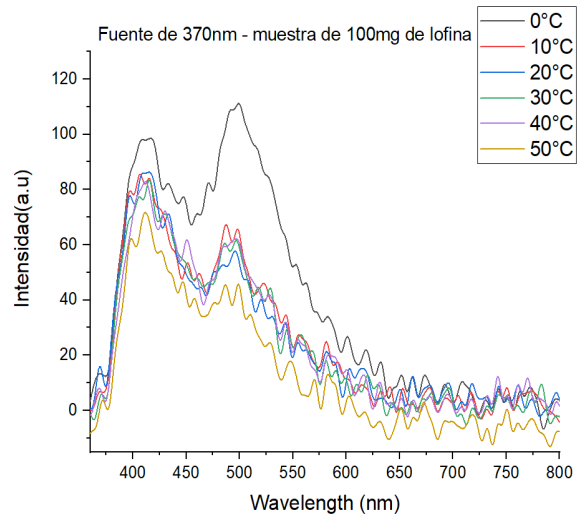


Fig. 9. Led 370 nm muestra 100 mg vs Temperaturas.

Al aplicar las ecuaciones de colorimetría se obtiene los valores de cromaticidad de la muestra de 100 mg de lofina al ser expuesta a una fuente de luz de 370 nm como se muestra en la tabla 2 y se visualiza los valores tabulados en el diagrama del CIE 1931 como se observa en la Fig.10.

Tabla 2. CIE 370 nm a 100 mg de lofina.

	x	y
0°C	0.1354	0.1898
10°C	0.9613	0.1908
20°C	0.1077	0.1923
30°C	0.1317	0.1258
40°C	0.1601	0.2822
50°C	0.1165	0.3155

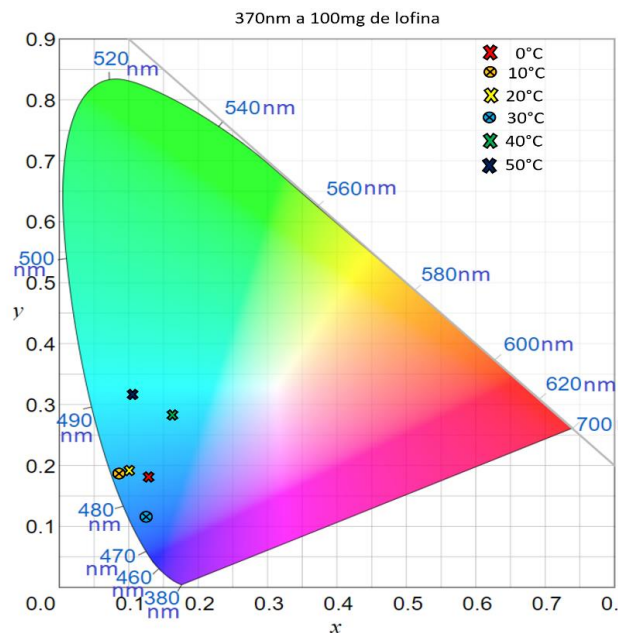


Fig. 10. Diagrama CIE 1931 Led de 370 nm – muestra de 100 mg.

4. CONCLUSIONES

Al usar una fuente de luz de 370 nm el espectro de emisión de fluorescencia de la lófina a 100 mg es baja, lo que permite sintonizar fuentes de luz aproximadamente de 475 nm a 490 nm variando la temperatura de 0°C a 50°C. Este análisis, no permite la generación de luz blanca, porque en la generación de luz blanca se necesita una fluorescencia alta que se desplace su ancho espectral sobre la región visible de 400 nm a 700 nm.

Al analizar una fuente de luz de 385 nm con una muestra de 100 mg se observa una mejor eficiencia de fluorescencia en comparación con la fuente de 370 nm, permitiendo sintonizar fuentes de luz blanca variando la temperatura de 0°C a 50°C.

REFERENCIAS

- Cho, J. Park, J. Hyuk, K. Jong, K. Schubert, E., 2017. White light- emitting diodes: History, progress, and future, *Laser and photonics reviews*, 1600147.
- Hana, Z. Kai, W. Fanglin, D. Zhengmao, Y. Zheng, X. Shuyun, Z., 2018. High Efficiency Red Emission Carbon Dots Based on Phenylene Diisocyanate for Trichromatic White and Red LEDs *Journal of Materials Chemistry C*, 1 of 17, 1-3.
- Ping Jiang, B. Yun-Xiang, Y. Xiao-Lu, G. Zhao-Yang, D. Bo, Z. Hong, L. Xing-Can, S., 2017. White-emitting carbon dots with long alkyl-chain structure: Effective inhibition of aggregation caused quenching effect for label-free imaging of latent fingerprint, *ScienceDirect, Carbon* 128, 12-20, 13-16.
- Schubert, E., 2006. *Light Emitting Diodes*. 2th edn Cambridge university y press, EUA.
- Wang, Z. Yang, Z. Wang, N. Zhou, Q. Zhou, J. Ma, L. Wang, X. Xu, Y. Miroslav, D D. Mikhail G, B. Wu, M., 2019. Single-Crystal Red Phosphors: Enhanced Optical Efficiency and Improved Chemical Stability for wLEDs, *Advanced optical Materials*, 1901512 (3 of 5).
- Yang, Z. Yang, Z. Wei, Q. Zhou, Q. Wang, Z., 2019. Luminescence of red-emitting phosphor $\text{Rb}_5\text{Nb}_3\text{OF}_{18}:\text{Mn}^{4+}$ for warm white light-emitting diodes, *Journal of Luminescence*, 210 409-411.
- Zhu, H. Fu, R. Shi, Y. He, Q. Wang, H. Liu, X., 2020. Multi-colour light emission based on pixel-array phosphor layer in LEDs, *Journal of Luminescence*, 3-6.

Análisis del comportamiento de vapor de agua en una turbina de adhesión de pequeña potencia

Yesenia Netzahual Acoltzi^{1*}, Jorge Bedolla Hernández^{1**}
Vicente Flores Lara^{1***}, María Dolores Durán García^{2****}

¹Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Apizaco, Av. Instituto Tecnológico S/N. CP. 90300, Apizaco Tlaxcala, México.

²Universidad Autónoma del Estado de México/ Facultad de Ingeniería, Carretera Toluca-Ixtlahuaca, km 14.5. CP. 50200, Toluca, Estado de México.

*Tel: 246 156 10 30; e-mail: m19371387@apizaco.tecnm.mx.

**e-mail: jorge.bh@apizaco.tecnm.mx

*** e-mail: vicente.fl@apizaco.tecnm.mx

****e-mail: mddurang@uaemex.mx

Resumen: El diseño de dispositivos para la micro generación de energía dentro de ciclos con fuente de energía de bajo grado de calor requiere de su estudio para la adecuación de condiciones y parámetros de operación. En ese sentido este trabajo se enfoca en el análisis numérico unidimensional del comportamiento del vapor de agua en la trayectoria que existe sobre los discos de una turbina de adhesión, con rango de potencia a pequeña escala (0.1-1 kW). Se analizan los perfiles de velocidad y presión en función de la relación de los radios del disco, mediante un código de programación 1D en EES (Engineering Equation Solver). Las condiciones de presión y temperatura en la entrada del rotor se consideran de 320 kPa y 160°C. Para el proceso de simulación se mantienen fijos los siguientes parámetros: caudal másico, temperatura, velocidad de salida de la boquilla, velocidad angular, espacio y número de discos. Todo esto para evaluar la potencia generada de la turbina como función del comportamiento del fluido. Los resultados muestran que para una relación de radios de 0.3-0.2 se obtiene un rango de potencia de 180 W-194 W en la flecha de la turbina, con una diferencia de presión promedio de 110 kPa, cuyo gradiente es menor en comparación de valores de $r_i/r_o < 0.2$ y con un valor de potencia mayor en comparación de valores de $r_i/r_o > 0.3$.

Palabras clave: micro generación, modelo 1D, potencia, turbina de adhesión, vapor de agua.

INTRODUCCIÓN

Debido a la gran demanda energética a nivel mundial, en los últimos años se pronostica una duración de los combustibles fósiles inferior a los 200 años, y la de los hidrocarburos se estima no rebasa los 50 años (Landa, 2008). El precio del crudo y sus derivados se han elevado considerablemente y con incremento paulatino en el futuro. Ambas realidades obligan a usar eficientemente los combustibles fósiles y considerar el uso de energía renovable. Por lo que es necesario adaptar parámetros de fluido alternos, como los brindados por fuentes de energía de bajo grado obtenidos en función de biomasa, geotermia, solar, etc., a ciclos en los que operen a presiones y temperaturas que brinde la fuente de energía renovable.

Un ciclo que se adecua a bajas temperaturas de ebullición del fluido es el ORC (Ciclo Orgánico Rankine), que trabaja con fluidos orgánicos (refrigerantes e hidrocarburos), pero el uso de estos fluidos está restringido por la contaminación al medio ambiente (Neckel et al., 2015). Por otro lado, el vapor de agua resulta un fluido que no contribuye a la emisión de gases contaminantes, por lo que la adaptación del vapor de agua a un

nuevo ciclo de energía requiere del diseño de los elementos que lo componen, como los dispositivos de la gama de micro generación en los que se encuentra la turbina de adhesión o turbina Tesla. El interés de la turbina de adhesión ha generado diversos estudios de pruebas experimentales. Sin embargo, todavía existe una brecha en el análisis numérico de la dinámica de fluidos compresibles reales en el rotor, para ciclos de energía de baja potencia y temperatura, de acuerdo con Manfrida et al. (2019). La trayectoria del fluido en la turbina de adhesión inicia en la boquilla, donde aumenta su velocidad, para después entrar en el rotor en la periferia de los discos (r_o), y la salida del fluido es cerca del centro de los discos (r_i), Guha et al. (2013). El comportamiento del fluido dentro del rotor ha sido estudiado por Garrison et al. (1976), donde se presentó un modelo numérico para la predicción del flujo compresible laminar de turbinas Tesla, la predicción de la eficiencia del modelo alcanzó valores tan altos como el 90%, con caudales másicos bajos y una relación del diámetro de entrada y salida del rotor entre 0.2 y 0.4. En Carey (2010) se realizó un modelo idealizado bidimensional de transferencia de impulso en el rotor, y lo utilizó para predecir la eficiencia de la turbina en un sistema de energía y calor

combinado de ciclo Rankine solar de 4 kW, con vapor como fluido de trabajo, donde se predijo una eficiencia isentrópica de la turbina del 75%.

En Talluri et al. (2018) se realizó un diseño y optimización de la turbina Tesla para aplicaciones ORC, como resultado del proceso se evaluaron tres configuraciones diferentes de turbinas; la eficiencia máxima evaluada fue del 64%, con un diámetro de rotor de 0.5 m y n-hexano como fluido de trabajo. La potencia por un solo canal de dicha configuración fue de 58 W.

En Manfrida et al. (2019) se revisó el modelo matemático de la turbina Tesla, utilizando las ecuaciones diferenciales de presión y velocidad en función del radio del disco en el modelo presentado por Talluri et al. (2018). Donde se presenta un análisis de rendimiento del rotor de la turbina Tesla, lo que permitió comprender los principales parámetros que influyen en la eficiencia de la turbina y lograr un diseño del rotor con una eficiencia superior al 90%.

Tomando en cuenta lo anterior, la finalidad principal de este trabajo radica en describir el comportamiento del fluido (vapor de agua) de una turbina de adhesión adaptada a temperaturas y presiones de un fluido proveniente de una fuente de energía de bajo grado de calor; que corresponde a combustibles tales como la biomasa. Para el análisis del fluido se hace uso de los parámetros iniciales del fluido y condiciones de operación presentados en Talluri et al. (2018), que describe las variaciones de la presión y velocidades del fluido en la trayectoria radial de los discos, para determinar el momento angular que transfiere el fluido al disco que permite evaluar la potencia, para la selección de los parámetros geométricos del diseño y optimización de la turbina de adhesión.

2. FUNDAMENTO TEORICO

El modelo analítico de Manfrida et al. (2019), considera los siguientes supuestos.

a) Flujo laminar estable.

b) La fuerza viscosa se considera como una fuerza de cuerpo que actúa sobre el flujo en cada posición (Manfrida et al., 2019)
 $V_z = 0$; $V_r = \text{constante}$ a través del canal; $V_\theta = \text{constante}$ a través del canal.

c) Campo de flujo simétrico radial. Por lo tanto, $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$ para todas las variables de flujo.

d) $\frac{\partial P}{\partial \theta}$ es insignificante en comparación con las fuerzas de fricción de la pared.

Con estos supuestos las ecuaciones fundamentales de Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas se reducen a:

a) Continuidad

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho V_r)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

b) Momento en la dirección radial

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right) + f_r \quad (2)$$

c) Momento en la dirección tangencial

$$V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_r V_\theta}{r} = f_\theta \quad (3)$$

d) Momento en la dirección axial

$$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

La dirección de las fuerzas de cuerpo de las Ecuaciones (2) y (3), se muestran en la Figura 1. Así como la dirección del gradiente de presión.

La integración de la ecuación (1) da como resultado $r\rho V_r = \text{constante}$. Conociendo la razón de flujo másico dentro de cada canal, se deduce la Ecuación (5), donde el área que genera $2\pi r b$ se muestra en la Figura 1.

$$V_r = -\frac{\dot{m}_c}{2\pi r b \rho} \quad (5)$$

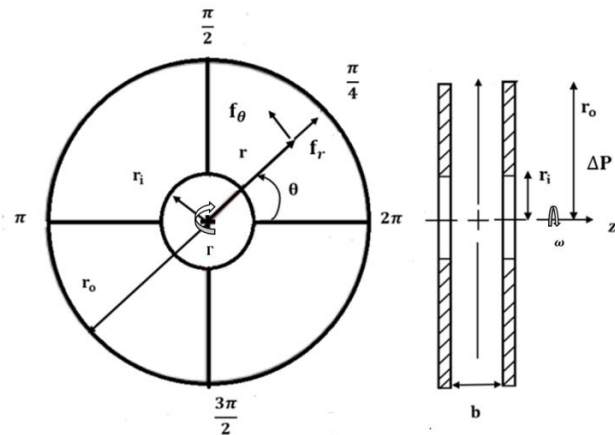


Fig.1. Sistema de coordenadas cilíndricas que muestra las fuerzas de cuerpo y el área generada por $2\pi r b$.

2.1. Formulación del esfuerzo cortante viscoso

Considerando un elemento del fluido entre dos discos que definen el canal de flujo, se puede definir un volumen de control (V_e), mostrado en la figura 2, de superficie base A_e y altura b . El área húmeda de fluido es $A_w = 2A_e$. Por lo tanto, el diámetro hidráulico D_h es igual a $2b$. Así que:

$$A_e = \frac{V_e}{b} = \frac{2V_e}{D_h} ; A_w = \frac{4V_e}{D_h} \quad (6)$$

Para flujo laminar, el efecto cortante en la pared se puede expresar como una función de la viscosidad dinámica y de la velocidad relativa del flujo. La ecuación (7) muestra la expresión del esfuerzo cortante en la pared.

$$\tau_w = \frac{12\mu}{D_h} \sqrt{(V_\theta - \omega r)^2 + V_r^2} \quad (7)$$

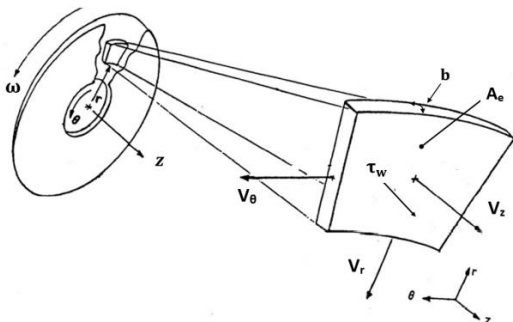


Fig. 2. Elemento de volumen de control

La fuerza resultante de la fuerza de fricción en la pared viene dada por el producto del cortante de la pared con el área húmeda.

$$F = \frac{12\mu Q_e}{b^2} \sqrt{(V_\theta - \omega r)^2 + V_r^2} \quad (8)$$

2.1 Solución del flujo del rotor

El campo de flujo con componentes de velocidad V_r y V_θ se consideran como no viscosos. El arrastre viscoso ejercido sobre el flujo por las paredes laterales del canal del rotor se modela como una fuerza del cuerpo que actúa sobre el flujo en cada posición.

La componente radial de la fuerza de fricción está dada por la ecuación.

$$F_r = F \cos(\beta); \cos(\beta) = \frac{W_r}{W} = \frac{V_r}{\sqrt{(V_\theta - \omega r)^2 + V_r^2}} \quad (9)$$

$$\therefore F_r = \frac{12\mu Q_e}{b^2} V_r \quad (10)$$

Dividiendo (10) por la masa del elemento fluido entre dos discos, el término de fuerza de cuerpo en dirección radial se puede expresar como:

$$f_r = \frac{12\mu}{\rho b^2} V_r \quad (11)$$

La fuerza de fricción en la dirección tangencial viene dada por:

$$F_\theta = -F \sin(\beta); \sin(\beta) = \frac{W_\theta}{W} = \frac{(V_\theta - \omega r)}{\sqrt{(V_\theta - \omega r)^2 + V_r^2}} \quad (12)$$

$$\therefore F_\theta = -\frac{12\mu Q_e}{b^2} (V_\theta - \omega r) \quad (13)$$

La fuerza de cuerpo en la dirección tangencial viene dada por

$$f_\theta = -\frac{3\mu}{\rho b^2} (V_\theta - \omega r) \quad (14)$$

El triángulo de velocidades, las fuerzas de fricción y la posición de los ángulos de incidencia del fluido (β y α), se muestra en la Figura 3.

Para determinar la presión se sustituye la ecuación (11) en la ecuación (2)

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{12\mu}{\rho b^2} V_r \quad (15)$$

Mediante la ecuación (5) la derivada $\frac{\partial V_r}{\partial r}$ puede ser expresada como

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} = -\frac{1}{r} V_r \quad (16)$$

Sustituyendo la ecuación (16) en (15) el gradiente de presión en la dirección radial está dado por

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{12\mu}{b^2} \frac{\dot{m}_c}{2\pi r b \rho} + \frac{\rho}{r} \left(\frac{\dot{m}_c}{2\pi r b \rho} \right)^2 + \frac{\rho}{r} V_\theta^2 \quad (17)$$

Para calcular la velocidad tangencial se sustituye por la ecuación (14) en la ecuación (3)

$$\frac{\partial V_\theta}{\partial r} = \frac{24\mu \pi r (V_\theta - \omega r)}{b \dot{m}_c} - \frac{V_\theta}{r} \quad (18)$$

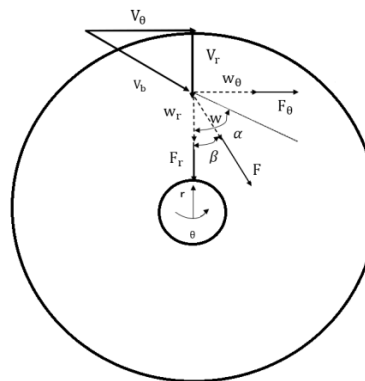


Fig. 3. Triángulo de velocidades y vectores de la fuerza de fricción en el disco del rotor

2. METODOLOGÍA

La metodología usada para determinar el comportamiento de velocidades y presiones en los discos, utilizando vapor de agua en la turbina de adhesión, es la siguiente:

- Definir el tipo de discretización
- Elaborar el diagrama de flujo del proceso de programación
- Establecer los parámetros de entrada del modelo.
- Programar las ecuaciones diferenciales (17) y (18).
- Comparar los resultados con los obtenidos en la literatura.
- Obtener resultados del uso de vapor agua a 320 kPa y 160 °C, para evaluar la potencia referida a la razón de radios.

3. MODELO 1D EN EES

Las ecuaciones (17) y (18) se resolvieron en EES (Engineering Equation Solver) de acuerdo con Klein et al. (2012) y se resolvió numéricamente aplicando diferencia finita centrada. El rotor se discretizó en dirección radial, por lo tanto, en el desarrollo de las ecuaciones del volumen se considera un sistema unidimensional. La Figura 4 muestra el volumen de control, donde solo se utiliza la dirección r igual a $i\Delta r$ (Kreith et al., 2012). El desarrollo de la discretización en coordenadas cilíndricas por diferencias finitas está dado por la ecuación (19) y el diagrama de flujo del modelo programado se presenta en la Figura 5.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} = \frac{U_{(i+1,j)} - 2U_{(i,j)} + U_{(i-1,j)}}{(\Delta r)^2} \quad (19)$$

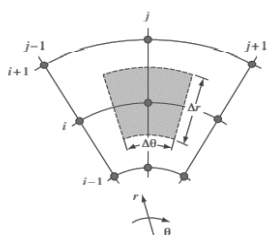


Fig. 4. Volumen de control para una geometría cilíndrica

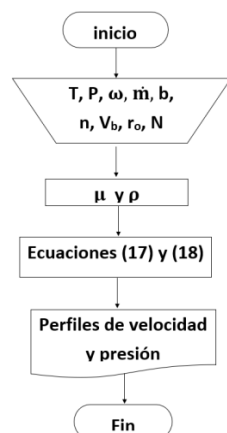


Fig. 5. Diagrama de flujo

4. VERIFICACIÓN DE DATOS DEL MODELO PROGRAMADO

En este apartado se presenta la verificación del programa realizado, utilizando los parámetros iniciales de Talluri et al. (2018) mostrados en la Tabla 1. La diferencia entre los resultados gráficos de la literatura y los aquí obtenidos, para presión, velocidad radial y tangencial se muestran en las Tablas 2, 3, 4,

donde todas las diferencias son menores o iguales a 8%, lo que se considera aceptable en un proceso de simulación.

Tabla 1. Parámetros de operación en el rotor utilizando aire

Parámetro	Valor
Presión de entrada en el rotor	160.200 Pa
Presión de salida en el rotor	131.234 Pa
Flujo másico	0.01119 kg/s
Velocidad angular	18000 rpm
Velocidad tangencial en la entrada	118.3 m/s
Velocidad radial en la entrada	5.14 m/s

Tabla 2. Diferencia de resultados de presión [kPa]

r_i / r_o	Resultados Talluri et al. (2018)	Resultados propios	% de variación
0.2	27	28.5	5.6
0.4	40	39.1	2.3
0.6	47	47.5	1.1
0.8	53	54.9	3.6
1	58	58	0.0

Tabla 3. Diferencia de resultados de Velocidad radial [m/s]

r_i / r_o	Resultados Talluri et al. (2018)	Resultados propios	% de variación
0.2	26	25.7	1.2
0.4	13	12.85	1.2
0.6	8	8.55	6.9
0.8	6	6.42	7.0
1	5.14	5.14	0.0

Tabla 4. Diferencia de resultados Velocidad tangencial [m/s]

r_i / r_o	Resultados Talluri et al. (2018)	Resultados propios	% de variación
0.2	90	85	5.6
0.4	88	95	8
0.6	98	105	7
0.8	113	112	0.9
1	118.3	118.3	0.0

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para este estudio se considera como fluido de trabajo el vapor de agua. Los parámetros iniciales para el estudio se muestran en la Tabla 5.

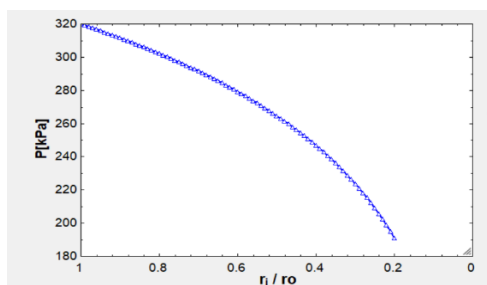
La potencia de la turbina se presenta en la Tabla 6, mediante las velocidades tangenciales a través de la ecuación (20)

$$W = \dot{m}\omega(v_{\theta o}r_o - v_{\theta i}r_i) \quad (20)$$

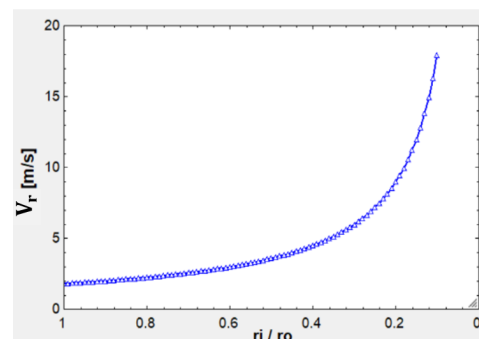
Tabla 5. Parámetros de operación en el rotor del utilizando vapor de agua

Parámetro	Valor
Temperatura	160 °C
Presión de entrada en el rotor	320 kPa
Presión de salida en el rotor	190 kPa
Flujo másico	0.01155 kg/s
Velocidad angular	6300 rpm
Velocidad tangencial en la entrada	250 m/s
Velocidad radial en la entrada	2.3 m/s

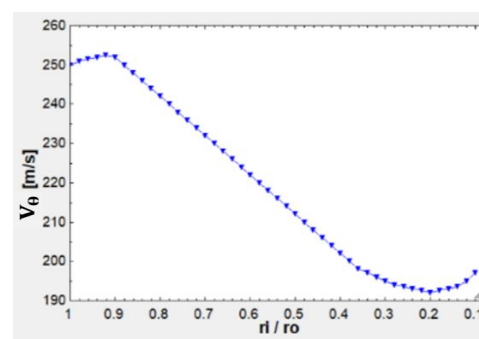
La Figura 6 a) muestra la distribución de la presión con la relación de radios del rotor. La cual disminuye monótonamente desde la periferia al centro, lo que se considera como una fuerza que impulsa el flujo de vapor de agua desde la entrada a la salida. La información de esta curva se usa para establecer una diferencia de presión mínima entre la entrada y salida; de forma tal, que considerando la evaluación de la potencia obtenida se elige la relación de radios del disco que presenta las mejores características de potencia entregada, con el gradiente de presión mínimo. En la figura 6 b) se muestra la velocidad radial, cuyo comportamiento mostrado es característico de ese parámetro en este tipo de turbinas, ya que siempre aumenta hacia el centro. Lo cual se determina por la ecuación de continuidad. La Figura 6 c) muestra el intercambio de momento angular en el rotor, de forma que la velocidad tangencial disminuye drásticamente cuando el fluido de trabajo fluye ligeramente hacia adentro en el rotor, lo que indica que la diferencia de velocidad entre el fluido de trabajo y el disco giratorio es considerable, por lo que la fricción de la pared se vuelve mínima.



a) Presión



b) Velocidad radial



c) Velocidad tangencial

Fig. 6. Perfiles de presión y velocidad utilizando vapor de agua

Tabla 6. Potencia de la turbina

r_i / r_o	0.8	0.6	0.4	0.2	0.18	0.14	0.12
$v_{\theta o}$ [m/s]	250	250	250	250	250	250	250
$v_{\theta i}$ [m/s]	240	232	200	190	194	196	197
ω [rad/s]	660	660	660	660	660	660	660
P[W]	53	101	156	194	197	200	203

6. CONCLUSIONES

Se presenta el comportamiento del fluido de vapor de agua para definir la relación de radios del disco, de acuerdo con la presión y velocidades que se desarrollan a causa de las fuerzas viscosas presentes en el rotor de una turbina de adhesión. Los resultados consideran valores fijos de caudal másico, temperatura, velocidad de salida de la boquilla, velocidad angular, espacio y número de discos.

Se verificó el proceso de simulación y se adecua el modelo simulado para usarse con vapor de agua. Se utilizan las propiedades termodinámicas, designadas por el programa EES, los valores de presión y temperatura en la entrada del rotor son de 320 kPa y 160 °C, respectivamente, los cuales corresponden a los parámetros de operación de un ciclo ORC, de acuerdo con Song (2017). El modelo se aplicó para evaluar los gradientes de velocidad y presión que ayudan a cuantificar la potencia entregada por la flecha de la turbina.

Se concluye que valores de r_i/r_o en un rango de 0.18 - 0.14, presentan las más altas potencias en la flecha, pero con altos gradientes de presión sobre el disco, ya que valores de r_i/r_o , menores a 0.2, disminuye drásticamente la presión obteniendo valores negativos, lo que representa un inconveniente para el diseño general de la turbina. Un rango óptimo para el funcionamiento de la turbina de adhesión es considerar valores de la relación de radios del disco de 0.3 - 0.2, ya que presentan los más altos valores de potencia de (180 -194 W) y un gradiente de presión menor a los valores de r_i/r_o entre 0.18-0.14.

NOMENCLATURA

A_e	Área del elemento del fluido [m ²]
A_w	Área de pared húmeda [m ²]
b	Espacio entre discos [m]
D_h	Diámetro hidráulico [m]
f_r	Fuerza de cuerpo por unidad de masa en dirección radial [N/kg]
f_θ	Fuerza de cuerpo en dirección tangencial por unidad de masa [N/kg]
F_r	Fuerza de fricción en dirección radial [N]
F_θ	Fuerza de fricción en dirección tangencial [N]
$\dot{m}$	Flujo másico [kg/s]
$\dot{m}_c$	Flujo másico por canal [kg/s]
N	Número de nodos
n	Número de discos
P	Presión [Pa]
Q_e	Caudal del elemento de fluido [m ³ /s]
r_i	Radio en la salida de flujo del rotor [m]
r_o	Radio en la entrada de flujo al rotor [m]
T	Temperatura [°C]
V_b	Velocidad en la salida de la boquilla [m/s]
V_e	Volumen del elemento fluido [m ³]
V_r	Velocidad radial [m/s]
V_z	Velocidad axial [m/s]
V_θ	Velocidad tangencial [m/s]
v_{ri}	Velocidad radial a la salida del rotor [m/s]
v_{ro}	Velocidad radial a la entrada al rotor [m/s]
$v_{\theta o}$	Velocidad tangencial en la entrada del rotor [m/s]
$v_{\theta i}$	Velocidad tangencial a la salida del rotor [m/s]
w	Velocidad relativa [m/s]
w_r	Velocidad relativa en dirección radial [m/s]

w_θ	Velocidad relativa en dirección tangencial [m/s]
W	Potencia [W]
α	Ángulo absoluto del fluido [°] = $\tan^{-1}(v_{\theta i}/v_{ri})$
β	Ángulo relativo del fluido [°]
μ	Coefficiente de viscosidad dinámica [kg/ms]
ρ	Densidad [kg/m ³]
Γ	Par torsor [N-m]
τ_w	Esfuerzo cortante en la pared húmeda [Pa]
ω	Velocidad angular [rpm]

REFERENCIAS

- Carey, V. (2010) Assessment of Tesla Turbine Performance for Small Scale Rankine Combined Heat and Power Systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, volumen (132), 122301-1 - 122301-8.
- Garrison, P., Harvey, D. (1976). Laminar compressible flow between rotating disks. *Journal of Fluid Engineering ASME*, volumen (98), 382– 388.
- Guha, A y Sengupta, S. (2013). The fluid dynamics of the rotating flow in a Tesla disc turbine, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, volumen (37), 112-115.
- Klein, S., Nellis, G. (2012) Mastering EES, f-Chart software.
- Kreith, F., Manglik, R., y Bohn, M. (2012). Análisis numérico en coordenadas cilíndricas. *Principios de transferencia de calor*. Sergio. R. Cervantes, Omar Ramírez (edit. Cengage). Séptima edición, pp. (215-217), México.
- Landa, J. (2008). Posibilidades de generación de energía eléctrica con ciclos de baja temperatura en la industria azucarera en una provincia tipo. *Revista Avanzada Científica*, volumen (11), 1-2.
- Manfrida, G y Talluri, L. (2019). Fluid dynamics assessment of the Tesla turbine rotor. *Thermal Science*, volumen (23), 1-6
- Neckel, A y Godinho, M. (2015) Influence of geometry on the efficiency of convergent-divergent nozzles applied to tesla turbines. *Experimental Thermal and Fluid Science*, volumen (62), 1-5
- Song, J. (2017). 1-D Model analysis of tesla turbine for small scale Organic Rankine cycle (ORC) system. *ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Charlotte, North Carolina, USA*, volumen (3), 1-3.
- Talluri, L., Fiaschi, D., Neri, G., Ciappi, L. (2018) Design and optimization of a Tesla turbine for ORC applications, *Applied Energy*, volumen (226), 304-306.

Determinación del coeficiente de pérdida de calor en recintos mediante modelado dinámico RC con LORD

Díaz-Hernández H. P.*, Jimenez M. J.**, Aguilar-Castro K. M.*, Macías-Melo E. V.*, Villar-Ramos M. M.*

*Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, DAIA-UJAT, Carretera Cunduacán – Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán, Tabasco, C.P. 86690, México (e-mail: heididiaz@hotmail.com).

**Energy Efficiency in Buildings R&D Unit, CIEMAT, Avenida Complutense No. 40, Madrid, E-28040, Spain

Resumen: Este artículo presenta la aplicación de modelos [dinámicos a través de circuitos térmicos](#) para obtener el coeficiente de pérdida de calor (HLC) a partir de mediciones *in situ* de un recinto en uso y [con características de consumo energético casi nulo](#). El recinto es parte de un edificio de oficinas ubicado en Almería, España. El análisis presentado en este estudio se centra en la identificación de las principales contribuciones al balance energético y su modelado para obtener el HLC. Para ello, se construyeron varios modelos candidatos de acuerdo con diferentes supuestos y aproximaciones plausibles referentes a los sistemas de climatización y suelo radiante que tiene el recinto. La validez de los resultados obtenidos con estos modelos se evaluó teniendo en cuenta la concordancia entre diferentes series de datos, separadas por temporadas de invierno y verano; así como, los residuales obtenidos con los diferentes modelos. El trabajo concluye obteniendo estimaciones precisas del HLC a partir del balance energético, incluidas las siguientes contribuciones relevantes: calefacción y climatización de espacios, ganancias solares, y ganancias internas debidas al consumo eléctrico.

Palabras claves: Coeficiente pérdida de calor, eficiencia energética, edificaciones.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el consumo energético en edificios representa el 40% del consumo de energía total a nivel mundial y tiene un potencial significativo para ahorrar energía y reducir las emisiones de CO₂. Debido a esto, existe un creciente interés por promover la eficiencia energética en los edificios, destacando la necesidad de aumentar el conocimiento sobre el rendimiento energético de los edificios e impulsando las actividades de investigación en este campo.

En México no existen regulaciones para edificios ya construidos y se estima que el 65% de las viviendas fueron producidas por autoconstrucción [1]. Por lo que, como parte de las iniciativas de eficiencia energética y la reducción de gases de efecto invernadero, se ha publicado la hoja de ruta para el Código y Normas de Eficiencia Energética para edificaciones en México. Con esta propuesta se busca reducir, para el 2050, el 35% del consumo final del sector de la edificación, así como, establecer la construcción de Net Zero Energy Buildings (NZEB) [2]. Debido a esto, es necesario disponer de metodologías de evaluación energética en edificaciones.

Para realizar la evaluación energética de los edificios es fundamental identificar y determinar las características térmicas de los edificios. Uno de los principales retos en materia de edificaciones a los que se enfrenta la comunidad científica, es la diferencia que existe entre el comportamiento energético

obtenido de forma teórica y el comportamiento real de los edificios [3]. Esto debido a que, el comportamiento real tras la construcción puede desviarse significativamente del comportamiento teórico y es conocido como brecha de desempeño energético [4-6].

Existen varias investigaciones realizadas para analizar la brecha del desempeño energético en edificaciones. Un caso es el Hans *et. al.* [7] en Bélgica, quienes evaluaron 20 estudios de casos en los que encontraron que uso real de energía fue significativamente menor que el uso de energía teórico. Por otro lado, en el estudio de Branco *et. al.* [8] se obtuvieron diferencias relevantes entre el rendimiento energético teórico y el medido de un edificio diseñado para consumir una cantidad mínima de energía térmica mediante la combinación de varios sistemas de energía renovable con una envolvente optimizada y equipos eléctricos. Hens *et. al.* [9] concluyen que las incertidumbres que se observan en los cálculos teóricos se deben a la simplificación de fenómenos físicos complejos que intervienen en los flujos de energía. Mientras que, en otras investigaciones se resalta que una temperatura interior constante y pérdidas de ventilación simplificadas son supuestos clave que influyen significativamente en la brecha de rendimiento energético [10-12]. El rendimiento energético se puede evaluar mediante el HLC, que ha sido reportado como un parámetro que permite [conocer el rendimiento de la envolvente del edificio](#). Sin embargo, la obtención de este parámetro de forma teórica o

mediante simulaciones podría ser una representación bastante limitada de un caso de estudio real [13,14]. Por lo cual, es importante realizar el estudio energético para la obtención de HLC a través de mediciones *in situ* que incluyan todos los parámetros necesarios para una caracterización energética adecuada.

Por lo que, en este estudio se analiza el comportamiento energético real de un recinto mediante la aplicación de circuitos térmicos, a través de modelos de redes de Resistencia-Condensador (RC). Para ello, se considera un recinto bajo condiciones de clima cálido y soleado considerando parámetros para representar los sistemas de climatización y suelo radiante. Para lo cual, se estudiarán aspectos de la caracterización energética de envoltentes de edificaciones en condiciones reales de uso, utilizando la herramienta LORD. Esta herramienta es un software diseñado para el modelado y cálculo de sistemas térmicos, utilizando redes RC y técnicas de identificación de sistemas para obtener un modelo de parámetros concentrados que caractericen el comportamiento energético de un edificio NZEB.

2. CASO DE ESTUDIO

Los datos utilizados para este trabajo se obtuvieron en una campaña de experimentos *in situ* llevada a cabo en un edificio de oficinas denominado C-Ddi PSA, ubicado en la Plataforma Solar de Almería (PSA) del CIEMAT, en Tabernas (37,1°N, 2,4°W), Almería, España. Es un prototipo construido en planta longitudinal de una sola planta. Tiene una superficie neta de 1007,40 m² y se construyó en el marco del proyecto PSE-ARFRISOL en 2007 [15]. Este edificio incorpora estrategias pasivas para ahorrar energía (chimeneas solares), y sistemas solares para calefacción y refrigeración de espacios, tales como sistemas de climatización y suelo radiante.

Para este estudio se caracteriza energéticamente una oficina denominada "Despacho 1", la cual está orientada al sur en el extremo del ala oeste del edificio y tiene superficie construida de 17,37 m². Las mediciones consideradas fueron de 8 meses en un periodo de un año, considerando un periodo de 4 meses de invierno: diciembre de 2013 a marzo de 2014, y un periodo representativo de verano de junio 2013-septiembre 2013.

3. CALCULO DEL HLC

El análisis de los modelos para obtener el coeficiente de pérdida de calor (HLC) se basó en el balance de energía aplicado al volumen de aire confinado por la envoltente del edificio. En este balance de energía, se identificaron y modelaron las principales contribuciones de la transferencia de calor.

Los términos que se identificaron como relevantes con respecto a la ecuación de balance energético fueron:

- Pérdidas de calor a través de la envoltente,

- Ganancias solares,
- Calor suministrado por el sistema de calefacción,
- Ganancias internas debido a los electrodomésticos,
- Calor eliminado por el sistema de ventilación mecánica,
- Calor suministrado por suelo radiante.

A partir de estas aportaciones, se construyeron varios modelos candidatos, Ecuación (1)-(9). La validez de los resultados obtenidos con estos diferentes modelos se evaluó teniendo en cuenta la concordancia entre diferentes series de datos y también los niveles de los residuos obtenidos utilizando diferentes modelos. Los criterios considerados para construir los diferentes modelos candidatos y para seleccionar el resultado final fueron con base a la precisión, la rentabilidad y la simplicidad de los modelos.

$$\text{Modelo 0: } C \frac{dT_i}{dt} = -HLC\Delta T_{ie} + gAG_i + P_{aux} \quad (1)$$

$$\text{Modelo 1: } C \frac{dT_i}{dt} = -HLC\Delta T_{ie} + gAG_i + P_{aux} + a_1\dot{m}_c(\Delta T_{cio}) + a_2\dot{m}_f(\Delta T_{fio}) \quad (2)$$

$$\text{Modelo 2: } C \frac{dT_i}{dt} = -HLC\Delta T_{ie} + gAG_i + P_{aux} + a_1\dot{m}_c(\Delta T_{cio}) \quad (3)$$

$$\text{Modelo 3: } C \frac{dT_i}{dt} = -HLC\Delta T_{ie} + gAG_i + P_{aux} + a_1(T_{ci} - T_i) + a_2(T_{fs} - T_i) \quad (4)$$

$$\text{Modelo 4: } C \frac{dT_i}{dt} = -HLC\Delta T_{ie} + gAG_i + P_{aux} + a_1N_c(\Delta T_{cio}) \quad (5)$$

$$\text{Modelo 5: } C \frac{dT_i}{dt} = -HLC\Delta T_{ie} + gAG_i + P_{aux} + a_1N_c(\Delta T_{cio}) + a_2N_f(\Delta T_{fio}) \quad (6)$$

$$\text{Modelo 6: } C \frac{dT_i}{dt} = -HLC\Delta T_{ie} + gAG_i + P_{aux} + a_1(T_{ci} - T_i) + a_2(T_{fi} - T_i) \quad (7)$$

$$\text{Modelo 7: } C \frac{dT_i}{dt} = -HLC\Delta T_{ie} + gAG_i + P_{aux} + a_1(\Delta T_{cio}) + a_2(\Delta T_{fio}) \quad (8)$$

$$\text{Modelo 8: } C \frac{dT_i}{dt} = -HLC\Delta T_{ie} + gAG_i + P_{aux} + a_1(T_{ci} - T_i) \quad (9)$$

Para obtener el HLC se utilizaron modelos RC y se utilizó la herramienta LORD [16]. En la Figura 1 se presenta como ejemplo, la representación RC del Modelo 6. Las variables consideradas en estos modelos incluyeron:

- La temperatura del aire exterior (Te), vinculada al nodo 1.
- La temperatura del aire interior (Ti), vinculada al nodo 5.
- Las ganancias debidas a la radiación solar vertical incidente en la ventana, está vinculado al nodo 8 como un flux.
- El consumo eléctrico está vinculado al nodo 9 y se presenta como un flux, en este punto es importante aclarar que la conductancia se fija en un valor muy alto, esto debido a que la herramienta LORD no permite más de un flux por nodo, de esta manera el nodo 9 es vinculado directamente con el nodo 8.

En el caso del Modelo 0 es un modelo de referencia en donde no se considera las ganancias y pérdidas de calor, a través de los sistemas de climatización y suelo radiante. En la Tabla 1 se muestran las diferentes consideraciones de diferentes variables impulsoras para representar estos sistemas.

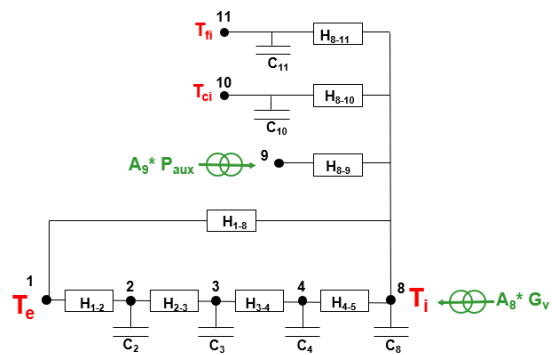


Figura 1. Configuración RC del Modelo 6.

Tabla 1. Descripción de las variables de entrada en los modelos.

Nombre del Modelo	Variables de entrada consideradas
0	$T_{int}, T_{ext}, G_v, P_{aux}$ Total
1	$T_{int}, T_{ext}, G_v, P_{aux}$ Total, $m_c, m_f, \Delta T_{cio}, \Delta T_{fio}$
2	$T_{int}, T_{ext}, G_v, P_{aux}$ Total, $m_c, \Delta T_{cio}$
3	$T_{int}, T_{ext}, G_v, P_{aux}$ Total, T_{ci}, T_{fs}
4	$T_{int}, T_{ext}, G_v, P_{aux}$ Total, $N_c, \Delta T_{cio}$
5	$T_{int}, T_{ext}, G_v, P_{aux}$ Total, $N_c, N_f, \Delta T_{cio}, \Delta T_{fio}$
6	$T_{int}, T_{ext}, G_v, P_{aux}$ Total, T_{ci}, T_{fi}
7	$T_{int}, T_{ext}, G_v, P_{aux}$ Total, T_{ci}, T_{fi}
8	$T_{int}, T_{ext}, G_v, P_{aux}$ Total, T_{ci}

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 y 3 se presentan los resultados obtenidos con respecto al HLC y los residuales, respectivamente. Se puede observar que al evaluar los modelos el HLC promedio que considera todos los periodos está en el rango de 40- 70 W/K, para este caso el modelo 6, es el modelo con la menor desviación estándar entre los resultados obtenidos y con los menores residuales.

Por otro lado, si analizamos los resultados del periodo de invierno el promedio del HLC se encuentra entre los 60-70 W/K y la desviación estándar es menor para todos los modelos, siendo menor para el Modelo 1, 3, 4, 6 y los menores residuales se obtuvieron con los Modelos 3,6 y 7. Para el caso del análisis de los periodos de verano, el Modelo 3,6 y 7 son los modelos con menor desviación estándar y menor residuales.

En la Figura 2 se puede observar claramente que la desviación estándar entre las series en invierno es significativamente menos que en verano. La falta de exactitud de los resultados de verano

se le atribuye, principalmente a que, la diferencia de temperatura en verano fue menor que en invierno. Además, a que, en invierno, a causa a las temperaturas frías se considera que el edificio pierde calor durante todo el tiempo, mientras que en verano existe ganancia y perdidas de calor **dependiendo** del día y la hora.

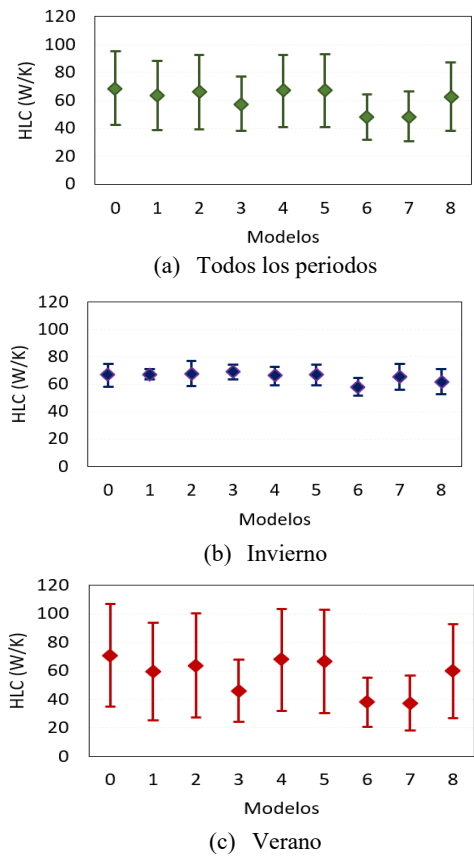


Figura 2. Resultados de HLC obtenidos.

Al analizar los resultados se puede observar que los Modelos 3 y 6 son los que tienen una menor desviación estándar y menores residuales en los diferentes análisis. Se puede observar que este modelo y configuración es casi la misma, con la diferencia que la variable representativa del sistema de suelo radiante está representada por T_{fs} para el Modelo 3 y T_{fi} para el Modelo 6. La diferencia de estos es que T_{fs} representa la temperatura de la superficie del suelo, y la T_{fi} es la temperatura de impulsión del sistema del suelo radiante. Considerando que el sensor T_{fs} al encontrarse instalado en la superficie del suelo, es un sensor vulnerable, el modelo 6 donde la temperatura del suelo radiante está representada por T_{fi} , es el modelo y la configuración con el cual obtenemos un mejor cálculo de HLC, con un valor de 58.2 W/K obtenido en invierno, el cual con cuerda con el valor teórico calculado para invierno de 58 W/K.

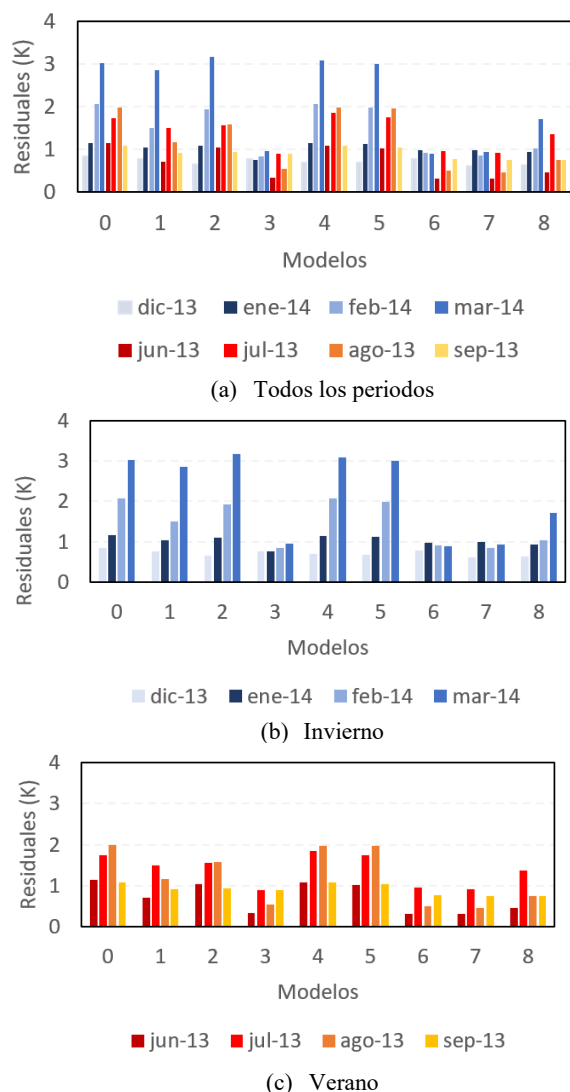


Figura 3. Resultados de los residuales obtenidos.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo concluye obteniendo estimaciones precisas del HLC a partir del balance energético, incluidas las siguientes contribuciones relevantes: calefacción de espacios, ganancias solares, consumo eléctrico, sistemas de suelo radiante y climatización.

Se pudo observar que el enfoque de modelado y la herramienta LORD, que han sido utilizados para el análisis de elementos de envolvente de edificios más simples (bajo condiciones de prueba controladas y optimizadas), fue efectivo para este estudio. Esto considerando que el recinto analizado fue notablemente más

complejo y bajo condiciones de prueba no controladas, es decir, condiciones reales. El aumento de complejidad resalta el papel de la aplicación de criterios físicos para construir modelos candidatos y también para validar los resultados obtenidos. La relevancia de los criterios físicos debe verse en un contexto amplio donde el edificio debe considerarse como un sistema térmico. Otros aspectos físicos importantes para considerar son las limitaciones de los dispositivos de medición que aportan información e incertidumbre a las series de tiempo que podrían llevar a variables inútiles incluso teniendo mediciones muy precisas, lo que puede suceder si estas series de datos son las variables impulsoras de un efecto que en la práctica no son relevante para el balance energético.

Aunque los resultados que se han obtenido de las diferentes series de datos son bastante consistentes. Este recinto debe investigarse más a fondo. La investigación adicional debe considerar incluir más términos relacionados con infiltraciones de viento y ocupación, además de incluir y verificar la precisión de los modelos considerando más series de datos y otros recintos.

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidad
G_v	Radiación solar vertical global	W/m^2
$\dot{m}_c$	Flujo de agua en la tubería de enfriamiento del sistema HVAC	kg/min
$\dot{m}_f$	Flujo de agua en la tubería de calefacción del sistema de suelo radiante	kg/min
N_c	Entero asociado al nivel de flujo de agua en la tubería del sistema HVAC	-
N_f	Entero asociado al nivel de flujo de agua en la tubería del sistema del suelo radiante	-
P_{aux}	Energía activa eléctrica consumida por todos los dispositivos y sistemas del recinto	W
T_e	Temperatura del aire exterior	$^{\circ}C$
T_i	Temperatura del aire interior	$^{\circ}C$
T_{fs}	Temperatura de superficie del suelo	$^{\circ}C$
T_{ci}	Temperatura de impulsión del sistema de climatización en el techo	$^{\circ}C$
T_{co}	Temperatura de retorno del sistema de climatización en el techo	$^{\circ}C$
T_{fi}	Temperatura de impulsión del sistema del suelo radiante	$^{\circ}C$
T_{fo}	Temperatura de retorno del sistema del suelo radiante	$^{\circ}C$
ΔT_{cio}	Diferencia de temperatura entre la temperatura de impulsión y retorno de agua en la tubería del sistema HVAC	$^{\circ}C$
ΔT_{fio}	Diferencia de temperatura entre la temperatura de impulsión y retorno de agua en la tubería del suelo radiante	$^{\circ}C$

REFERENCIAS

- [1] Habitat para la humanidad México. Realizan Hábitat para la Humanidad México y CONAVI una jornada de construcción(2015).URL:<http://www.habitatmexico.org/articulo/dc-realizan-habitat-para-humanidad-mexico-conavi-8>
- [2] Jiménez, M.J. IEA, EBC Annex 58, Report of Subtask 3, Part 1, Thermal Performance Characterization Based on Full Scale Testing-Description of the Common Exercises

- and Physical Guidelines; Jiménez, M.J., Ed.; KU Leuven: Leuven, Belgium, 2016; ISBN 9789460189876.
- [3] Carbon Trust. Closing the gap: Lessons learned on realising the potential of low carbon building design. Carbon trust (2011) 1-24.
- [4] D. Johnston, D. Farmer. M. Brooke-Peat, D. Miles-Shenton. Bridging the domestic building fabric performance gap. Building Research & Information, 44 (2014) 147-159.
- [5] National House Building Council (NHBC) Foundation. Carbon compliance for tomorrow's new homes: A review of the modelling tool and assumptions (2010).
- [6] Carbon Trust. Closing the gap: Lessons learned on realizing the potential of low carbon building design. Carbon trust (2011) 1-24.
- [7] Hens, H.; Parijs, W.; Deurinck, M. Energy Consumption for Heating and Rebound Effects. Energy Build. 2010, 42, 105–110. Energies 2020, 13, 2469 26 of 28
- [8] Branco, G.; Lachal, B.; Gallinelli, P.; Weber, W. Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data. Energy Build. 2004, 36, 543–555.
- [9] Hens, H.L.S.C. Combined heat, air, moisture modelling: A look back, how, of help? Building Environmental. 2015, 91,138–151.
- [10] Delghust, M. Improving the Predictive Power of Simplified Residential Space Heating Demand Models: A Field Data and Model Driven Study; Ghent University: Gent, Belgium, 2016.
- [11] Khoury, J.; Alameddine, Z.; Hollmuller, P. Understanding and Bridging the Energy Performance Gap in Building Retrofit. Energy Procedia 2017, 122, 217–222.
- [12] Ali, Q.; Thaheem, M.J.; Ullah, F.; Sepasgozar, S.M.E. The Performance Gap in Energy-Efficient Office Buildings: How the Occupants Can Help? Energies 2020, 13, 1480.
- [13] Gupta, R.; Kapsali, M. Evaluating the “as-Built” Performance of an Eco-Housing Development in the UK. Build. Serv. Eng. Res. Technol. 2016, 37, 220–242.
- [14] Bell, M.; Wingfi, J.; Miles-Shenton, D.; Seavers, J. Low Carbon Housing Lessons from Elm Tree Mews; Joseph Rowntree Foundation: York, UK, 2010; pp. 1–118. ISBN 978-1-85935-766-8
- [15] R. Olmedo, M.N. Sánchez, R. Enríquez, M.J. Jiménez, M.R. Heras. 2016. “ARFRISOL Buildings-UIE3-CIEMAT”. Chapter of "IEA, EBC Annex 58, Report of Subtask 1a. Inventory of full-scale test facilities for evaluation of building energy performances". (Editor: A. Janssens). ISBN: 9789460189906, Published by KU Leuven, Belgium.
- [16] Gutschker, O. LORD–Modelling and Identification Software for Thermal Systems, User Manual; BTU Cottbus: Cottbus, Germany, 2004.

Sistema de rehabilitación para miembros superiores con cables flexibles

Milton U. Vargas-Ortiz *, Andrés Blanco-Ortega*, Jorge Colín-Ocampo*, Wilberth M. Alcocer-Rosado*,
Manuel de Jesús Palacios-Gallegos **, Víctor Fernando Ramos Fon Bon **

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490
(Tel: 777-362-7770; e-mail: andres.bo@cenidet.tecnm.mx) (Tel: 734-147-7238; e-mail: m20ce083@cenidet.tecnm.mx).

**Universidad Politécnica de Chiapas, Carretera Tuxtla Gutiérrez. Suchiapa, Chiapas. México. CP.29150

Resumen: Actualmente existe un gran incremento relacionado a las lesiones en extremidades superiores, debido a accidentes cerebrovasculares, incidentes o accidentes traumáticos, enfermedades neuromusculares, aumentando día a día. Además, en la actualidad la cantidad de fisioterapeutas son insuficientes para proporcionar rehabilitaciones a estos grandes grupos. La rehabilitación de manera manual o física pueda afectar diversos factores como son el tiempo de prolongación de la terapia o el cansancio del fisioterapeuta y esto disminuye la calidad y servicio, haciendo que se prolongue la rehabilitación del paciente y aumentado los costos de estas terapias, o, que el paciente no recupere su movilidad completamente.

En este artículo se presenta un sistema de rehabilitación pasiva para miembros superiores de 3 grados de libertad que utiliza guías lineales y un juego de poleas-cable el cual puede proporcionar diversos movimientos, tanto básicos como combinados, de las articulaciones del hombro y del codo. Se reportan resultados de simulación obtenidos con el prototipo virtual en el entorno de MSC Adams view y con el uso del módulo de Adams Machinery. Para esta simulación, solo se considera un grado de libertad, el movimiento del cable, el cual al estar conectado a la extremidad (mano) del paciente, y al ir subiendo de manera suave, ofrece movimientos suaves de flexión, tanto en el hombro como en el codo.

Keywords: Upper limb rehabilitation robot, cable-based rehabilitation robot, wire-driven mechanism.

1. INTRODUCCIÓN

El Accidente Cerebrovascular (ACV), es causado típicamente por una hemorragia o bloqueo en los vasos sanguíneos del cerebro, que daña las células cerebrales y puede ser fatal. El número de personas discapacitadas debido a un ACV aumenta día a día, se prevé que seguirá aumentando a un ritmo alarmante en Estados Unidos y varios países del mundo [1] [2]. Posterior al accidente cerebrovascular, los movimientos se ven afectados por el peso de la gravedad de la extremidad superior debido a la debilidad de esos músculos antigravedad [3]. Además, la cantidad actual de profesionales de la salud en fisioterapia es inadecuada para proporcionar rehabilitación a estos grandes grupos. Desde principios de la década de los 90 y hasta la actualidad, los investigadores han propuesto y desarrollado diversos dispositivos de asistencia y rehabilitación para abordar esta problemática.

La rehabilitación en pacientes en la parte del hombro requiere un ejercicio de entrenamiento repetido y progresivo, y para mejorar la efectividad de la rehabilitación, es necesario usar sistemas robóticos. Entre los sistemas de asistencia y rehabilitación se encuentran los exoesqueletos motorizados de múltiples grados de libertad (GDL), para ayudar al movimiento de las extremidades superiores humanas. Para que un exoesqueleto interactúe de forma segura con una extremidad

humana, es importante medir y controlar la fuerza de interacción [4].

En los últimos años se ha presentado un aumento en la investigación para el análisis y diseño de dispositivos, máquinas o sistemas robóticos para rehabilitación, para varias partes del cuerpo humano. Algunos se especializan en miembros superiores, como a continuación se presenta.

En las últimas dos décadas se han propuesto una gran cantidad de robots para rehabilitación de extremidades superiores, sin embargo, la mayoría están conformados por eslabones rígidos y, en su mayoría, de mecanismos complejos como los reportados en [1][2][5][6]. Entre estos sistemas robóticos se pueden encontrar: el robot ORTE [7], un exoesqueleto de 5 GDL diseñado como herramienta para el tratamiento de diferentes lesiones en el brazo humano; exoesqueleto para rehabilitación de hombro [4] con dos mecanismos esféricos, dos mecanismos de manivela deslizante y un mecanismo de equilibrio de gravedad, este exoesqueleto utiliza actuadores elásticos en serie; Rehab-Arm, otro exoesqueleto para rehabilitación de extremidades inferiores de 7 GDL para las articulaciones de hombro, codo y muñeca [8].

Por otro lado, son muy pocos los dispositivos de rehabilitación que utilizan cables flexibles, los cuales se mencionan a continuación.

K. Homma *et al.* [9] propuso un sistema de rehabilitación para extremidades inferiores de 6 GDL que emplea un mecanismo impulsado por cables, ver Fig. 1. Proporciona movimientos de rehabilitación a cadera, rodilla y tobillo. Huang *et al.* [10] desarrolló una estrategia de control con compensación de gravedad para un robot de rehabilitación de extremidades superiores, que es capaz de estimar el par de gravedad en tiempo real con la retroalimentación de posición. Realizó pruebas con siete sujetos sanos asignándoles tareas de movimiento en cuatro direcciones diferentes (arriba, abajo, izquierda y derecha), en un espacio vectorial 3D realizando un seguimiento de los movimientos de interacción de hombre – máquina, ver Fig. 2.

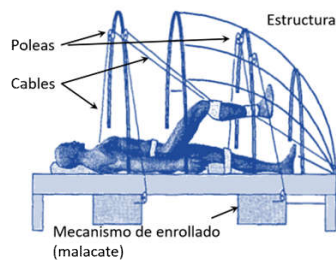


Fig. 1 Sistema de rehabilitación de extremidades inferiores [9].

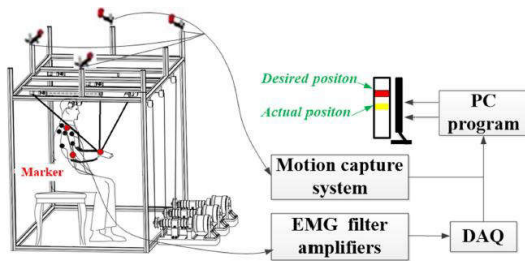


Fig. 2 Robot de rehabilitación de extremidades superiores [10].

Niu *et al.* [11] propusieron un robot de rehabilitación accionado por cables que trabaja en un espacio tridimensional para la rehabilitación de miembros superiores, implementaron un control por modos deslizantes con un observador no lineal de perturbaciones, diseñado para que el robot resuelva el problema de las perturbaciones impredecibles durante el entrenamiento asistido por robot, ver Fig. 3.

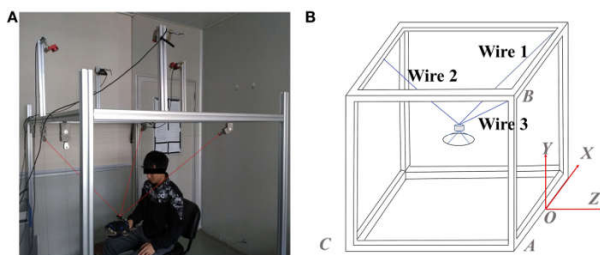


Fig. 3 Robot de rehabilitación accionado por cables [11].

Beer *et al.* [12] proponen una máquina de rehabilitación de brazos con un sistema cartesiano de varios ejes (MACARM), ver Fig. 4. Esta máquina cuenta con un espacio de trabajo grande y fue evaluado con una carga de 4.5 kg, que representa el peso del brazo del paciente a rehabilitar. Es de 6 GDL y cuenta con 8 motores.

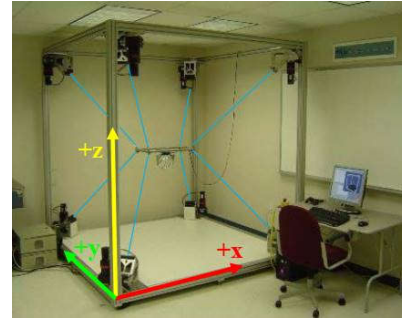


Fig. 4 Robot de rehabilitación accionado por cables [12].

Magadán *et al.* [13] presentan el diseño de un rehabilitador de hombro, basado en un sistema de mesa XY, el cual permite ofrecer movimientos pasivos continuos. Implementa un control tipo PID con seguimiento de trayectorias suaves de Bézier. Este sistema ofrece movimientos combinados en ambos ejes, X y Y, los cuales, dependiendo de la posición del paciente ante el rehabilitador, ofrecen una gama amplia de movimientos personalizados, suaves y controlados. Son los mismos movimientos que ofrece una rueda convencional para rehabilitación del hombro, con la ventaja de permitir la rehabilitación pasiva desde un inicio, ver Fig. 5.

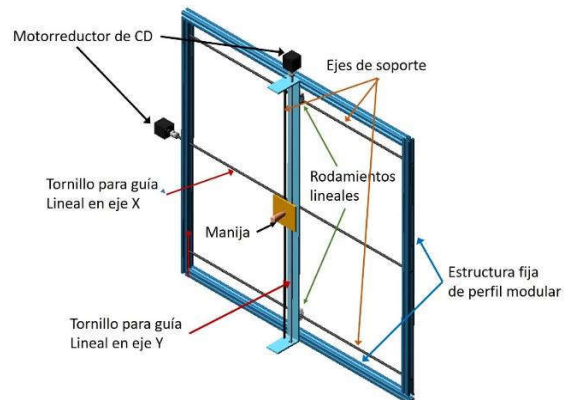


Fig. 5 Prototipo virtual de rehabilitador de hombro [13].

De la revisión del estado del arte, se puede encontrar que se han propuesto diversos prototipos para la rehabilitación de extremidades superiores, en su mayoría proporcionan movimientos limitados y cuentan con estructuras rígidas para los movimientos de la extremidad, limitando los movimientos naturales de la extremidad. Son muy pocos los dispositivos

actuados con cables que se han reportado a la fecha. El uso de mecanismos actuados por cables, presenta ventajas como: 1) se puede lograr una mayor cantidad de movimientos, 2) requiere actuadores de potencia relativamente baja en comparación con los mecanismos que usan eslabones rígidos (son más ligeros y flexibles), son de baja inercia y 3) resultan ser dispositivos más económicos [9] [14].

En este trabajo se presenta el diseño de un robot para rehabilitación pasiva de miembros superiores con cables flexibles de 3 GDL. El dispositivo proporciona los movimientos necesarios para realizar una rehabilitación de la extremidad superior, los cuales son, hombro: flexión, extensión, abducción, aducción, rotación interna, rotación externa y circunducción; codo: flexión y extensión.

2. SISTEMA DE REHABILITACIÓN

2.1 Biomecánica de la extremidad superior

En la Tabla I y Tabla II se muestran los valores máximos para los diversos movimientos del hombro [13] y codo [15]. En la Fig. 6 se muestra una representación de los movimientos del hombro y en la Fig. 7 del codo.

Tabla I. Valores máximos de la articulación del hombro.

Tipo de movimiento	Valor máximo
Flexión	180°
Extensión	50°
Aducción	48°
Abducción	134°
Rotación Interna	34°
Rotación Externa	142°
Circunducción	360°

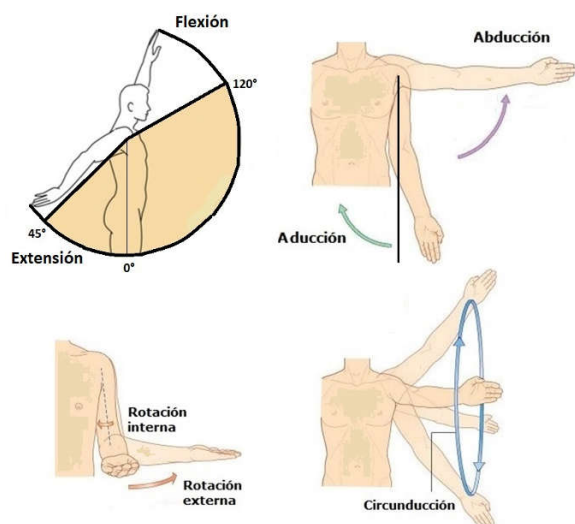


Fig. 6 Movimientos del hombro.

Tabla II. Valores máximos de la articulación del codo.

Tipo de movimiento	Valor máximo
Flexión	140-150°
Extensión	2-10°
Supinación	90°
Pronación	80-85°

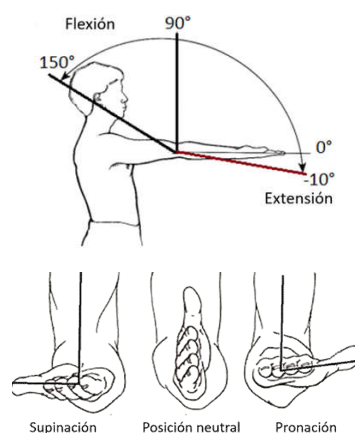


Fig. 7 Movimientos del codo.

2.1 Descripción del sistema

El rehabilitador que se propone, está basado en la configuración de un sistema cartesiano o una grúa tipo puente, ver Fig. 8 y Fig. 9. Por lo que las entradas para los movimientos se realizan mediante 2 guías lineales, y se utiliza un sistema de poleas-cables para el movimiento vertical (eje Z). El uso de tornillos, para transmitir los movimientos en los ejes X y Y, ayuda a que las fuerzas sean de magnitud pequeña y que los movimientos sean suaves, dando mayor flexibilidad al usuario, comparado a la rigidez de los sistemas robóticos de rehabilitación. Además, el uso de un servomotor con reductor, así como un tren de engranes para el control del movimiento del cable, no se requiere de un sistema de control con compensación de gravedad, es decir, el sistema, sin tener los actuadores alimentados y con la carga de la extremidad superior del paciente, permanece estático, considerando que el peso de la extremidad superior del paciente es menor a 6 kg. Otra ventaja de este prototipo, respecto a los reportados, es que no requiere del uso de muchas poleas y cables, además solo se utilizan 3 actuadores.

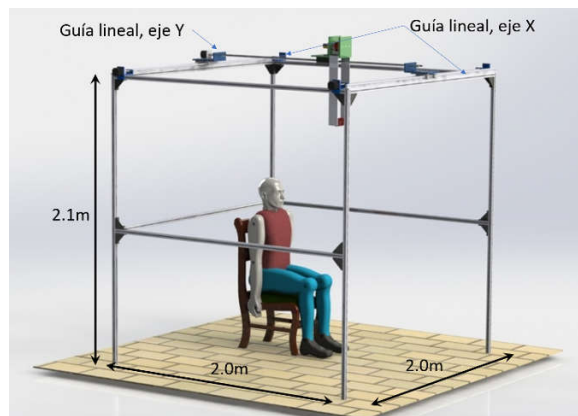


Fig. 8 Rehabilitador de miembros superiores con 2 guías lineales y sistema de poleas con cables flexibles.

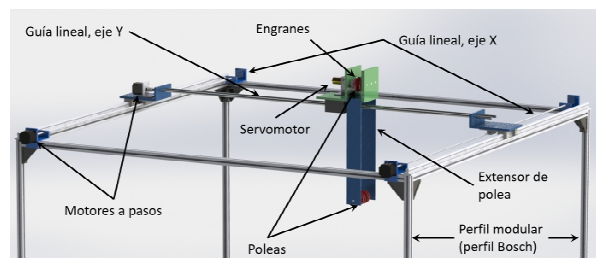


Fig. 9 Descripción de componentes del sistema de rehabilitación.

2.2 Movimiento de flexión brazo-antebrazo

En este análisis, se realizará el movimiento solo del cable, iniciará sujetando la extremidad del paciente, en la posición neutral del brazo, y subirá para terminar en otra posición con flexión de hombro y codo, ver Fig. 10 y Fig. 11, respectivamente.

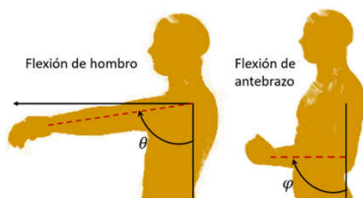


Fig. 10 Flexión de hombro y codo.

Para determinar los ángulos de desplazamiento del hombro y antebrazo, conforme va subiendo el cable, se utiliza la ecuación de cierre de circuito mostrado en la Fig. 11. Considerando en este caso, que la polea no se mueve en las direcciones X y Y.

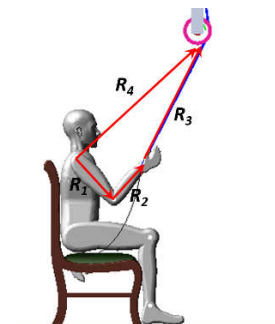


Fig. 11 Ecuación de cierre de circuito para movimiento de Flexión en hombro y codo.

Tomando en cuenta la Fig. 11, se utiliza la siguiente ecuación de lazo vectorial del mecanismo de cuatro barras, dada por:

$$R_1 + R_2 + R_3 = R_4 \quad (1)$$

En forma compleja:

$$r_1 e^{i\theta_1} + r_2 e^{i\theta_2} + r_3 e^{i\theta_3} = r_4 e^{i\theta_4} \quad (2)$$

Con los datos conocidos de ángulos y magnitud de eslabones, queda por determinar θ_1 y θ_2 , correspondientes a los ángulos del brazo (θ) y del antebrazo (ϕ) de la Fig. 10. Resultando en una expresión matemática con varios términos de senos y coseno.

2.2 Prototipo virtual en el entorno de MSC Adams

En la Fig. 12 se muestra el prototipo virtual bajo el entorno del programa de MSC Adams view. Se muestra el cable con las poleas articulada a la mano del paciente. Se utilizó el módulo de Adams Machinery para insertar el mecanismo de cable-poleas, como se muestra en la Fig. 13. Es importante mencionar que, dependiendo del tipo de movimiento, se utilizarán algunos extensores de polea para dar una mayor rigidez y estabilidad en los movimientos de la extremidad del usuario, ver Fig. 9 y Fig. 12. Para las simulaciones, al considerar una densidad de 950 kg/m³ en el prototipo virtual del humano, mostrado en la Fig. 12, se obtuvieron los parámetros que se muestran en la Tabla III. El trabajo de Drillis y Cotini [16] 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. En ese sentido, en este trabajo se utilizan parámetros de simulación acordes al trabajo de Drillis y Cotini, como se reporta en [17].

Tabla III. Parámetros de simulación.

Segmento	Brazo	Antebrazo	Mano
Masa [kg]	2.54	1.47	0.78
Centro de masa respecto al hombro [cm]	11	40	60
Momento de inercia I [kg m ²]	0.0272	0.011	0.0018

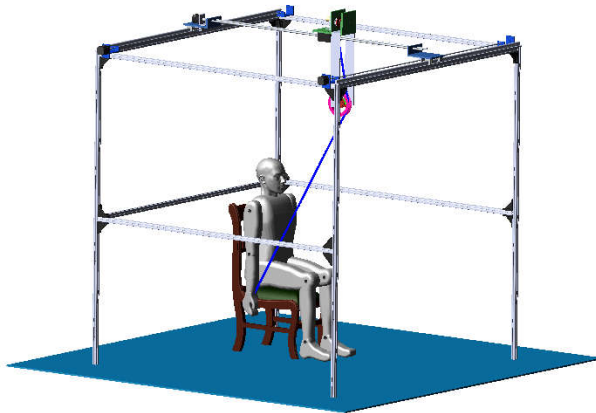


Fig. 12 Prototipo virtual del sistema de rehabilitación en el entorno de MSC Adams view.

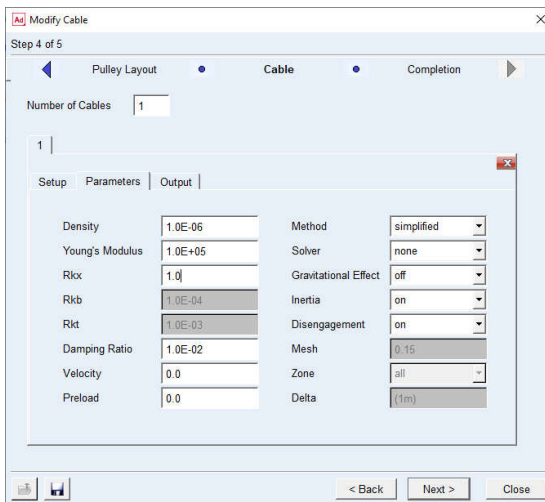


Fig. 13 Ventana para definir el mecanismo de cable-poleas.

Se adoptó un polinomio de Bézier interpolado suavemente entre la posición inicial y la posición final del cable, para el levantamiento de la carga (brazo del usuario). La trayectoria de posición deseada viene dada:

$$z^*(t) = \begin{cases} z_0 & t \leq t_0 \\ z_0 - (z_f - z_0)\sigma & t_0 < t < t_f \\ z_f & t > t_f \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma(t, t_0, t_f) = \Delta^2 (3 - 2\Delta), \quad \Delta = \frac{t - t_0}{t_f - t_0}$$

Donde z_0 y z_f son las posiciones iniciales y finales deseadas, de modo que la cuerda flexible comience desde una posición inicial y vaya a una posición final con un cambio suave. Para este caso se consideró que:

$$(z_0, z_f) = (0, 0.6\text{m}), \quad (t_0, t_f) = (0, 5\text{s}).$$

3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

A continuación, se presentan los resultados de simulación para el rehabilitador de extremidades superiores con cables flexibles en el entorno de MSC Adams view. Para esta simulación que se reporta, solo se le da movimiento al servomotor que impulsará los engranes que están acoplados a las poleas. La Fig. 14 muestra la trayectoria suave de Bézier que se utilizó para elevar la cuerda desde la posición de inicio ($z_0=0\text{m}$) hasta una altura final ($z_f=0.60\text{m}$). Es importante mencionar que, por el uso de un servomotor con reductor, es capaz de soportar la extremidad superior del paciente, por lo que las simulaciones se realizan despreciando la gravedad.

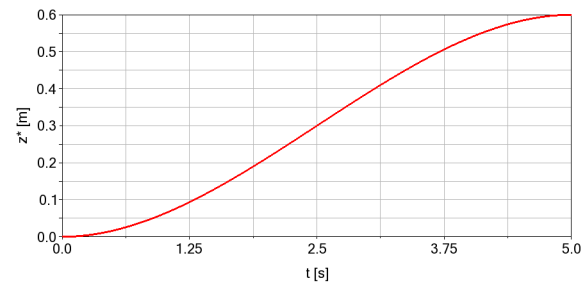


Fig. 14 Trayectoria de desplazamiento para el eje Z (cable).

Para la trayectoria de Bézier que sigue el cable, se tiene la respuesta para el ángulo del hombro, Fig. 15, y del codo, Fig. 16. Una secuencia de 5 diferentes posiciones del movimiento, se muestra con el prototipo virtual en la Fig. 17. Se puede observar que la respuesta de flexión para ambas articulaciones es suave.

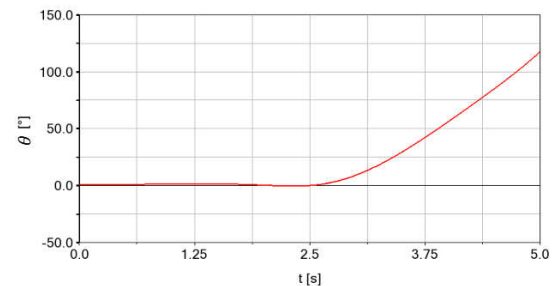


Fig. 15 Respuesta del movimiento de flexión del hombro.

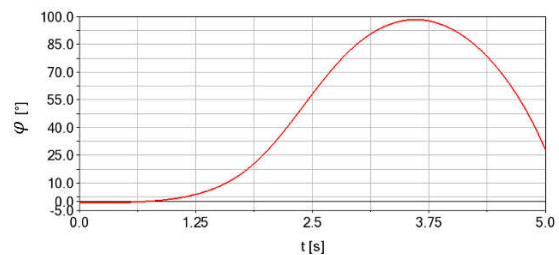


Fig. 16 Respuesta del movimiento de flexión del codo.

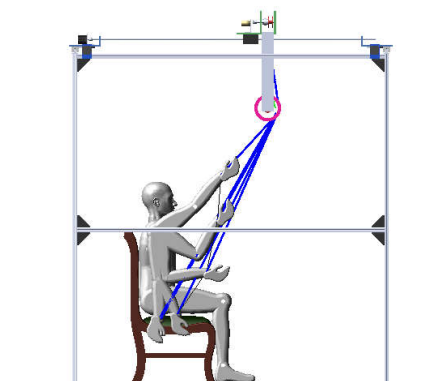


Fig. 17 Diferentes posiciones de flexión de hombro y codo al subir el cable siguiendo la trayectoria de Bézier.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el diseño de una máquina para rehabilitación de extremidades superiores de 3 GDL. Por el tipo de sistema de poleas-extensores y el uso de guías lineales, ésta puede proporcionar los movimientos del hombro de flexión-extensión, abducción-aducción y rotación interna-externa; así como movimientos del codo de flexión-extensión. Se realiza una simulación en MSC Adams view, utilizando el prototipo virtual con componentes de maquinaria como son los cables-poleas, del módulo de Adams Machinery, para realizar una simulación más apegada a la realidad antes de construir el prototipo físico.

Debido al uso de guías lineales, es posible implementar el control numérico para proporcionar movimientos básicos, así como movimientos combinados, tanto de la articulación del hombro como del codo. En trabajos futuros se abordará la rigidez, tanto de los músculos como la rigidez provocada por las lesiones que se presentan en las articulaciones por falta de movilidad. Se construirá el prototipo y se implementará el control numérico (CN) para que el rehabilitador ofrezca más movimientos de rehabilitación en la extremidad superior.

REFERENCIAS

- [1] Rehmat, N., Zuo, J., Meng, W. *et al.* Upper limb rehabilitation using robotic exoskeleton systems: a systematic review. *Int J Intell Robot Appl* 2, pp. 283–295. 2018. <https://doi.org/10.1007/s41315-018-0064-8>.
- [2] H. Shing Lo, S. Quan Xie, Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: State of the art and future prospects, *Medical Engineering & Physics*, Vol. 34, No. 3, 2012, pp. 261-268, ISSN 1350-4533, <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2011.10.004>.
- [3] T. Gallego. Bases Teóricas y Fundamentos de la Fisioterapia, Madrid España, Médica Panamericana S. A, 2007.
- [4] H. Hsieh, D. Chen, L. Chien and C. Lan, Design of a Parallel Actuated Exoskeleton for Adaptive and Safe Robotic Shoulder Rehabilitation, in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 5, pp. 2034-2045, Oct. 2017, doi: 10.1109/TMECH.2017.2717874.

- [5] R. A. R. C. Gopura, K. Kiguchi and D. S. V. Bandara, A brief review on upper extremity robotic exoskeleton systems, *2011 6th International Conference on Industrial and Information Systems*, Kandy, Sri Lanka, 2011, pp. 346-351, doi: 10.1109/ICIINFS.2011.6038092.
- [6] A. S. Niyetkaliyev, S. Hussain, M. H. Ghayesh and G. Alici, Review on Design and Control Aspects of Robotic Shoulder Rehabilitation Orthoses, in *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 47, no. 6, pp. 1134-1145, Dec. 2017, doi: 10.1109/THMS.2017.2700634.
- [7] M. A. Destarac, C. E. Garcia Cena, J. Garcia, R. Espinoza and R. J. Saltaren, ORTE: Robot for Upper Limb Rehabilitation. Biomechanical Analysis of Human Movements., in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 6, pp. 1638-1643, June 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8444160.
- [8] Liu L, Shi YY, Xie L (2016) A novel multi-dof exoskeleton robot for upper limb rehabilitation. *J Mech Med Biol* 16 (08) 2016. 1640023.
- [9] K. Homma, O. Fukuda, J. Sugawara, Y. Nagata and M. Usuba, A wire-driven leg rehabilitation system: development of a 4-DOF experimental system, *Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003)*, Kobe, Japan, 2003, pp. 908-913 vol.2, doi: 10.1109/AIM.2003.1225463.
- [10] Y. Huang, Q. Yang, Y. Chen & R. Song, Assessment of Motor Control during Three-Dimensional Movements Tracking with Position-Varying Gravity Compensation. *Frontiers in neuroscience*, 11, 2017. 253. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00253>.
- [11] J. Niu, Q. Yang, X. Wang and R. Song. Sliding Mode Tracking Control of a Wire-Driven Upper-Limb Rehabilitation Robot with Nonlinear Disturbance Observer. *Front Neurol*. 2017 Dec 4; 8:646. doi: 10.3389/fneur.2017.00646. Erratum in: *Front Neurol*. 2018 Jun 28; 9:511.
- [12] R. Beer, D. Mayhew, C. Bredfeldt and B. Bachrach, Technical evaluation of the MACARM: A cable robot for upper limb neurorhabilitation, 2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, Scottsdale, AZ, USA, 2008, pp. 942-947, doi: 10.1109/BIOROB.2008.4762880.
- [13] A. Magadán, A. Blanco, José A. Santana, F. A. Gómez, E. Antunez, Diseño y control de un rehabilitador de hombre. *Pistas Educativas*, No. 130, noviembre 2018, México. Pp. 1764-1778. ISSN: 2448-847X.
- [14] G. Turchetti, N. Vitiello, L. Trieste, S. Romiti, E. Geisler and S. Micera, Why Effectiveness of Robot-Mediated Neurorehabilitation Does Not Necessarily Influence Its Adoption, in *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 7, pp. 143-153, 2014, doi: 10.1109/RBME.2014.2300234.
- [15] M. T. Angulo, A. Álvarez, Y. Fuentes. Biomecánica de la Extremidad Superior. Exploración del Codo, *Biomecánica clínica*, Vol. 3, Núm. 4. Pp. 82-103. 2011. ISSN: 1989-5305.
- [16] Contini, R., Drillis, R. and Bluestein, M. Determination of Body Segment Parameters, *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 5(5), pp. 493–504. 1963. doi: 10.1177/001872086300500508.
- [17] A. J. Martínez-Mata, A. Blanco-Ortega, C. H. Guzmán-Valdivia, C. Cortes-García, J. A. Arellano-Cabrera. Aspectos básicos para el diseño mecánico de un exoesqueleto de extremidades inferiores para aumento de fuerza. *Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada*. Vol. 3, Núm. 1, Enero - Junio 2020.

Analysis of LTA zeolite using EIS

Fabian N. Murrieta-Rico^{a*} Vitalii Petranovskii^{b*}
Joel Antúnez-García^{c*} Donald H. Galván^{d*}
Rosario I. Yocupicio-Gaxiola^{e**} Lars Lindner^{f***}

^{*} Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Nanociencias
y Nanotecnología, Ensenada, Baja California, México (e-mail:

^afmurrieta@cnyn.unam.mx, ^bvitalii@cnyn.unam.mx,

^cjoel.antunez@gmail.com, ^ddonald@cnyn.unam.mx).

^{**} Centro de Investigación Científica y Educación Superior de
Ensenada, Posgrado en Nanociencias, Ensenada, Baja California,
México (e-mail: ^eryocu@cnyn.unam.mx).

^{***} Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería,
México (e-mail: ^flindner.lars@uabc.edu.mx).

Abstract: Zeolites are crystalline materials, which have a composition based on Al, Na and Si. These materials have pores that are interconnected by channels. The cavities of these materials show nanometric dimensions, which define if a given molecule can be diffused inside. Accordingly, zeolites are known as molecular sieves. In addition, zeolites are abundant in the nature and they can be synthesized at the laboratory. Due to these characteristics, there are plenty of applications for zeolites. Some of them include the construction industry, water softeners, development of sensors, etc. Electrochemical impedance spectroscopy is an analysis technique where the frequency response of a material is studied. In this work, we use the impedance spectroscopy to analyze LTA zeolite under crystallization time variations.

Keywords: LTA zeolite, impedance spectroscopy, frequency response

1. INTRODUCTION

Zeolites are crystalline and porous materials. They have a composition based on sodium, aluminum, and silicon. In the zeolites, pores are of nanometric dimension and are interconnected by channels; these characteristics grant to the zeolites a large surface area compared to their volume. Until now, Baerlocher and McCusker (2015) show are more than 242 different types of zeolites; each with a unique pore distribution. Some types of zeolites are depicted in Fig. 1.

Applications of zeolites include, among others, controlled release of fertilizers in agriculture, catalyst supports, or development of sensors, see Hermassi et al. (2020), Derakhshan-Nejad et al. (2020), Murrieta-Rico et al. (2019), and Murrieta-Rico et al. (2021). Properties of zeolites are defined by their chemical composition, this means that such properties can be adjusted if the chemical composition of zeolites is appropriately adjusted, i.e., by means of ionic exchange. In other words, the zeolites can be adjusted for specific applications.

Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) is a characterization technique where the frequency response of a sample is analyzed. According to Franke and Simon (1999), the electrical properties of dehydrated zeolite H-ZSM5 with different $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios were examined by EIS; the activation energy for proton relaxation was determined and it was found that such an energy depends on the spatial distance of the aluminum sites. In the report of Cai et al. (2016), EIS was used for analyzing the mi-

crostructure evolution of the NaA zeolite membrane. The electrochemical impedance of the NaA zeolitic membrane was measured in acid solutions. It was found that the variation in the electrochemical impedance is correlated to the separation performance caused by microstructure evolution. In this work, samples of LTA zeolite are studied through EIS. This with the aim to evaluate how the crystallization time affects the electrical properties of the samples.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Synthesis of LTA zeolite

The samples of zeolite linde type A or (zeolite A) were synthesized according to the International Zeolite Association recipe's instructions, see Thompson and Franklin (2021). In the synthesis were used deionized water, sodium hydroxide, sodium aluminate, and sodium metasilicate; 80 ml of water and 0.723 g of sodium hydroxide were mixed until NaOH was completely dissolved. The mixture was divided into two equal volumes stored in polypropylene bottles, and this was defined as the mixture A. Then, half of mixture A was mixed with 8.259 g of sodium aluminate; the mixture was stirred in the capped bottle until homogeneity was reached, this is the mixture B. The other half of mixture A was mixed with 15.48 g of sodium metasilicate. The mixture was stirred until a reached homogeneity, this is mixture C. Both mixtures, B and C, were mixed, and a thick gel was formed. This gel was stirred until a complete homogenization was observed. Prior to the crystallization

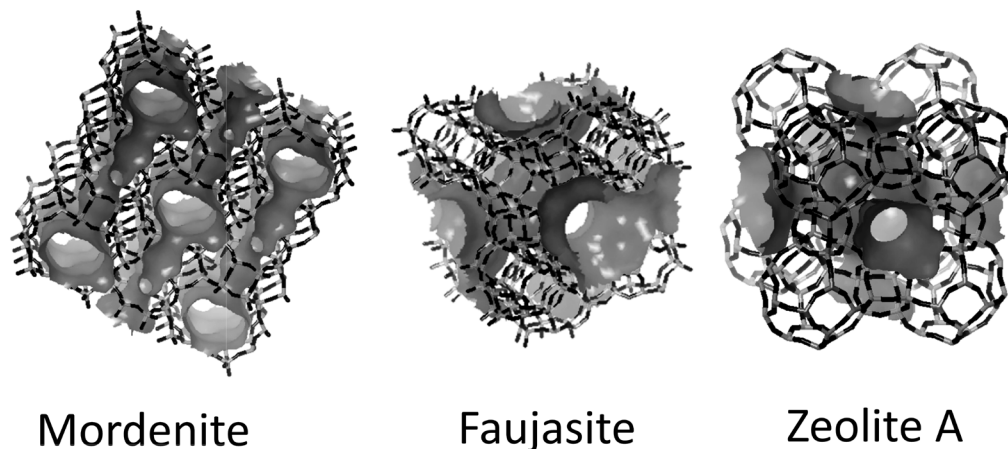


Fig. 1. Representation of different zeolite frameworks.

of zeolite LTA, the homogenized gel from mixture C was divided into four equal volumes. Each volume was placed into a capped polypropylene bottle, and each one of them was kept inside an oven at a constant temperature of 99 °C. Each bottle was taken out from the oven at different times, namely: 2, 3, 4 and 21 hours. All bottles were cooled under 30 °C. The content of each container was washed with deionized water and filtered, this with the aim to recover the solids. Finally, the products were dried at 100 °C for 12 hours. Through this process, four samples of zeolite LTA were generated.

2.2 Electrochemical impedance spectroscopy

For this study, each sample was compressed into a pellet with a diameter of 1 cm and thickness of 1 mm; during the compression and for each sample, 10 tons were applied on the circular area for approximately 30 min, and no binders were used. Then each sample was placed between two copper electrodes; for this purpose, a sample holder was used where the electrodes were fixed to the sample through mechanical pressure, as described by Martínez-Rosas et al. (2021). Prior to analysis, each electrode was polished and a mirror surface was obtained. The sample between the electrodes allows us to consider a parallel plate capacitor. Then, each sample was wired to an E4980A Precision LCR Meter. As a result, a set of data corresponding to the magnitude of total impedance $|Z_T|$, phase angle θ_d , and frequency values were obtained. The amplitude voltage was 1 V and the frequency sweep was done in the range from 2 Hz to 2 MHz. The measurements were obtained at room temperature, which can be considered as 25 °C. The complex Fourier impedance is expressed in terms of the real Z' and imaginary Z'' parts, as a result the total impedance is given by

$$Z_T = Z' + jZ'', \quad (1)$$

which is a function of complex frequency $j\omega$, where $j = \sqrt{-1}$ and $\omega = 2\pi f$. Then, the magnitude of total impedance is given by

$$|Z_T| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2}. \quad (2)$$

From the total impedance magnitude and the phase angle, the real and imaginary parts of impedance can be obtained.

$$Z' = |Z_T| \cos \theta \quad (3)$$

$$Z'' = |Z_T| \sin \theta \quad (4)$$

After considering the parallel plates capacitor model, where the sample has a thickness h , and it is located between two parallel and circular plates with area A , the total conductivity can be calculated as

$$\sigma_T = \frac{h}{A} 2\pi f C(T, f) D(f), \quad (5)$$

where D is the dissipation factor of the sample, and it can be calculated as

$$D = \tan \theta. \quad (6)$$

The bulk capacitance C [F] and the bulk electrical resistance R [Ω] are calculated from D as

$$R = \frac{D}{\omega C} \quad (7)$$

and

$$C = \frac{D}{\omega R}. \quad (8)$$

In addition, according to Fersi et al. (2016), the dc conductivity σ_{dc} can be calculated by

$$\sigma_{dc} = \frac{h}{A \cdot R}. \quad (9)$$

Finally, the total impedance is given in terms of ac conductivity σ_{ac} and σ_{dc}

$$\sigma_T = \sigma_{dc} + \sigma_{ac}. \quad (10)$$

2.3 SEM and XRD

The powder of each sample was characterized through scanning electron microscopy (SEM) using the equipment JEOL JIB-4500. In addition, each sample was analyzed through X-ray diffraction (XRD) using the Aeris Panalytical equipment with monochromatic radiation Cu K alpha ($\lambda = 0.154056$ nm, 40 kV, 15 mA).

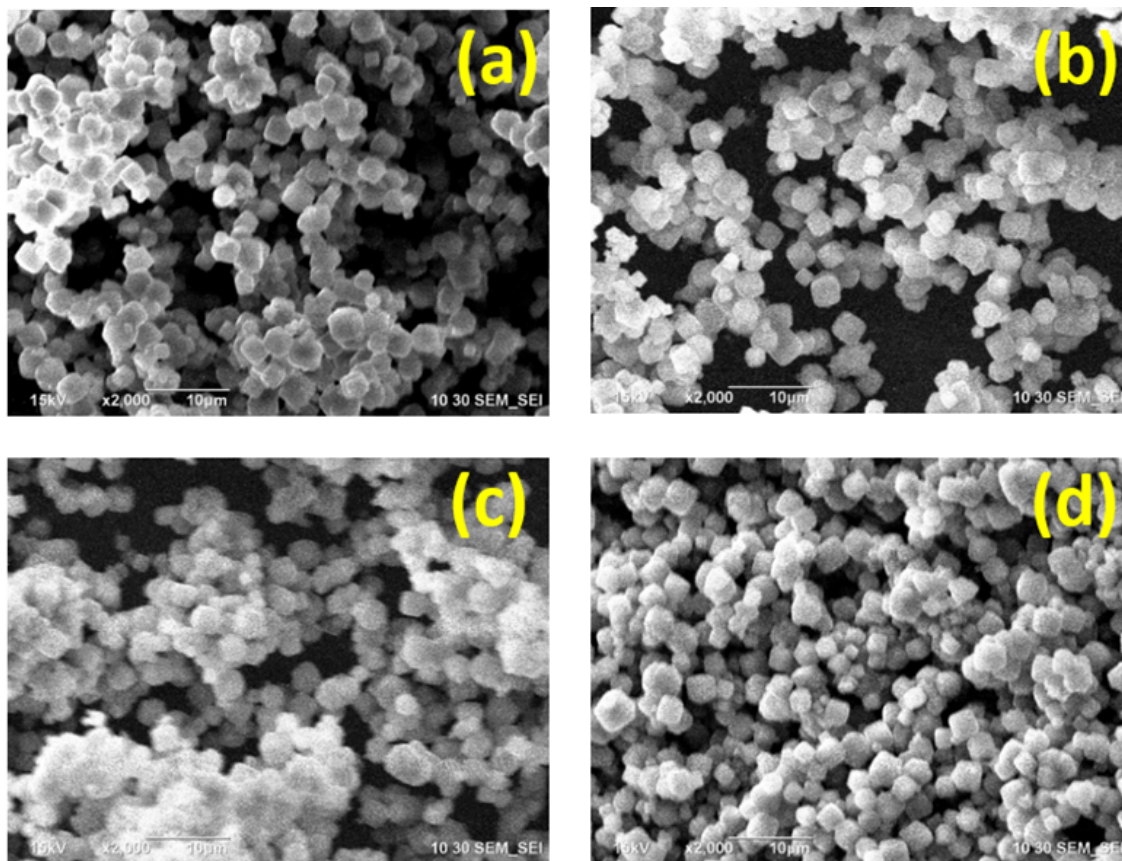


Fig. 2. Micrographs of zeolite LTA obtained with variations in the crystallization time: 2 hours (a), 3 hours (b), 4 hours (c), and 21 hours (d).

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

As shown in micrographs presented in Fig. 2, in all cases are observed particles that present the crystal's characteristic morphology corresponding to LTA zeolite (Fig. 1). Moreover, it is observed that after an increase in the crystallization time, there are more defined crystals. In other words, when comparing Fig. 2a and Fig. 2d, the crystals are more agglomerated in the Fig. 2d.

From data in Fig. 3, the coincidence between the diffraction patterns of experimental samples and the reference pattern is observed. It proves that the desired zeolite phase was obtained in the synthesis process for all samples. As reported by Alfaro et al. (2007), the observed diffraction patterns correspond to the JCPDS card 89-5422. At the same time, this implies that crystals shown in Fig. 2 are of LTA zeolite.

In addition, from the XRD data, the average size of crystallites can be calculated. From the Scherrer equation,

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (11)$$

where D is the crystallites size in nm, K is the Scherrer constant that is a dimensionless quantity and with a value of 0.9, λ is the wavelength of the x-ray source, in this case, $\lambda = 0.154056$ nm, β is the FWHM (full width at

half maximum) in radians, and θ is the peak position in radians. Using Eq. 11, the size of crystallites was calculated and averaged for each sample. In addition, after dividing the area of crystalline peaks by the area of all peaks, the crystallinity percentage can be calculated. The results are presented in Table 1.

Table 1. Average crystallite size and crystallinity of LTA samples

Sample	Average crystallite size [nm]	Crystallinity % of the material
S1	58	69.47
S2	57	72.63
S3	56	71.74
S4	58	70.49

As it can be observed by the results in Table 1, the average crystallite size decreases when the crystallization time increases from 2 to 4 hours, and in 21 hours, the crystallite size increased to the average value observed in two hours. Moreover, the sample's crystallinity rises from two to three hours and decreases from 3 to 21 hours. These results illustrate how the crystalline characteristics of samples depend on crystallization time and the media where the crystals are. In this regard the most interesting result is that when comparing S1 and S4, even when the average crystallite is the same, the crystallinity of the samples is different.

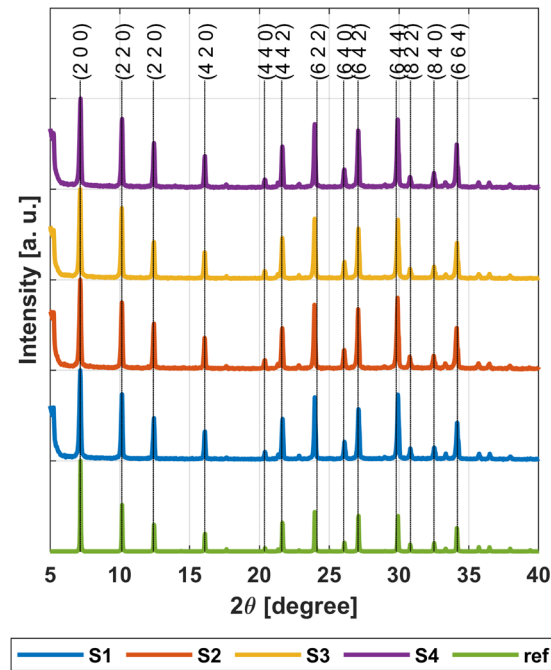


Fig. 3. XRD diffraction analysis of zeolite LTA under variations in crystallization time: 2 hours (S1), 3 hours (S2), 4 hours (S3), and 21 hours (S4). The samples are compared with the reference diffraction pattern (ref), which was retrieved from the IZA, see Baerlocher and McCusker (2015).

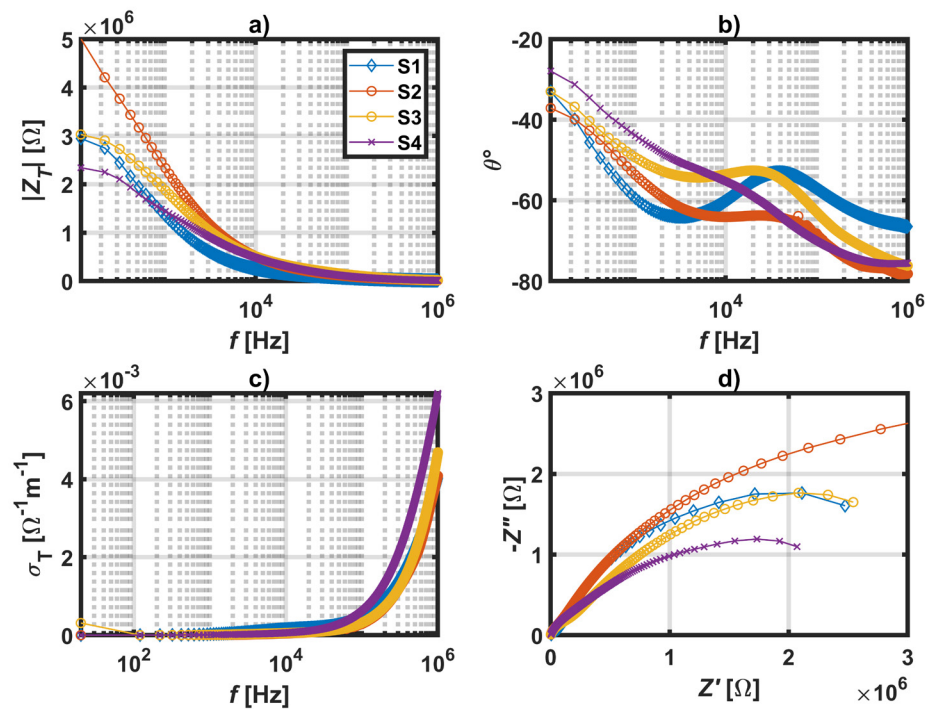


Fig. 4. Results from electrical characterization: a) total impedance bode plot, b) phase angle of total impedance, c) total conductivity, d) Nyquist diagram.

The results of electrical characterization through EIS are shown in Fig. 4. As it is illustrated, the magnitude of total impedance decreases almost in the same way for all samples; where the sample with the highest initial impedance is the one with a crystallization time of 3 hours. The data in Fig. 4b shows that the phase angle exhibits similar variations for the samples S1, S2, and S3, but for the sample S4, there is a more linear decrement than in the other samples. Considering that the phase angle shows how the real and imaginary parts of the impedance change as a function of the frequency, for the sample S4, there is a greater effect of the real part of impedance than the imaginary part, this fact is confirmed in after observing the Nyquist plot (Fig. 4d). This behavior is a consequence of the crystal dimensions observed in the samples, which can be associated with a longer crystallization time that produces more defined crystals and a greater crystallization level of the precursor gel.

The crystallization level of the sample generates an increase in the AC conductivity (Fig. 4c). This can be understood as a consequence of “more defined crystals” with “more uniform dimensions,” these properties generate a more uniform ionic conductivity in the “more crystallized samples.” Simultaneously, with a higher crystallization, the inner capacitive and resistive effects are less relevant due to the conductivity through and between the crystals, as reported by Martínez-Rosas et al. (2021). As can be observed in the conductivity plot, for each line there is evidence of different conductivity regions for each line, which can be associated to Jonsher’s power-law. As a consequence, data of conductivity can be fitted to the Jonsher’s power-law:

$$\sigma_{ac} = \sigma_{dc} + A\omega^n, \quad (12)$$

where σ_{dc} is the value of the conductivity at low frequency, A is a constant for a particular temperature, ω is the angular frequency and n is the power-law exponent, where $0 < n < 1$. Using Origin software, the data was fitted and the results are presented in Table 2.

Table 2. Jonsher’s power law parameters

Sample	A	n
S1	1.23318×10^{-6}	0.45252
S2	7.61818×10^{-10}	0.99031
S3	6.55289×10^{-10}	1
S4	1.12146×10^{-9}	1

At low-frequency values, the effect of dc conductivity is observed, where an almost constant value is observed for each sample; at high frequencies, a linear region of conductivity is observed, with a particular slope for each sample. The transition between these two behaviors, which is a function of the frequency exponent in Eq. 12. As it is shown, these curves match with the universal behavior associated with Jonsher’s power-law. Finally, in the Nyquist plot (Fig. 4d), there are arcs or semicircles, which depend on the relaxation strength in the frequency range used for analysis.

4. CONCLUSIONS

In this work, the synthesis of LTA zeolite was presented. The effect of variations generated by the crystallization time was evaluated. The samples were characterized

through SEM and XRD. In addition, the samples were analyzed through electrochemical impedance spectroscopy. As a result, a dependency between the crystallization time and the observed electrical properties were observed.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the UNAM PAPIIT IN115920 Grant and CONACYT through the basic-science project A1-S-33492.

REFERENCES

- Alfaro, S., Rodriguez, C., Valenzuela, M.A., and Bosch, P. (2007). Aging time effect on the synthesis of small crystal LTA zeolites in the absence of organic template. *Materials Letters*, 61(23-24), 4655–4658.
- Baerlocher, C. and McCusker, L.B. (2015). Database of Zeolite Structures: <http://www.iza-structure.org/databases>. Accessed on March 5th.
- Cai, X., Zhang, Y., Yin, L., Ding, D., Jing, W., and Gu, X. (2016). Electrochemical impedance spectroscopy for analyzing microstructure evolution of NaA zeolite membrane in acid water/ethanol solution. *Chemical Engineering Science*, 153, 1–9.
- Derakhshan-Nejad, A., Rangkooy, H.A., Cheraghi, M., and Yengejeh, R.J. (2020). Removal of ethyl benzene vapor pollutant from the air using TiO₂ nanoparticles immobilized on the ZSM-5 zeolite under UV radiation in lab scale. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18(1), 201–209.
- Fersi, M.A., Chaabane, I., and Gargouri, M. (2016). Impedance, AC conductivity and dielectric behavior Adeninium Trichloromercurate (II). *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 83, 306–313.
- Franke, M.E. and Simon, U. (1999). Proton mobility in H-ZSM5 studied by impedance spectroscopy. *Solid State Ionics*, 118(3-4), 311–316.
- Hermassi, M., Valderrama, C., Font, O., Moreno, N., Querol, X., Batis, N.H., and Cortina, J.L. (2020). Phosphate recovery from aqueous solution by K-zeolite synthesized from fly ash for subsequent valorisation as slow release fertilizer. *Science of The Total Environment*, 731, 139002.
- Martínez-Rosas, M., Garrafa-Gálvez, H., Nava, O., Murrieta-Rico, F., Chinchillas-Chinchillas, M., Carrillo-Castillo, A., and Luque, P. (2021). Electrochemical impedance characterization of zno semiconductor nanoparticles biosynthesized with verbascum thapsus. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 1–10.
- Murrieta-Rico, F.N., Petranovskii, V., Sergiyenko, O., Grishin, M., Sarvadii, S., Sanchez-Lopez, J.d.D., Nieto-Hipolito, J.I., Galván, D.H., Antúnez-García, J., and Yocupicio-Gaxiola, R.I. (2021). QCM modified with FAU zeolite nanostructures for analysis of temperature induced adsorbed mass changes. *Measurement*, 108935.
- Murrieta-Rico, F.N., Petranovskii, V., Yocupicio-Gaxiola, R.I., and Tyrsa, V. (2019). Zeolite-Based Optical Detectors. In *Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications*, 1–16. IGI Global.
- Thompson, R.W. and Franklin, K.C. (2021). LTA Linde Type A: <http://www.iza-online.org/synthesis/Recipes/Linde%20Type%20A.html>. Accessed on March 5th.

Efecto de la velocidad de avance en torneado CNC en seco y el acabado superficial en la vida a fatiga de una aleación de aluminio 6061-T6

Kevin E. Petatan Bahena*, Isaac Gutiérrez Rojas*, Arturo Abúndez Pliego*, Jan Mayén Chaires**, Andrés Blanco Ortega*.

*Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Prolongación Palmira Esq. Apatzingán S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, 62480, México; (arturo.ap@cenidet.tecnm.mx).

**CONACYT-CIATEQ, Unidad San Luis Potosí. Eje 126 No. 225, Zona Industrial. San Luis Potosí, S.L.P. C.P. 78395, México

Resumen: En este trabajo se presenta la evaluación del efecto que tiene la velocidad del avance y el acabado superficial en la vida a fatiga de una aleación de aluminio 6061-T6. La aleación se maquinó en un Torno CNC DYNAMACH modelo TK50/100" a tres diferentes condiciones de avance (150%, 100%, 50%) y una velocidad constante del mandril de 233 rpm. Posteriormente se obtuvieron dos bloques de 18 muestras cada uno, de los cuales, uno fue pulido hasta un acabado en la dirección axial para evitar las ralladuras circunferenciales y reducir las concentraciones de esfuerzos. Las probetas se ensayaron en una máquina de flexión rotativa tipo Moore a una frecuencia de 29 Hz con carga de amplitud constante de 150 MPa, hasta la fractura. A través del tratamiento de los resultados experimentales se encontró que una condición de avance a 50% y el proceso de lijado de las piezas reducen en un 35.68 y 58.74%, respectivamente, la vida a fatiga de la aleación de estudio.

Palabras clave: aluminio, fatiga, CNC, mecanizado, temperatura.

1. INTRODUCCIÓN

En ingeniería, especialmente en ciencia de materiales, la fatiga se refiere a un fenómeno donde la falla de los materiales sometidos a cargas dinámicas cíclicas se produce ante cargas inferiores a la resistencia última. Este fenómeno consiste físicamente en grietas y deformaciones progresivas, que eventualmente conducen a la fractura del material (Smith *et al.*, 2006). Las aleaciones de aluminio son materiales que se utilizan cada vez más para enfrentar este problema debido a propiedades mecánicas como la resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, peso ligero, entre otras. Sus principales aplicaciones se pueden encontrar en componentes estructurales de aeronaves, para construir componentes de motores, entre otros, los cuales están sujetos a cargas cíclicas y fluctuaciones de temperatura en la cámara de combustión (Nandana *et al.*, 2019) (Nelaturu *et al.*, 2020).

Algunos componentes hechos de aleaciones de aluminio suelen ser elementos de gran rigidez y, con frecuencia, deben fabricarse en una sola pieza. Las operaciones de mecanizado son bastante competitivas desde el punto de vista productivo. Operaciones como el fresado, que se utiliza para procesos de perforación de gran tamaño en elementos con forma de espiga, operaciones de taladrado son frecuentes utilizados en el mecanizado de agujeros para remaches, y las operaciones de torneado se utilizan para fabricar piezas cilíndricas que suelen ser articuladas. Sin embargo, las operaciones de mecanizado provocan alteraciones

que afectan su geometría, propiedades físico-químicas y mecánicas. Con la intención de aumentar la productividad de los procesos de mecanizado y la funcionalidad de la pieza maquinada, se aplican lubricantes o refrigerantes durante el proceso. Sin embargo, estas tecnologías son altamente contaminantes y se busca reducir su uso. Esto dio lugar a la aplicación de la supresión total de estas sustancias, es decir, mecanizado en seco (Benedicto *et al.*, 2017) (Syed *et al.*, 2017) (Martín-Béjar *et al.*, 2020) (M'saoubi *et al.*, 2008) (Suraratchai *et al.*, 2008).

Kurkute & Chavan (2018) estudiaron el efecto que la velocidad del avance y la velocidad de corte en seco tienen en la rugosidad superficial y la microdureza de una aleación de aluminio 6063. Se utilizaron velocidades de 10-50 m/min y velocidades de avance de 0.40-0.80 mm/rev. Encontraron que una velocidad de avance de 0.5 mm/r y 40 m/min de velocidad de corte provoca la menor rugosidad superficial. También en este trabajo se desarrolló un modelo que permite estimar la microdureza en función del avance, la velocidad de corte, las fuerzas de corte y el proceso de mecanizado (desbaste y acabado). Asimismo, Campbell *et al.* (2006) estudiaron el efecto del torneado en seco en la microestructura de una aleación de aluminio AL7075-T651 en función de la microdureza superficial. Utilizaron velocidades de corte de 360-720 m/min y un avance constante de 0.076 mm/r, se varió ángulo (0-15°) de desprendimiento de la herramienta de corte. Concluyeron en que al incrementar la velocidad de corte y

en ángulos bajos de desprendimiento, se generó una modificación en la microestructura a mayores profundidades superficiales, como consecuencia del incremento de temperatura en la zona de corte. Por otra parte, en un estudio sobre alteraciones de la microdureza inducidas por ensayos de mecanizado convencional y no convencional a una aleación de aluminio 6061, Akkurt (2015) observó que, en todos los procesos de mecanizado ensayados, la microdureza disminuyó en la capa más superficial de la pieza, en comparación con el material de llegada. Esta reducción de microdureza podría deberse a el efecto térmico de la operación de mecanizado sobre la superficie del material.

Como se muestra en la revisión de la literatura, hay varios estudios que relacionan los parámetros de corte con las propiedades superficiales, como la microdureza y la resistencia a la corrosión en aleaciones de aluminio mecanizadas en seco. Sin embargo, en ningún caso se analizaron los efectos sobre la fatiga cíclica entre los parámetros de avance, el efecto térmico y el pulido del material. Por ello, en este trabajo se realizó un análisis de la influencia que ejercen estos parámetros sobre la vida a fatiga de una aleación de aluminio 6061-T6, en condiciones de torneado en seco. Las probetas preparadas en estas condiciones se sometieron a ensayos de fatiga de amplitud constante en una máquina de fatiga por flexión rotativa tipo Moore. A través de un análisis paramétrico, se evaluó la influencia tanto de la velocidad de avance durante el corte como del acabado superficial durante el proceso de lijado en la vida a fatiga del material, así como la posible interrelación entre ellas.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1. Composición y propiedades del material

El aluminio 6061-T6 es una aleación de propósito general muy popular con buena facilidad de maquinado y es ampliamente disponible. En la Tabla 2.1 se muestra la composición química y en la Tabla 2.2 las propiedades mecánicas de la aleación.

Tabla 2.1 Composición química de la aleación de aluminio 6061-T6 (Matweb.com, n.d.)

%	Componente								
	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
Min.	95.8	0.04	0.15		0.80		0.40		
Max.	98.6	0.35	0.40	0.70	1.20	0.15	0.80	0.15	0.25

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061-T6 (Matweb.Com, n.d.)

Resistencia última a la tensión [MPa]	Resistencia a la fluencia [MPa]	Módulo de elasticidad (E) [MPa]	Coefficiente de Poisson	Límite de resistencia a la fatiga (5×10^8 cic.) [MPa]
310	276	68.9	0.33	96.5

2.2 Diseño geométrico de las probetas

Las dimensiones y geometría de las probetas están estandarizadas bajo la norma ASTM E-466 (ASTM, 2002) (ver Fig. 2.1). Se propone un diámetro de sección de prueba de $D = 0.25$ in (6.35 mm), un diámetro para la sección de sujeción de $2D = 0.5$ in (12.7 mm), un radio de curvatura de $8D = 2$ in (50.8 mm) y una longitud de la probeta de $16D = 4$ in (101.6 mm).

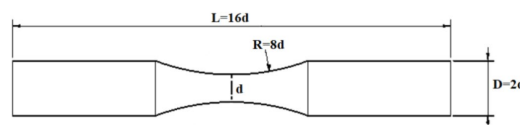


Fig. 2.1 Geometría de las probetas en función del diámetro de sección de prueba (ASTM, 2002)

2.3 Frecuencia y tipo de carga

El tipo de carga para los ensayos de fatiga son completamente reversibles ($R=-1$) de amplitud constante tal y como se muestra en la Fig. 2.2. Se propone para este estudio someter las probetas a ensayos de fatiga a un esfuerzo de 150 MPa.

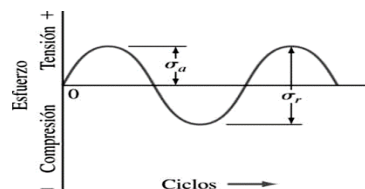


Fig. 2.2 Representación de amplitud de carga alternante (in) (Smith et al., 2006)

De acuerdo a los resultados reportados por González López (2019), la vida a fatiga obtenida en pruebas de carga cíclica de alta frecuencia concuerdan aquellos obtenidos a baja frecuencia, por lo que la frecuencia de carga no afecta a los ensayos de fatiga. Por lo tanto, la frecuencia de carga para las pruebas de fatiga está dominado por la velocidad nominal de 1750 rpm propia del motor monofásico de $\frac{1}{2}$ H.P (372.85 W).

2.4 Equipo para ensayos de fatiga

Se utilizó una máquina de fatiga por flexión rotativa tipo Moore. En ésta la probeta se somete a una condición de carga de flexión pura por medio de pesos muertos colocados en dos husillos, entre los cuales se coloca la probeta. Esta máquina trabaja con un motor eléctrico rotativo, conectado a través de una flecha al dispositivo de ensayo, como se muestra en la Fig. 2.3. El peso muerto que se aplica en combinación con la acción del motor que hace rotar la probeta, provoca que ésta última se flexione cíclicamente a la misma frecuencia que gira el motor. Con esta configuración, la probeta se somete a ciclos de fatiga rotativa de amplitud constante hasta la fractura.

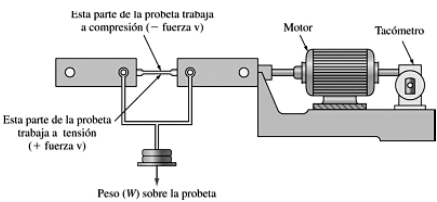


Fig. 2.3 Esquema de máquina de fatiga por flexión rotativa tipo de Moore (Smith et al., 2006)

En la Fig. 2.4 se muestra un esquema de la distribución de los elementos de apoyo y carga. La máquina de fatiga está constituida por dos chumaceras de apoyo a los extremos y dos chumaceras tensoras que son las que infringen la carga generando un esfuerzo por flexión sobre la probeta, mientras que un motor hace rotar la probeta. Los elementos de apoyo se encuentran a una distancia de 12.5 cm de los elementos de carga y queda un espacio de prueba para colocar las probetas de ensayo. Por la forma de distribución de los elementos para generar un esfuerzo de 150 MPa es necesario colocar un peso de 6.1 kg, para el cálculo del esfuerzo se utiliza la siguiente expresión matemática:

$$\sigma_A = \frac{Q/2.4d_{AB}}{\pi \cdot r^3}$$

(2.1)

Donde: σ_A es el esfuerzo generado sobre la probeta en la sección media (MPa), Q es la carga en (N), d_{AB} es la distancia desde la chumacera de apoyo hasta la chumacera tensora (m) y r es el radio de la sección media de la probeta (m).

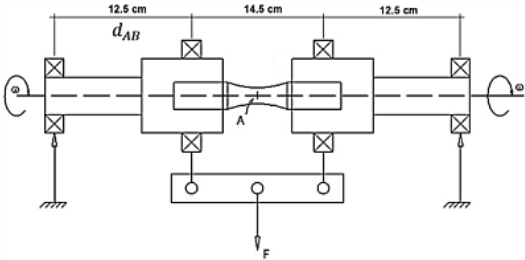


Fig. 2.4 Esquema de máquina de fatiga y distribución de los elementos (González López, 2019)

2.5. Diseño experimental

Las probetas fueron obtenidas a partir de barras de aluminio 6061-T6 de 0.5 in de diámetro (12.7 mm). Se cortaron tramos de 4.125 in (104.648 mm) de longitud aproximadamente. Posteriormente, se rectificaron los extremos de las piezas para ajustar su medida a 4 in (101.6 mm). Finalmente, las piezas se sometieron a un proceso de torneado con una velocidad constante del mandril de 233 rpm en tres condiciones diferentes de avance: 50, 100 y 150% donde la velocidad de avance nominal (100%) corresponde a 47 mm/min para el desbaste y 23 mm/min para el acabado. Se utilizó un torno CNC DYNAMACH modelo TK50/100 para ajustar las probetas a la geometría indicada por la norma ASTM E-466 (ASTM, 2002).

De acuerdo con la norma ASTM E-739 se obtuvieron seis condiciones con seis probetas cada una. Tres condiciones fueron probetas lijadas y tres no lijadas. Se obtuvieron dos bloques con 18 probetas cada uno, seis por cada condición (ver Tabla 2.5 y 2.6). Las probetas lijadas se pulieron superficialmente con lijas de grano 400, 600, 1000, 2000 y 3000 hasta un acabado final en la dirección axial (ver Fig. 2.5) para evitar ralladuras circunferenciales y así reducir las concentraciones de esfuerzo.

Tabla 2.5 Etiquetado de las probetas sin proceso de lijado (bloque I)

Probeta	Condición de avance (%)
AL150-SL-1	150
AL150-SL-2	
AL150-SL-3	
AL150-SL-4	
AL150-SL-5	
AL150-SL-6	
AL100-SL-1	100
AL100-SL-2	
AL100-SL-3	
AL100-SL-4	
AL100-SL-5	
AL100-SL-6	
AL50-SL-1	50
AL50-SL-2	
AL50-SL-3	
AL50-SL-4	
AL50-SL-5	
AL50-SL-6	

Tabla 2.6 Etiquetado de las probetas con acabado superficial de lijado (bloque II)

Probeta	Condición de avance (%)
AL150-L-1	150
AL150-L-2	
AL150-L-3	
AL150-L-4	
AL150-L-5	
AL150-L-6	
AL100-L-1	100
AL100-L-2	
AL100-L-3	
AL100-L-4	
AL100-L-5	
AL100-L-6	
AL50-L-1	50
AL50-L-2	
AL50-L-3	
AL50-L-4	
AL50-L-5	
AL50-L-6	



Fig. 2.5 Probeta pulida de aluminio 6061-T6

Posteriormente las probetas fueron ensayadas en la máquina de fatiga por flexión rotativa a una amplitud constante generada a partir de una carga de 6.1 kg, que generó un esfuerzo de 150MPa en el centro de las probetas. Los ensayos se realizaron hasta la ruptura del material para obtener la vida útil a fatiga (ver Fig. 2.6).



Fig. 2.6 Probetas ensayadas de aluminio 6061-T6

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Efecto de la velocidad del avance y el pulido

En la figura 3.1 se muestran los resultados experimentales para las tres condiciones del bloque I contra los ciclos de fatiga hasta la fractura, cuyos valores se muestran en la Tabla 3.1. Se puede observar una variación significativa de la vida de fatiga entre estas tres condiciones. Se tomó como referencia la condición de avance que presentó mejor vida útil a fatiga (150%). En comparación con esta condición, las muestras maquinadas al 50% presentan una reducción de la vida de fatiga del 35.68% y las piezas maquinadas al 100% del 29.36%. Esto quiere decir que el efecto del avance es un factor determinante que afecta directamente en la fatiga del material después del maquinado en seco.

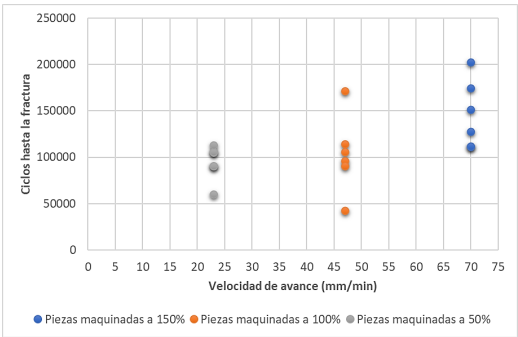


Fig. 3.1 Vida útil a fatiga del aluminio 6061 T6 sin lijar

Tabla 3.1 Datos experimentales de probetas maquinadas en seco sin proceso de lijado (bloque I)

Condición [%]	Probeta	Ciclos
150	AL150-SL-1	111072
	AL150-SL-2	174821
	AL150-SL-3	151237
	AL150-SL-4	127593
	AL150-SL-5	112003
	AL150-SL-6	202331
100	AL100-SL-1	105873
	AL100-SL-2	42304
	AL100-SL-3	96212
	AL100-SL-4	90573
	AL100-SL-5	171641
	AL100-SL-6	114339
50	AL50-SL-1	60214
	AL50-SL-2	90854
	AL50-SL-3	105363
	AL50-SL-4	105571
	AL50-SL-5	113010
	AL50-SL-6	90358

Los resultados de las pruebas de fatiga para las tres condiciones del bloque II se muestran en la Figura 3.2, cuyos valores se presentan en la Tabla 3. Se puede observar una variación muy pequeña de la vida de fatiga entre estas tres condiciones. Se tomó como referencia la condición de avance que presentó mejor vida útil a fatiga (100%). En comparación con esta condición, las muestras maquinadas a 50% presentan una reducción de la vida de fatiga del 14.81% y las piezas maquinadas a 150% del 11.5%. Esto quiere decir que el efecto del avance no fue un factor determinante en la fatiga del material después del pulido de las muestras. Sin embargo, en comparación con las muestras sin lijar, las tres condiciones de avance de maquinado 50, 100 y 150% con acabado superficial de lijado, presentan una reducción de la vida de fatiga del material en un 35.85% para las muestras maquinadas al 50%, 31.43% para las muestras maquinadas al 100% y 57.14% para las piezas maquinadas al 150%. Esto podría deberse a la temperatura provocada por el proceso de lijado que podría estar causando alteraciones en las propiedades superficiales del material.

Tabla 3.2 Datos del proceso de maquinado para las tres condiciones de estudio

Condición de avance [%]	Tiempo de proceso de maquinado [horas]	Velocidad del avance, desbaste [mm/min]	Velocidad del avance, acabado [mm/min]
50	1:44:37	23	12
100	0:53:27	47	23
150	0:36:17	70	35

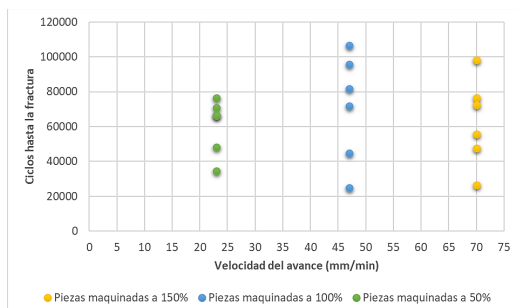


Fig. 3.2 Vida útil a fatiga del aluminio 6061 T6 pulido

Tabla 3.3 Datos experimentales de probetas maquinadas en seco con acabado superficial de lijado (bloque II)

Condición [%]	Probeta	Ciclos
150	AL150-L-1	76516
	AL150-L-2	26351
	AL150-L-3	55670
	AL150-L-4	72277
	AL150-L-5	47698
	AL150-L-6	98280
100	AL100-L-1	71821
	AL100-L-2	95679
	AL100-L-3	44915
	AL100-L-4	24839
	AL100-L-5	106715
	AL100-L-6	81771
50	AL50-L-1	66507
	AL50-L-2	34552
	AL50-L-3	76364
	AL50-L-4	48167
	AL50-L-5	71007
	AL50-L-6	66084

3.2 Efecto de la temperatura del avance

Se midió la temperatura de las probetas durante el proceso de maquinado en cada una de las condiciones (50, 100 y 150% de avance) con una cámara termográfica de la marca **Hti** modelo "HT-18". Las capturas de temperatura se registraron en cuatro niveles de proceso de desbaste a un radio R400, R200, R125, R80 y en el acabado superficial para cada condición (ver Figuras 3.3, 3.4 y 3.5). Como se puede observar, la temperatura registrada en todas las condiciones es baja (26-30 °C) y no presenta una variación significativa entre cada condición, sin embargo, se presentó una mayor concentración de la temperatura en las probetas maquinadas a un 50% en comparación con las probetas maquinadas a 100 y 150% (ver Figs. 3.3, 3.4 y 3.5). Esta diferencia de concentración de temperatura podría deberse al tiempo de proceso (ver Tabla 3.2), donde el cortador permanece en una misma zona de la probeta dependiendo de la condición de avance. Esto provoca una mayor concentración de temperatura en una velocidad de avance lento, es decir, la rugosidad en la probeta a simple vista es menor (ver Figura 3.6), se presentan con más relevancia los efectos térmicos causando alteraciones

superficiales y el enfriamiento se retrasa en esa zona de la probeta durante el maquinado, lo cual estaría provocando esa reducción significativa de vida de fatiga del material en estas probetas maquinadas a 50% en comparación con las probetas maquinadas a 150%.

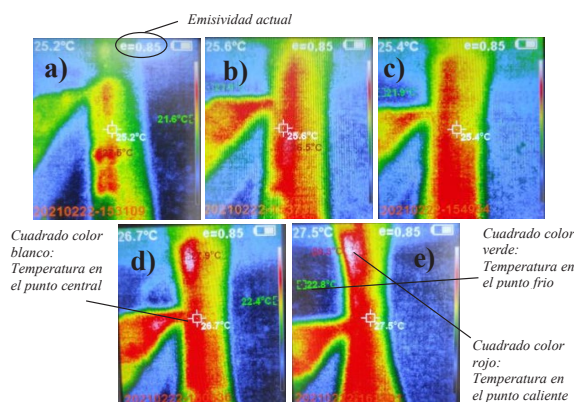


Fig. 3.3 Temperatura del proceso de maquinado a un avance del 500%. a) R400, b) R200, c) R125, d) R80 y e) acabado

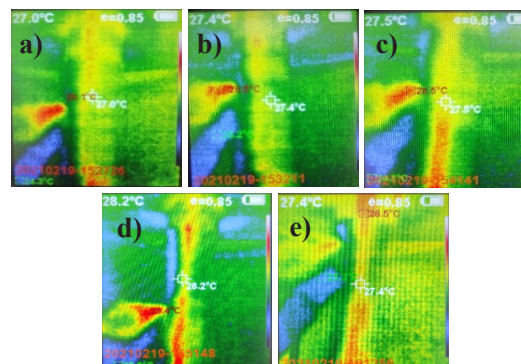


Fig. 3.4 Temperatura del proceso de maquinado a un avance del 100%. a) R400, b) R200, c) R125, d) R80 y e) acabado

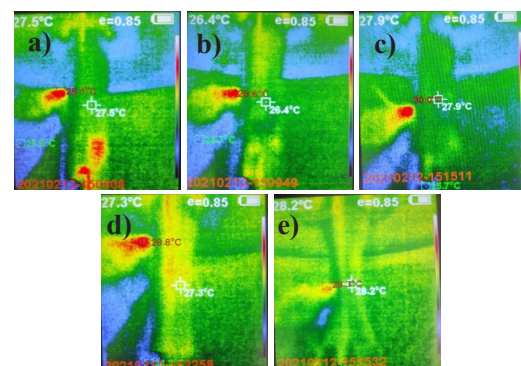


Fig. 3.5 Temperatura del proceso de maquinado a un avance del 150%. a) R400, b) R200, c) R125, d) R80 y e) acabado

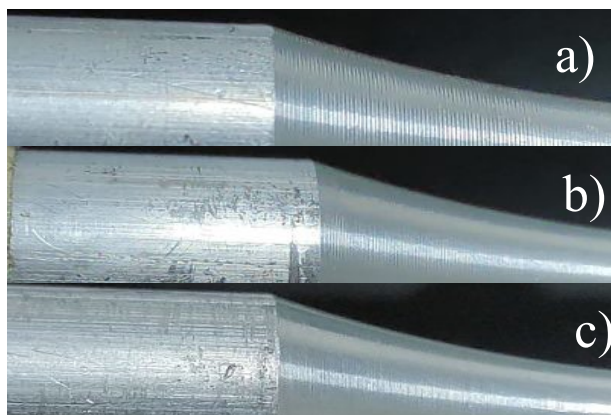


Fig. 3.6 Rugosidad visual de las probetas de aluminio 6061-T6 maquinadas a: a) 150%, b) 100% y c) 50%. Fotos tomadas con un celular Xiaomi Redmi Note 9 pro.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó la influencia de la velocidad del avance de maquinado y el acabado superficial de las probetas sobre la vida útil a fatiga de la aleación de aluminio 6061-T6 a través de un estudio paramétrico, en el cual se prepararon probetas de acuerdo a la norma ASTM E466. Los resultados de los ensayos de fatiga demostraron que:

- Entre más rápida sea la velocidad del avance, será mayor la rugosidad del acabado superficial de la probeta, pero tendrá mejor vida a fatiga en comparación con velocidades más lentas donde se obtiene menor rugosidad.
- La temperatura del maquinado afecta directamente la vida de fatiga del material. En condiciones de avance lento como lo es 50% se concentra por más tiempo la temperatura en una misma zona de la probeta, lo cual provoca una disminución de hasta el 35.68% en la vida de fatiga de la aleación 6061-T6 en comparación con el maquinado a 150%.
- La pérdida de material (reducción del diámetro de sección de prueba) y la temperatura alcanzada debido al lijado reducen considerablemente la vida de fatiga del material en un 58.742% en comparación con las piezas sin lijar maquinadas al 150%.

Agradecimientos:

Este trabajo recibió apoyo del CONACYT a través de la beca 1031303 para estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica de Kevin E. Petatan Bahena.

REFERENCES

Akkurt, A. (2015). The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(3), 303–308.

- ASTM. (2002). Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials Designation: E 466 – 96 (Reapproved 2002)e1 Standard. *Astm International*, 03(Reapproved), 4–8.
- Benedicto, E., Carou, D., & Rubio, E. M. (2017). Technical, economic and environmental review of the lubrication/cooling systems used in machining processes. *Procedia Engineering*, 184, 99–116.
- Campbell, C. E., Bendersky, L. A., Boettinger, W. J., & Ivester, R. (2006). Microstructural characterization of Al-7075-T651 chips and work pieces produced by high-speed machining. *Materials Science and Engineering: A*, 430(1–2), 15–26.
- González López, Y. (2019). *Evaluación de la influencia de tratamientos superficiales en la vida a la fatiga de materiales*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Kurkute, V., & Chavan, S. T. (2018). Modeling and Optimization of surface roughness and microhardness for roller burnishing process using response surface methodology for Aluminum 63400 alloy. *Procedia Manufacturing*, 20, 542–547.
- M'saoubi, R., Outeiro, J. C., Chandrasekaran, H., Dillon Jr, O. W., & Jawahir, I. S. (2008). A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 1(1–2), 203–236.
- Martín-Béjar, S., Trujillo Vilches, F. J., Bermudo Gamboa, C., & Sevilla Hurtado, L. (2020). Cutting speed and feed influence on surface microhardness of dry-turned UNS A97075-T6 alloy. *Applied Sciences*, 10(3), 1049.
- Matweb.com. (n.d.). <http://matweb.com/index.aspx>. Consultado el 16 de marzo de 2021.
- Nandana, M. S., Udaya Bhat, K., & Manjunatha, C. M. (2019). Influence of retrogression and re-ageing heat treatment on the fatigue crack growth behavior of 7010 aluminum alloy. *Procedia Structural Integrity*, 14(2018), 314–321. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.05.039>
- Nelaturu, P., Jana, S., Mishra, R. S., Grant, G., & Carlson, B. E. (2020). Effect of temperature on the fatigue cracking mechanisms in A356 Al alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 139175.
- Smith, W. F., Hashemi, J., Cázares, G. N., & González-Caver, P. A. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. McGraw-Hill México, DF.
- Suraratchai, M., Limido, J., Mabru, C., & Chieragatti, R. (2008). Modelling the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminium alloy. *International Journal of Fatigue*, 30(12), 2119–2126.
- Syed, A. K., Zhang, X., Moffatt, J. E., & Fitzpatrick, M. E. (2017). Effect of temperature and thermal cycling on fatigue crack growth in aluminium reinforced with GLARE bonded crack retarders. *International Journal of Fatigue*, 98, 53–61.

Máquina de rehabilitación de cadera de 3 GDL

Uziel Reynosa-Vargas*, Andrés Blanco-Ortega*, Cesar H. Guzmán-Valdivia**
Andrea Magadán-Salazar*, Arturo Abúndez-Pliego* y Jonathan Villanueva-Tavira***

*Instituto Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490
(Tel: 777-362-7770; e-mail: andres.bo@cenidet.tecnm.mx).

**Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México, C. P. 20131
(e-mail: cesar.guzman.valdivia@gmail.com)

***Universidad Tecnológica Emiliano Zapata-UTEZ, Morelos, México, C.P. 62490
(Tel: 777-362-7770; e-mail: jonathanvillanueva@utez.edu.mx).

Resumen: El uso de la robótica en la rehabilitación ha captado gran interés en instituciones, centros de investigación y empresas alrededor de todo el mundo. Los robots de rehabilitación son una herramienta para los especialistas, fisioterapeutas, para proporcionar movimientos suaves y controlados, así como atender la demanda de rehabilitación. En este artículo se presenta un nuevo robot para rehabilitación de cadera de tres grados de libertad (GDL) basado en el uso de sistemas de guías lineales. Se presenta el modelo dinámico, se diseñan estrategias de control tipo PID para el seguimiento de trayectorias; para que la máquina proporcione los movimientos básicos que se requiere para la rehabilitación de cadera. En este artículo se reporta la respuesta para los movimientos de flexión y abducción. La máquina que se propone, puede proporcionar los movimientos de flexión-extensión, abducción-aducción y rotación interna-externa.

Keywords: Rehabilitador de cadera, máquina de rehabilitación, robótica de rehabilitación.

1. INTRODUCCIÓN

La mecatrónica en la rehabilitación de cadera es un campo de investigación relativamente nuevo. Los robots o máquinas de rehabilitación son herramientas que permiten a los pacientes realizar movimientos básicos y combinados como parte de su programa de rehabilitación.

El objetivo que busca la rehabilitación, es recuperar las aptitudes físicas perdidas a causa de un incidente traumático mediante terapia física y, en estos tiempos, que la recuperación del paciente sea cada vez más rápida.

Debido al constante incremento de pacientes con lesiones y la falta de personal fisioterapeuta para brindar una correcta atención, surgen los robots de rehabilitación. Es importante señalar que estos dispositivos mecánicos no sustituyen al terapeuta, le sirven como apoyo durante el proceso de terapia.

En [1] se presenta un análisis de la biomecánica de la cadera mediante el uso del software de kinovea, para medir las posiciones angulares de la extremidad inferior, con el fin de analizar los movimientos en un proceso de rehabilitación, así como determinar las posiciones y velocidades que una máquina de rehabilitación debe proporcionar. Posteriormente, en [2], Guzmán *et al.* presentan una revisión de la robótica en la rehabilitación de cadera, donde clasifica los tipos de robots para rehabilitación de cadera basados en: mecanismos externos, en

ortesis, en el andar, mecanismos en los pies, en ortesis y caminadora.

Vaida *et al.* [3] presentan el diseño de un sistema robótico para la rehabilitación de miembros inferiores después de un ictus de pacientes confinados en cama durante la etapa aguda del tratamiento. El sistema robótico se puede acoplar a la cama del paciente, realizando ejercicios de rehabilitación del miembro inferior en todas las articulaciones principales: cadera, rodilla y tobillo. De la cadera solo ofrece los movimientos de flexión/extensión y abducción/aducción.

K. Homma *et al.* [4] propusieron un sistema de rehabilitación para extremidades superiores de 6 GDL que emplea un mecanismo impulsado por cables, ver Fig. 1. Proporciona movimientos de rehabilitación a cadera, rodilla y tobillo.

Fujishiro *et al.* [5] desarrollaron un robot de rehabilitación basado en un sistema de coordenadas polares con la articulación de la cadera como origen. El robot está compuesto por una silla, un motor de movimiento circular y un motor lineal. El motor de movimiento circular rota las extremidades inferiores del paciente alrededor de la cadera. El motor lineal flexiona y estira las extremidades inferiores.

Sakaki [6] propone un rehabilitador de miembros inferiores de 3 GDL, para movilizar la rodilla y la cadera en pacientes espásticos. El dispositivo proporciona los movimientos de flexión/extensión, y es capaz de imitar el movimiento de la

pierna realizado por el terapeuta, en donde el movimiento es guardado en memoria para posteriormente replicar el movimiento.

Sun *et al.* [7] proponen un mecanismo paralelo como rehabilitador de miembros inferiores de 3 GDL, utiliza correderas lineales que permiten deslizar la base del reposa-pie. En 2009 S. Komada *et al.* [8] desarrollaron un rehabilitador de 3 GDL, cuenta con un sistema que permite estimar la actividad muscular sin un electromiograma. Las fuerzas de los músculos humanos se estiman aplicando un modelo musculoesquelético, utilizado principalmente para el análisis de la marcha. Realiza la rehabilitación de rodilla y cadera en el plano sagital.

Akdogan y Adli [9] presentan un robot terapéutico de 3-GDL para rehabilitación en extremidades inferiores, llamado, Physiotherabot. El rehabilitador realiza movimientos de flexión/extensión y abducción/aducción para la cadera y flexión/extensión para la rodilla.

Guzmán *et al.* [10], proponen un robot de rehabilitación de cadera llamado HipBot, de 5 GDL para realizar movimientos combinados de abducción/aducción y flexión/extensión, ver Fig. 1. Posteriormente, en [11] propone un controlador robusto para Hipbot con seguimiento de trayectorias.

Gómez *et al.* [12] desarrollaron el prototipo físico de un rehabilitador de 3 GDL basado en un mecanismo paralelo que proporciona movimientos de flexión-extensión, abducción-aducción y movimientos combinados, ver Fig. 2.

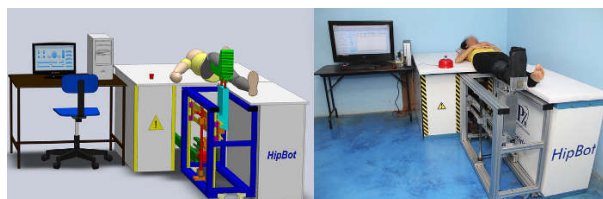


Fig. 1 Rehabilitador de cadera HipBot.

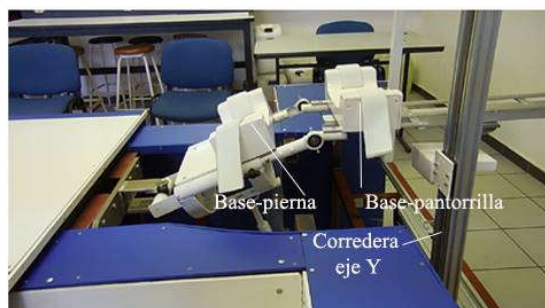


Fig. 2 Robot paralelo rehabilitador de cadera.

De la revisión del estado del arte, se puede encontrar que se han propuesto diversas máquinas para la rehabilitación de cadera, en su mayoría proporcionan solo dos movimientos, siendo

sistemas sobreactuados (utilizan más de un actuador para solo un movimiento); considerando que la cadera presenta tres rotaciones (3 GDL) [6] [7] [9] [11] [12].

En este artículo se presenta un robot para rehabilitación de cadera de 3 GDL. El dispositivo proporciona los movimientos necesarios para realizar una completa rehabilitación de cadera, mediante los movimientos, los cuales son: flexión, extensión, abducción, aducción, rotación interna y rotación externa. En [13] se reportó la cinemática del rehabilitador de cadera, en este trabajo se muestra la respuesta dinámica para los movimientos de flexión y abducción, para una rehabilitación pasiva.

En la tabla I se muestran los valores máximos para los diversos movimientos de cadera [10]. Para una mayor comprensión, en la Fig. 3 se muestran los movimientos indicados en la Tabla I.

Tabla I. Valores máximos de movimiento de la cadera

Tipo de movimiento	Valor máximo
Flexión	120°
Extensión	20°
Abducción	45°
Aducción	30°
Rotación Interna	45°
Rotación Externa	45°

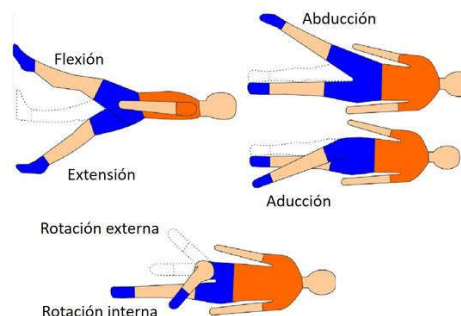


Fig. 3 Movimientos básicos de la cadera.

2. CONTROL DEL ROBOT DE REHABILITACIÓN

2.1 Descripción de la máquina

El rehabilitador que se propone, está basado en la configuración de un sistema cartesiano (XYZ), ver Fig. 4. Las entradas para los movimientos se realizan de manera indirecta mediante el uso de tres guías lineales. Las guías cuentan con un tornillo ACME para transmitir las fuerzas, lo cual ayuda a que las fuerzas para proporcionar los movimientos sean pequeñas. Además, en cualquier posición que se tenga en el rehabilitador, considerando el peso de la pierna del paciente, se mantiene estable, es decir, no se requiere aplicar fuerza para mantenerlo en una cierta posición.

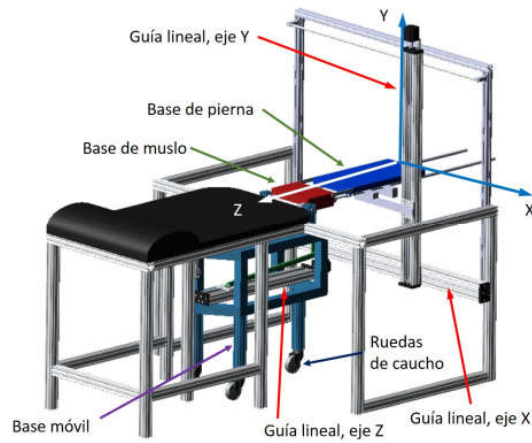


Fig. 4 Rehabilitador de cadera de 3 GDL.

La máquina de rehabilitación de cadera proporciona los movimientos de flexión-extensión, abducción-aducción y rotación interna y externa, como se muestra en la Fig. 5, Fig. 6 y Fig. 7.

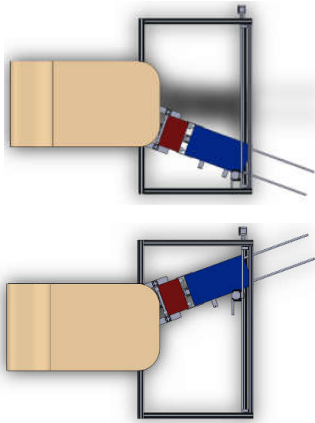


Fig. 5 Rehabilitador de cadera en posición de abducción y aducción.

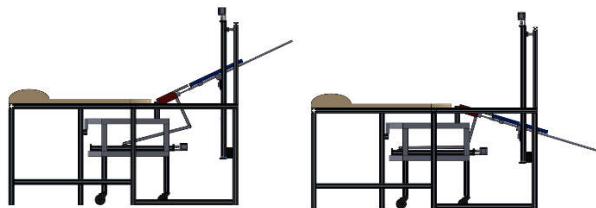


Fig. 6 Rehabilitador de cadera en posición de flexión y extensión.

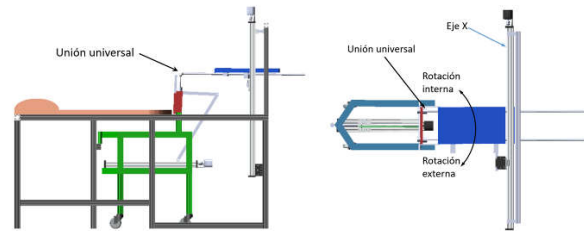


Fig. 7 Vista frontal del rehabilitador de cadera, en posición de flexión a 90°, para movimiento de rotación interna y externa.

Como se puede ver en la Fig. 7, para los movimientos de rotación interna/externa, se debe iniciar con una posición de flexión a 90°, posteriormente, mover solo el eje X. Al contar con una unión universal, permite que solo gire la base de la pierna, manteniendo la base del muslo de manera vertical (flexión de 90°).

2.2 Modelado matemático

En la Figura 8, se muestra un diagrama de cuerpo libre para modelar el rehabilitador de cadera basado en un sistema XY. Para el movimiento del eje X, se considera la masa m_1 que corresponde a la suma de la masa de la base móvil y toda la masa del sistema de guía lineal para el eje Y. En el eje Y se considera la masa m_2 correspondiente a la base móvil y parte del peso de las bases de pierna y muslo. Las entradas de control son las fuerzas F_x y F_y las cuales son proporcionadas por un motorreductor de CD al mover la base de la guía lineal. También, se consideran perturbaciones constantes en ambos ejes X y Y (P_x y P_y), para aproximar la rigidez de la articulación del hombro o la fricción presente en el sistema. Se desprecia el efecto de la gravedad en todas las guías lineales (x,y,z), debido a que en cualquier posición, aun con el peso del paciente, no es capaz de vencer el sistema, por lo cual se mantiene en equilibrio.

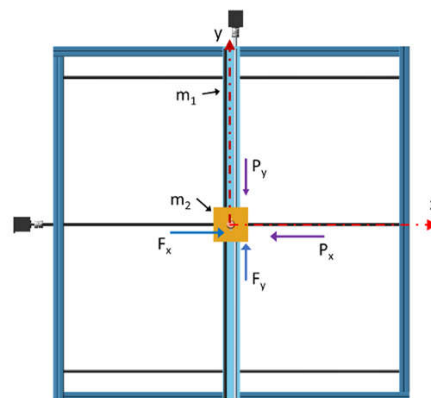


Fig. 8 Diagrama de cuerpo libre considerando solo el sistema XY del rehabilitador de cadera.

El modelo matemático que rige la dinámica para el rehabilitador de cadera considerando de manera independiente el sistema XY, de manera similar el eje Z se puede considerar como un sistema de guía lineal desacoplado, puede ser obtenido al aplicar la segunda ley de Newton o el formulismo de Euler Lagrange, el cual está dado por:

$$\ddot{x} - \frac{F_x - P_x}{m_1 + m_2} = 0 \quad (1)$$

$$\ddot{y} - \frac{F_y - P_y}{m_2} = 0 \quad (2)$$

$$\ddot{z} - \frac{F_z - P_z}{m_3} = 0 \quad (3)$$

2.3 Diseño de estrategias de control

Para que la máquina proporcione movimientos pasivos, se proponen los siguientes controladores tipo Proporcional Integral Derivativo (tipo PID) con el objetivo de seguimiento de trayectorias deseadas, para los tres movimientos lineales en los ejes X, Y y Z.

$$\begin{aligned} F_x &= m_{ex} \begin{bmatrix} \ddot{x}^* - k_{dx}(\dot{x} - \dot{x}^*) - k_{px}(x - x^*) \\ -k_{ix} \int (x - x^*) dt \end{bmatrix} \\ F_y &= m_{ey} \begin{bmatrix} \ddot{y}^* - k_{dy}(\dot{y} - \dot{y}^*) - k_{py}(y - y^*) \\ -k_{iy} \int (y - y^*) dt \end{bmatrix} \\ F_z &= m_{ez} \begin{bmatrix} \ddot{z}^* - k_{dz}(\dot{z} - \dot{z}^*) - k_{pz}(z - z^*) \\ -k_{iz} \int (z - z^*) dt \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en sus respectivas ecuaciones (1)-(3), se obtiene la dinámica en lazo cerrado, en donde el error está dado por $e_x = x - x^*$, $e_y = y - y^*$, $e_z = z - z^*$:

$$\ddot{e}_x + k_{dx}\dot{e}_x + k_{px}e_x + k_{ix}\int e_x dt = 0 \quad (5)$$

$$\ddot{e}_y + k_{dy}\dot{e}_y + k_{py}e_y + k_{iy}\int e_y dt = 0 \quad (6)$$

$$\ddot{e}_z + k_{dz}\dot{e}_z + k_{pz}e_z + k_{iz}\int e_z dt = 0 \quad (7)$$

Los parámetros de los controladores k_{dx} , k_{px} , k_{ix} , k_{dy} , k_{py} , k_{iy} , k_{dz} , k_{pz} , k_{iz} , son seleccionados de manera que los polinomios característicos de (5)-(7) sean Hurwitz; para garantizar que la dinámica del error sea globalmente asintóticamente estable. Se iguala cada polinomio característico de (5)-(7) con (8) para determinar las ganancias.

$$(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)(s + p) = 0 \quad (8)$$

En este caso para las guías lineales de los ejes X y Y se seleccionaron $\zeta = 0.7$, $\omega_n = 8$, $p = 8$ y para el eje Z, $\zeta = 1.5$, $\omega_n = 10$, $p = 10$.

Se adoptó un polinomio de Bézier interpolado suavemente entre la posición inicial y la posición final de los movimientos de rehabilitación, tal que:

$$x^*(t) = \begin{cases} x_0 & t \leq t_0 \\ x_0 - (x_f - x_0)\sigma & t_0 < t < t_f \\ x_f & t > t_f \end{cases} \quad (11)$$

$$\sigma(t, t_0, t_f) = \Delta^2 (3 - 2\Delta), \quad \Delta = \frac{t - t_0}{t_f - t_0}$$

Donde x_0 y x_f son las posiciones iniciales y finales deseadas para un movimiento de abducción (o aducción), de modo que se mueva la base muslo-pierna desde una posición angular inicial y vaya a otra posición angular final, con un cambio suave. Para el caso de movimiento de abducción se consideró que:

$$(x_0, x_f) = (0, 0.25m), \quad (t_0, t_f) = (0, 5s).$$

y para el movimiento de flexión, se consideró también un desplazamiento de 0.25 m en el eje Y.

3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

A continuación, se presentan algunos resultados de simulación utilizando el prototipo virtual del rehabilitador de cadera bajo en el entorno de MSC Adams view, con las estrategias de control tipo PID con seguimiento de trayectorias. La posición en el origen o posición neutral, es cuando el paciente está acostado, posición horizontal.

En la Fig. 9 se presenta la trayectoria deseada para ambos movimientos de abducción (eje X) y flexión (eje Y), con un movimiento suave, para iniciar en la posición neutral y desplazar la guía 0.25 m.

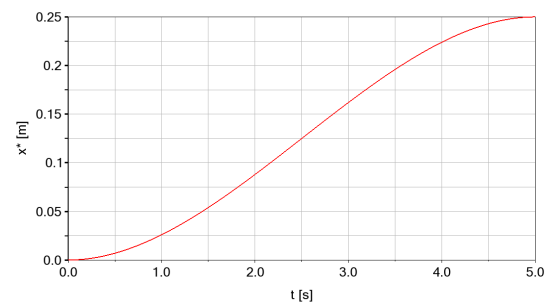


Fig. 9 Trayectoria deseada para movimiento de abducción con desplazamiento de 0.25m en el eje X.

En la Fig. 10 se muestra la respuesta para el desplazamiento en el eje X, así como el ángulo correspondiente de abducción para ese desplazamiento. Como se puede observar, la curva es suave, inicia en la posición neutral ($t=0$ s, $x=0$ m) y en 5 s se desplaza 25 mm en el eje X, el cual corresponde a 13.5° de abducción. En la Fig. 11 se muestra los desplazamientos en los tres ejes, así como las fuerzas de control requeridas para el

seguimiento de la trayectoria deseada. Se observa que, debido al acoplamiento dinámico, se tiene que aplicar una fuerza en el eje Z para mantener la plataforma en posición horizontal, la fuerza es similar en magnitud a la del eje X, y esto es debido a la posición de los eslabones que se tienen para mantener la plataforma del muslo. En la Fig. 12 se muestran el prototipo virtual del rehabilitador de cadera en la posición neutral y la posición final de abducción.

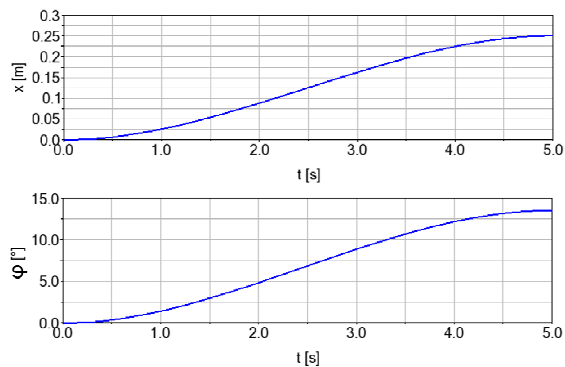


Fig. 10 Respuesta para el movimiento de abducción.

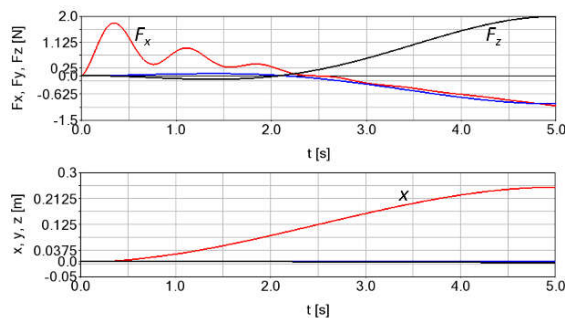


Fig. 11 Desplazamientos y fuerzas de control para el movimiento de abducción.

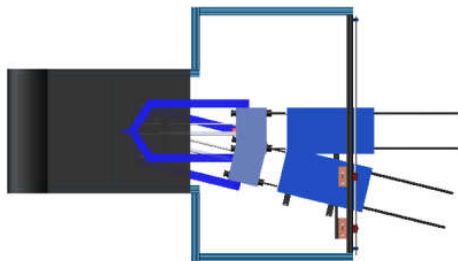


Fig. 12 Prototipo virtual en posición neutral y de abducción.

Para el movimiento de flexión, se sigue también la trayectoria deseada (14) con el controlador tipo PID (15), ver Fig. 13. En este caso se inicia en la posición neutral ($t=0s$, $x=0m$) y en 5 s se desplaza la guía lineal del eje Y, 25 mm, equivalente a 26.7° .

La respuesta para los desplazamientos lineales de las guías se muestra en la Fig. 14, así como las fuerzas de control requeridas para proporcionar el movimiento de flexión. En la Fig. 15 se muestra el prototipo virtual del rehabilitador de cadera en la posición neutral, posición final y una posición intermedia de flexión, al seguir la trayectoria deseada. Observando la Fig. 14 y Fig. 15, se puede observar que se requiere aplicar fuerza de control en las guías del eje Y y del eje Z.

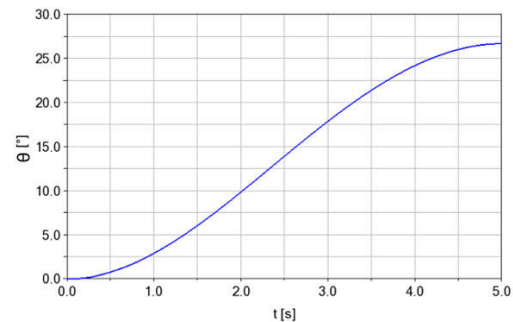


Fig. 13 Respuesta para el movimiento de flexión.

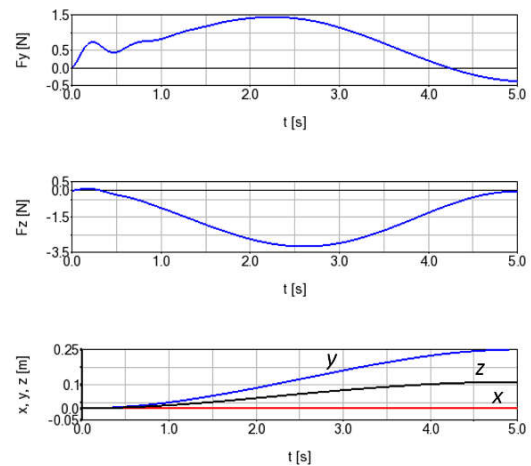


Fig. 14 Desplazamientos y fuerzas de control para el movimiento de flexión.

Para los movimientos de rotación interna-externa, se debe de iniciar con una posición de flexión de 90° , posteriormente, solo mover el eje X, como se muestra en la Fig. 15. Solo la base de la pierna es la que gira.

El rehabilitador de cadera propuesta es completamente actuado, 3 GDL, y proporciona todos los movimientos de la cadera: flexión/extension, abducción/aducción y rotación interna/externa. El uso de tornillos ACME mediante las guías lineales lo hace factible de utilizar en centros de rehabilitación y de uso personal, resultando ser una máquina económica la

cual no requiere de actuadores de grande potencia como los utilizados en sistemas robóticos. La máquina requiere de manufactura básica (corte, perforaciones, desbaste, entre otras) de pocas piezas personalizadas (8 piezas), siendo la mayoría componentes personalizados. Todo esto hace que la máquina sea viable para manufacturar y su costo sea económico, comparado a los disponibles comercialmente.



Fig. 15 Prototipo virtual en posición neutral, y dos posiciones de flexión.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el diseño de una máquina para rehabilitación de cadera de 3 GDL. Por el tipo de uniones y mecanismos que se utilizan, ésta puede proporcionar los movimientos de la cadera de flexión-extensión, abducción-aducción y rotación interna-externa.

Se presentan simulaciones con el prototipo virtual, implementando controladores tipo PID para el seguimiento de trayectorias, para los movimientos de abducción y flexión. Debido al uso de guías lineales, es posible implementar el control numérico para proporcionar los movimientos básicos, así como movimientos combinados, utilizando la cinemática reportada en [13], por lo que, queda como trabajo futuro.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo brindado por el Tecnológico Nacional de México/CENIDET en el desarrollo del proyecto titulado: "Diseño y construcción de un rehabilitador de cadera con sistema de control numérico", con clave 5206.19-P, y patente en trámite.

REFERENCIAS

[1] Guzmán-Valdivia, C.H., Blanco-Ortega, A., Oliver-Salazar, M. A., Gómez-Becerra, F. A., Carrera-Escobedo, J. L., Design and analysis of a new robotic mechanism for lower limbs rehabilitation, *IEEE International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering*. Morelos, México. pp. 15-20. 2013.

[2] Guzmán-Valdivia, C.H., Blanco-Ortega, A., Oliver-Salazar, M. A., Carrera-Escobedo, J. L., Azcaray-Rivera,

H. R., La robótica en la rehabilitación de cadera, *Dyna* 9 (3) 281–286. 2014. <https://doi.org/10.6036/6924>.

[3] C. Vaida et al., "Systematic Design of a Parallel Robotic System for Lower Limb Rehabilitation," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 34522-34537, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2974295.

[4] K. Homma, O. Fukuda, J. Sugawara, Y. Nagata and M. Usuba, "A wire-driven leg rehabilitation system: development of a 4-DOF experimental system," *Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003)*, Kobe, Japan, 2003, pp. 908-913 vol.2, doi: 10.1109/AIM.2003.1225463.

[5] T. Fujishiro, T. Shimono and T. Mizoguchi, "Development of lower limb rehabilitation robot based on polar coordinate," *2017 XXVI International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT)*, Sarajevo, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICAT.2017.8171611.

[6] Sakaki, t., TEM: therapeutic exercise machine for recovering walking functions of stroke patients, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 26 Iss 6 pp. 446 – 450. 1999.

[7] Sun, H., Zhang, L. and Li, C., Dynamic analysis of horizontal lower limbs rehabilitative robot, *2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, Shanghai, pp. 656-660. 2009.

[8] Komada S, Hashimoto Y, Okuyama N, Hisada T, Hirai J. Development of a biofeedback therapeutic-exercise-supporting manipulator. *Trans Ind Electron*; 56(10): 3914–3920. 2009.

[9] Akdogan E, Adli M. A. The design and control of a therapeutic exercise robot for lower limb rehabilitation: physiotherabot. *Mechatronics*; 21: 509–522. 2011.

[10] Guzmán-Valdivia, C.H., Blanco-Ortega, A., Oliver-Salazar, M. A., Gómez-Becerra, F. A., Carrera-Escobedo, J. L., HipBot – The design, development and control of a therapeutic robot for hip rehabilitation, *Mechatronics*, 30 (1) 55–64. 2015.

[11] Guzmán C. H., Blanco, A., Brizuela, J. A., Gómez, F. A. Robust control of a hip-joint rehabilitation robot. *Biomedical Signal Processing & Control*, 35: 100-109. 2017

[12] Gómez Becerra, F. A., Blanco Ortega, a., García Beltrán, C. D., Guzmán Valdivia, C. H. and Delgado Arcega, R. O., "Design and control of a new parallel robot for the rehabilitation of the hip-knee," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 5, pp. 1314-1319. 2018.

[13] U. Reynosa-Vargas, A. Blanco-Ortega, C. H. Guzmán-Valdivia, W. M. Alcocer-Rosado y A. Abúndez-Pliego. Análisis cinemático de una máquina de rehabilitación de cadera. *Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada*. Vol. 2, Núm. 2, pp. 272-277. 2019.

Estimación de la producción de entropía en materiales compuestos laminados: revisión de la literatura

Oscar F. Oliveros Riego*. Arturo Abúndez Pliego**.

Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Prolongación Palmira Esq. Apatzingán S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, 62480, México; (d18ce029@cenidet.tecnm.mx, arturo.ap@cenidet.tecnm.mx**).*

Resumen: En este trabajo se presenta el análisis y comparación de dos enfoques basados en principios energéticos para la estimación de vida a fatiga en materiales compuestos laminados, con los cuales se han obtenido resultados favorables, propiciando un entorno encaminado al desarrollo de modelos teóricos con un buen porcentaje de estimación. Los enfoques están basados en la primera y segunda ley de la termodinámica, de acuerdo a la teoría, la producción de entropía juega un papel importante en la estimación de vida, debido a que la fatiga es considerada como un proceso irreversible en el cual la entropía se acumula hasta la falla del material. Los enfoques presentados en este trabajo se dividen en experimentales y teóricos; la diferencia a destacar entre los enfoques es el planteamiento y estimación de la energía de daño, la cual se debe a la interacción de los mecanismos de falla en el laminado. La ventaja más notoria del enfoque teórico sobre el experimental es la no dependencia de una extensa base de datos experimentales.

Palabras clave: materiales compuestos laminados, vida a fatiga, entropía.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de materiales compuestos para sustituir metales en el sector industrial en áreas tales como la ingeniería aeroespacial, del transporte y de la construcción es de gran importancia debido a su buena relación resistencia/peso y comportamiento en aplicaciones de alta exigencia mecánica. En aplicaciones en las que los materiales se ven sometidos a diversos estados de carga que fluctúan en el tiempo, la vida a fatiga es un parámetro importante el cual generalmente se obtiene a partir de valores estadísticos generados mediante una gran cantidad de datos experimentales. La importancia de la estimación de la vida a fatiga de los materiales compuestos aumenta proporcionalmente con la demanda de este tipo de materiales dentro del sector industrial.

Se han realizado diversas investigaciones relacionadas con el fenómeno de falla por fatiga en compuestos laminados para tratar de comprender el comportamiento de los materiales compuestos bajo diferentes estados de carga. La gran diversidad de configuraciones de materiales compuestos hace difícil establecer teorías o modelos que hagan una estimación precisa de la vida a fatiga, por consecuencia existe cierta incertidumbre sobre qué teorías, criterios o modelos emplear en los diferentes casos de estudio de materiales compuestos (Aghazadeh Mohandesi & Majidi, 2009; Shiri *et al.*, 2015; Talreja, 1985; Whitworth, 1990).

A pesar de que la degradación del módulo de elasticidad del material es un indicador considerable del daño, el análisis experimental que se requiere suele ser extenso, por lo que diversos autores se han dado a la tarea de investigar y analizar

otros tipos de análisis para el monitoreo del daño y vida a fatiga en materiales compuestos; por ejemplo, los métodos energéticos que estudian los efectos térmicos que suceden en el material al estar sometido bajo cargas mecánicas (Giancane *et al.*, 2010; Steinberger *et al.*, 2006; Wei *et al.*, 2010). La estimación de la vida útil a fatiga y daño a partir de los principios energéticos se basa en dos leyes fundamentales de la termodinámica: la primera, que habla sobre la conservación de la energía y la segunda, la cual trata sobre la generación de entropía, a partir de estas leyes y de la relación que se tiene en los procesos termodinámicos irreversibles se han estudiado métodos para describir e identificar los mecanismos de daño en sólidos (Basaran *et al.*, 2014), así también, a través del estudio de las propiedades viscoelásticas en sólidos mediante métodos térmicos, se han logrado establecer relaciones entre el comportamiento térmico y la vida a fatiga que presentan algunos metales, tomando como base la energía generada en el material (Fargione *et al.*, 2002; La Rosa & Risitano, 2000; Maquin & Pierron, 2009).

El concepto de disipación de energía térmica y su aplicación en metodologías de análisis proporciona información que permite el estudio del comportamiento de materiales desde un ángulo distinto, por mencionar algunos, Harizi *et al.*, 2014; Lisle *et al.*, 2013; Montesano *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2018, en los que a través de la termografía infrarroja se monitorea la disipación de energía para identificar mecanismos de falla en el material y observar cómo se desarrolla el daño dentro del mismo, los datos adquiridos mediante las imágenes térmicas se pueden convertir

en información de temperatura, la cual se utiliza en el procedimiento para la obtención de la curva de daño del material.

Se han desarrollado diversos estudios (Emery & Dulieu-Barton, 2010; Goidescu *et al.*, 2013; Oliveros *et al.*, 2019) en los que, a través de métodos térmicos se han identificado mecanismos de falla en el material y el desarrollo del daño a través de diferentes técnicas de tratamiento de datos. Por mencionar algunos, Emery y Dulieu-Barton (Emery & Dulieu-Barton, 2010) realizaron un análisis de esfuerzo termoelástico (TSA, por sus siglas en inglés) en laminados compuestos, mediante el cual, con apoyo de imágenes térmicas analizaron la distribución de esfuerzos para identificar los cambios que presenta el material a fatiga con respecto de tres mecanismos de falla; delaminación, ruptura de fibras y agrietamiento de la matriz. Haziri *et al.* (Haziri *et al.*, 2014) realizaron un análisis termomecánico en materiales compuestos laminados de fibra de vidrio para estimar el daño mediante la evaluación cuantitativa del daño del material a través de la implementación de la termografía infrarroja y análisis de mapas térmicos.

Existen muchas metodologías para estimar la degradación de los materiales, en general, el proceso de daño debido a fatiga correspondiente a la degradación de los materiales se considera como un proceso irreversible. Durante la acumulación de daño, la producción de entropía interna debe aumentar de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica. Por lo tanto, la producción de entropía interna se puede utilizar como criterio para estimar el daño y por consiguiente la vida a fatiga del material (Basaran *et al.*, 2014). De acuerdo con la primera y segunda ley de la termodinámica, se introducen dos variables, temperatura T y entropía S , para cualquier sistema macroscópico. La entropía expresa una variación de energía asociada con una variación en la temperatura, donde la entropía siempre aumenta.

En este artículo se aborda el estudio de dos métodos para la estimación de producción entropía para la predicción de vida a fatiga en materiales compuestos laminados. Se analiza la implementación de los métodos térmicos en la estimación de vida a fatiga, así como la comparación entre metodologías empleadas para el cálculo de la entropía para conocer los alcances y limitaciones de los trabajos actuales.

2. PRESENTACIÓN DE LOS MODELOS

2.1 Enfoque experimental para la estimación de la producción de entropía

En 2011 Naderi y Khonsari presentaron los resultados del desarrollo de un criterio de falla por fatiga basado en un enfoque termodinámico, en el cual compararon los métodos de predicción de vida a fatiga que usan los enfoques de esfuerzo y energía con un concepto de acumulación de entropía (Naderi & Khonsari, 2011). Reportaron que se puede establecer que la entropía ofrece una medida natural de la degradación de las propiedades de piezas y componentes estructurales por fatiga (Naderi & Khonsari, 2012). Para la relación de producción de entropía partieron de la relación (1) (Lemaitre, 1990; Naderi *et al.*, 2010).

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{mech} + \dot{\gamma}_{cond} \geq 0 \quad (1)$$

Donde $\dot{\gamma}$ es la tasa de producción de entropía, $\dot{\gamma}_{mech}$ es la entropía debido a la disipación mecánica, la cual depende de la energía de histéresis y la temperatura, $\dot{\gamma}_{cond}$ es la entropía debido a la disipación térmica debido a la conducción de calor y depende de la temperatura y el coeficiente de conductividad térmica del material. De acuerdo al estudio realizado por Naderi *et al.* 2010, en el cual evaluaron la disipación de energía por conducción y de acuerdo a los resultados presentados concluyeron que ésta se puede despreciar, por lo que la expresión utilizada para el cálculo de estimación de entropía que utilizaron se reduce a la expresión (2).

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{mech} = \frac{H}{T} \geq 0 \quad (2)$$

Donde H es la energía de histéresis generada en cada carga y descarga en el material y T es la temperatura de la capa superficial del material. En los resultados de Naderi & Khonsari, 2011, se demostró la capacidad del método de la entropía para predecir la vida a fatiga para varias orientaciones de fibras y relaciones de esfuerzos en laminados de resina epóxica/fibra de vidrio, además que relacionaron el deterioro de los componentes estructurales con la generación de entropía a través del equilibrio de fuerzas y flujos termodinámicos.

En 2013, Naderi y Khonsari (Naderi & Khonsari, 2013), reportaron los resultados una serie de experimentos para caracterizar el comportamiento del daño de un laminado de resina epóxica/fibra de vidrio en términos de la disipación de energía de histéresis, la variación de la energía de daño, la energía asociada con la capacidad térmica, el aumento de temperatura y un método que utiliza la producción de entropía. Presentaron la estimación de la entropía (S) como la relación entre la energía de histéresis (H) debida a la disipación mecánica, la energía de daño (E_d) relacionada con la formación de grietas en el material y la temperatura (T) en la capa superficial del material (3).

$$S = \frac{H}{T} + \frac{E_d}{T} \geq 0 \quad (3)$$

Los resultados que destacan de sus análisis son; 1) de acuerdo a la evolución de temperatura obtenida, pudieron respaldar el hecho de despreciar el efecto de la disipación de energía mediante la conducción de calor para las configuraciones de material consideradas en el estudio. 2) realizaron el seguimiento de la evolución de la energía de daño y la energía asociada con la capacidad térmica del material, al comparar resultados obtuvieron que el comportamiento entre ambas curvas es opuesto, mientras la energía de daño crece, la energía asociada con la capacidad térmica del material decrece. También se observó un crecimiento considerable de la energía de daño durante la primera etapa a fatiga que representa alrededor del 20% de la vida del material (Figura 1). 3) al estimar la entropía total como la suma de entropía debido a la disipación mecánica y la entropía debido a la energía de daño, se puede explicar el

comportamiento de los mecanismos de falla presentes en el laminado una mejor manera que si se estimara la entropía en función de estos conceptos por separado.

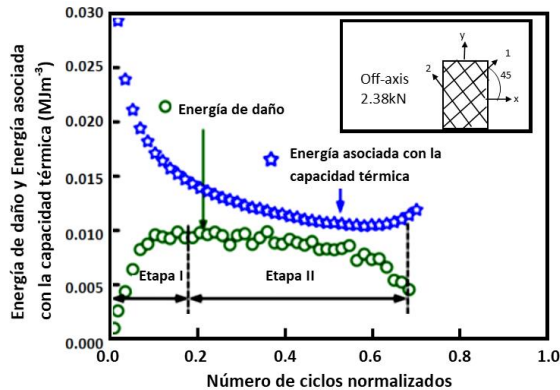


Figura 1. Energía de daño y energía asociada con la capacidad térmica respecto al número de ciclos normalizados, modificado de Naderi & Khonsari, 2013.

Se observó que la entropía debido a la energía de daño induce aproximadamente el 20% de la entropía total en las configuraciones de laminados estudiadas, como se puede observar en la Figura 2.

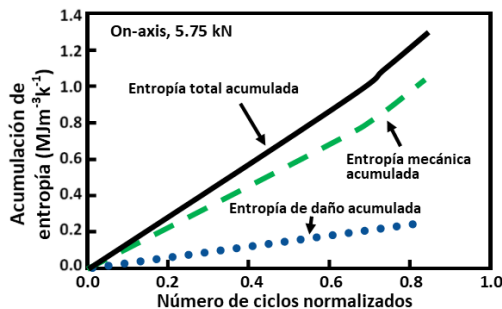


Figura 2. Entropía acumulada total, entropía debido a la energía de daño y entropía debido a la disipación mecánica respecto al número de ciclos normalizados, modificado de Naderi & Khonsari, 2013.

2.2 Enfoque teórico-experimental para la estimación de la producción de entropía.

En 2018, Mohammadi y Mahmoudi presentaron el desarrollo de un modelo basado en el enfoque de producción de entropía para predecir la vida a fatiga de laminados cross-ply, partieron de la idea de que, durante la fatiga, la entropía acumulada hasta la falla final que se genera debido al crecimiento del daño en las fibras y en la matriz, esta acumulación de entropía tiende a comportarse de manera cuasi constante y se muestra independiente de la magnitud y condiciones de carga (Mohammadi & Mahmoudi, 2018). El trabajo se enfoca en dos criterios de falla propuestos,

entropía por fractura debida a la fatiga de fibras (FFE-F) y entropía por fractura debida a la fatiga de la matriz (FFE-M), los cuales se calculan a partir del seguimiento de los estados de comportamiento a fatiga del material, con base a estos criterios de falla, plantearon el modelo empleando la mecánica de daño continuo (CDM, por sus siglas en inglés) para estimar la energía de daño en la degradación por fatiga. El principio teórico del desarrollo del modelo es la conservación de energía y generación de entropía, el cual se basa en la relación que existe entre la pérdida de energía debida a las deformaciones mecánicas, fricción interna, disipación debido a la conducción térmica y temperatura. Con base en la desigualdad de Clausius-Duhem, propusieron la relación de la tasa de producción de entropía (4).

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{W}_p}{T} + \frac{\dot{E}_d}{T} \geq 0 \quad (4)$$

Donde $\dot{\gamma}$ es la tasa de producción de entropía, $\dot{W}_p$ es la relación de disipación de energía mecánica por medio de las deformaciones irreversibles, la cual está en función de los esfuerzos y deformaciones en el material, $\dot{E}_d$ es la energía de daño relacionada con la fricción interna del material, dependiente de coeficientes térmicos y variables de daño dependientes de parámetros de comportamiento del material, y T es la temperatura de la capa superficial del material.

El desarrollo del modelo presentado por Mohammadi y Mahmoudi (Mahmoudi & Mohammadi, 2019; Mohammadi & Mahmoudi, 2018) se plantea de forma teórica con calibración experimental. En las Figuras 3 y 4 se presenta la comparación entre los resultados obtenidos a partir de la simulación del modelo propuesto y datos experimentales.

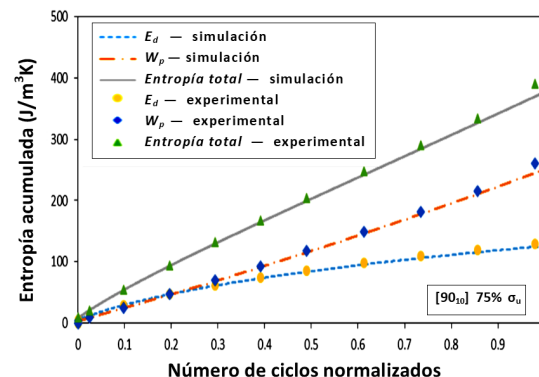


Figura 3. Entropía acumulada total, entropía debido a la energía de daño y entropía debido a la disipación mecánica respecto al número de ciclos normalizados, modificado de Mahmoudi & Mohammadi, 2019.

En la Figura 3 se presenta la acumulación de entropía de un laminado unidireccional, en el cual sus capas están orientadas a 90° con respecto al eje de aplicación de la carga; se puede observar cómo en esta configuración, la entropía dominante es la generada a partir del efecto de las deformaciones irreversibles

en el material. En la Figura 4 se muestra la entropía acumulada de un laminado unidireccional con sus capas orientadas en dirección a la aplicación de la carga, en este caso se puede notar que la entropía debida al daño es la que predomina y la entropía debida a las deformaciones irreversibles es mínima.

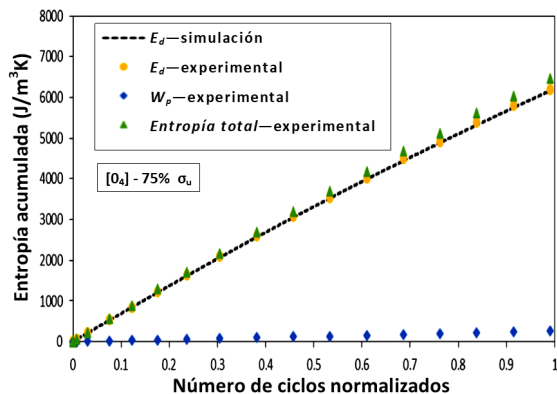


Figura 4. Entropía acumulada total, entropía debida a la energía de daño y entropía debida a la disipación mecánica respecto al número de ciclos normalizados, modificado de Mahmoudi & Mohammadi, 2019.

De lo anterior se puede mencionar lo siguiente: 1) el efecto de la orientación de las capas unidireccionales con respecto a la carga permite tener diferente comportamiento de la entropía debida al daño y a las deformaciones irreversibles; 2) cuanto más se aproxime la orientación de las capas a 0° con respecto a la carga aplicada, mayor será la entropía total acumulada; 3) la simulación realizada del modelo propuesto (Mohammadi & Mahmoudi, 2018) presenta datos que se aproximan a los experimentales, sustentando el desarrollo teórico del método.

El modelo que desarrollaron permite diferenciar entre secuencias de apilado de acuerdo al comportamiento que muestra el material bajo cargas cíclicas comparando los ciclos de vida de cada material de diferentes configuraciones. Observaron que los diferentes gradientes de temperatura en distintas secuencias de apilado son la causa de una vida diferente predicha por el modelo de daño-entropía. Los resultados obtenidos muestran la capacidad del modelo de daño-entropía para considerar la secuencia de apilamiento de los laminados compuestos, sin embargo, los autores consideran que se necesita más investigación y datos experimentales para validar la vida útil prevista del ciclo en diferentes configuraciones de laminados. Además, el modelo presentado por (Mohammadi & Mahmoudi, 2018) es sensible a la frecuencia de carga y a la temperatura ambiente y es aplicable a la predicción de vida en alto y bajo ciclaje.

3. COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS MODELOS

El momento antes de la falla por fatiga del material coincide con el punto en que más entropía se tiene, por lo que se utiliza como criterio de falla para establecer la entropía como indicador de daño y estimar la vida a fatiga del material. En el enfoque

presentado por Naderi & Khonsari, 2011, se basan en un trabajo realizado por Naderi *et al.*, 2010 desarrollado para metales, por lo que las consideraciones tomadas para la estimación de entropía no son las suficientes debido a que el comportamiento a fatiga de materiales compuestos es distinto al que presentan los metales. Más adelante, en el 2013 presentan un modelo (Naderi & Khonsari, 2013) el cual ya contempla el efecto de la interacción de los mecanismos de falla que intervienen en el proceso de degradación de los materiales compuestos cuando se someten a fatiga. Posteriormente Mohammadi & Mahmoudi, 2018, presentan un modelo teórico en el cual se agrega el efecto de las fuerzas térmicas y variables de daño que intervienen en el material mediante un método basado en CDM.

La principal diferencia entre los enfoques presentados es que el modelo propuesto por Naderi & Khonsari, 2013, es experimental y el modelo propuesto por Mohammadi & Mahmoudi, 2018, es mayormente teórico, a pesar de que se estudian configuraciones distintas en cada método, se observa que mantienen un principio de estimación similar. En sí, la diferencia radica en cómo se establece la variable interna de daño a la cual se le atribuye la producción de la entropía de daño debida al efecto de la interacción de los mecanismos de falla. Naderi & Khonsari, se basan en la relación (5) para calcular la energía de daño (E_d) mediante el despeje de dicha relación ya que los otros términos se pueden calcular de manera experimental.

$$H = E_{tc} + E_{diss} + E_d \quad (5)$$

Donde H es la energía de histéresis, E_{tc} es la energía asociada con la capacidad térmica del material y E_{diss} es la energía disipada mediante conducción, convección y radiación. Por otra parte, Mohammadi & Mahmoudi describen la energía de daño ($\dot{E}_d$) mediante la relación (6) la cual considera una variable de daño propuesta a partir de un modelo basado en CDM (Mohammadi *et al.*, 2017) y el efecto de las fuerzas termodinámicas asociadas con esta variable de daño.

$$\dot{E}_d = Y\dot{\omega} \quad (6)$$

Donde $\dot{\omega}$ es el parámetro de daño de la fibra y matriz del material compuesto y Y representa las fuerzas termodinámicas asociadas al parámetro de daño. De esta manera, el modelo propuesto por Mohammadi & Mahmoudi establece una metodología teórica que permite estimar la entropía en los materiales compuestos sin una dependencia puramente experimental.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron dos principios planteados para la estimación de vida basándose en la producción de entropía como un indicador de daño, a pesar de que los modelos parten de un desarrollo teórico - experimental, están encaminados a planteamientos puramente teóricos para el desarrollo de modelos de estimación de vida con calibración experimental. Esto representa una ventaja debido a que la base teórica ayuda a plantear modelos de comportamiento de materiales para observar la evolución de sus propiedades mediante principios energéticos.

Para el método experimental (Naderi & Khonsari, 2013) se necesitan cuatro variables principales: 1) la energía de histéresis la cual depende de los esfuerzos y deformaciones en el material, 2) la energía asociada con la capacidad térmica del material, 3) la energía disipada mediante conducción convección y radiación y 4) la temperatura de la capa superficial del material.

Para el método teórico (Mohammadi & Mahmoudi, 2018) se necesitan tres variables principales: 1) la relación de disipación de energía mecánica por medio de las deformaciones irreversibles, la cual está en función de los esfuerzos y deformaciones en el material; 2) la energía de daño que depende de un parámetro de daño y fuerzas termodinámicas asociadas al material compuesto, este parámetro de daño se obtiene a partir de un modelo CDM (Mohammadi *et al.*, 2017); 3) la temperatura de la capa superficial del material.

En los resultados presentados por los autores se puede destacar la importancia del criterio de falla basado en la entropía generada el cual sustenta la aplicación de la entropía como indicador de daño, además las variables observadas por los autores; orientación de las fibras respecto a la carga aplicada, nivel de carga, frecuencia, temperatura ambiente y secuencia de apilado, las cuales intervienen en la producción de entropía en el material. También se menciona la necesidad de estudiar diferentes configuraciones de materiales para establecer modelos capaces adaptarse y englobar la estimación de vida en laminados compuestos para diferentes configuraciones. Se puede considerar que el desarrollo de modelos de estimación está encaminado a la implementación de métodos teóricos con calibración experimental.

AGRADECIMIENTOS.

Oscar Fernando Oliveros Riego desea reconocer y agradecer el apoyo del CONACYT por la beca No. 887002 otorgada para la realización de sus estudios doctorales.

REFERENCIAS

- Aghazadeh Mohandesi, J., & Majidi, B. (2009). Fatigue damage accumulation in carbon/epoxy laminated composites. *Materials and Design*, 30(6), 1950–1956. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.012>
- Basaran, C., Nie, S., Gomez, J., Gunel, E., Li, S., Lin, M., Tang, H., & Yan, C. (2014). Handbook of Damage Mechanics. In *Handbook of Damage Mechanics*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8968-9>
- Emery, T. R., & Dulieu-Barton, J. M. (2010). Thermoelastic Stress Analysis of damage mechanisms in composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(12), 1729–1742. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.08.015>
- Fargione, G., Geraci, A., La Rosa, G., & Risitano, A. (2002). Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method. *International Journal of Fatigue*, 24(1), 11–19. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00107-4](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00107-4)
- Giancane, S., Panella, F. W., & Dattoma, V. (2010). Characterization of fatigue damage in long fiber epoxy composite laminates. *International Journal of Fatigue*, 32(1), 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.02.024>
- Goidescu, C., Welemene, H., Garnier, C., Fazzini, M., Brault, R., Péronnet, E., & Mistou, S. (2013). Damage investigation in CFRP composites using full-field measurement techniques: Combination of digital image stereo-correlation, infrared thermography and X-ray tomography. *Composites Part B: Engineering*, 48, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.11.016>
- Harizi, W., Chaki, S., Bourse, G., & Ourak, M. (2014). Mechanical damage assessment of Glass Fiber-Reinforced Polymer composites using passive infrared thermography. *Composites Part B: Engineering*, 59, 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.11.021>
- La Rosa, G., & Risitano, A. (2000). Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *International Journal of Fatigue*, 22(1), 65–73. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00088-2](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00088-2)
- Lemaitre, J.; C. J.-L. (1990). *Mechanics of solid materials* (1st ed.). Cambridge University Press.
- Lisle, T., Bouvet, C., Pastor, M. L., Margueres, P., & Prieto Corral, R. (2013). Damage analysis and fracture toughness evaluation in a thin woven composite laminate under static tension using infrared thermography. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 53, 75–87. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.06.004>
- Mahmoudi, A., & Mohammadi, B. (2019). On the evaluation of damage-entropy model in cross-ply laminated composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 219(August), 106626. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106626>
- Maquin, F., & Pierron, F. (2009). Heat dissipation measurements in low stress cyclic loading of metallic materials: From internal friction to micro-plasticity. *Mechanics of Materials*, 41(8), 928–942. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.03.003>
- Mohammadi, B., Fazlali, B., & Salimi-Majd, D. (2017). Development of a continuum damage model for fatigue life prediction of laminated composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 93, 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.11.021>
- Mohammadi, B., & Mahmoudi, A. (2018). Developing a new model to predict the fatigue life of cross-ply laminates using coupled CDM-entropy generation approach. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 95, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.02.012>
- Montesano, J., Fawaz, Z., & Bougherara, H. (2013). Use of infrared thermography to investigate the fatigue behavior of a carbon fiber reinforced polymer composite. *Composite Structures*, 97, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.046>
- Naderi, M., Amiri, M., & Khonsari, M. M. (2010). On the

- thermodynamic entropy of fatigue fracture. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2114), 423–438.
<https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0348>
- Naderi, M., & Khonsari, M. M. (2011). A comprehensive fatigue failure criterion based on thermodynamic approach. *Journal of Composite Materials*, 46(4), 437–447. <https://doi.org/10.1177/0021998311419540>
- Naderi, M., & Khonsari, M. M. (2012). Thermodynamic analysis of fatigue failure in a composite laminate. *Mechanics of Materials*, 46, 113–122.
<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2011.12.003>
- Naderi, M., & Khonsari, M. M. (2013). On the role of damage energy in the fatigue degradation characterization of a composite laminate. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 528–537.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.028>
- Oliveros, F., Alcudia Zacarías, E., Vizcarra González, B., Navarro Torres, J., Juárez Chávez, J. Y., Abúndez-Pliego, A., & Mayen, J. (2019). La termografía infrarroja como método para la estimación de la acumulación de daño en materiales compuestos laminados. *Xxv Congreso Internacional Anual De La Somim*, 255–231.
- Shiri, S., Yazdani, M., & Pourgol-Mohammad, M. (2015). A fatigue damage accumulation model based on stiffness degradation of composite materials. *Materials and Design*, 88, 1290–1295.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.114>
- Steinberger, R., Valadas Leitão, T. I., Ladstätter, E., Pinter, G., Billinger, W., & Lang, R. W. (2006). Infrared thermographic techniques for non-destructive damage characterization of carbon fibre reinforced polymers during tensile fatigue testing. *International Journal of Fatigue*, 28(10 SPEC. ISS.), 1340–1347.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.02.036>
- Talreja, R. (1985). A Continuum Mechanics Characterization of Damage in Composite Materials. *Proceedings of The Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 399(1817), 195–216.
<https://doi.org/10.1098/rspa.1985.0055>
- Wang, Z., Tian, G. Y., Meo, M., & Ciampa, F. (2018). Image processing based quantitative damage evaluation in composites with long pulse thermography. *NDT and E International*, 99(June), 93–104.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.07.004>
- Wei, B. S., Johnson, S., & Haj-Ali, R. (2010). A stochastic fatigue damage method for composite materials based on Markov chains and infrared thermography. *International Journal of Fatigue*, 32(2), 350–360.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.07.010>
- Whitworth, M. A. (1990). Cumulative damage in composites. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 112(3), 358–361.
<https://doi.org/10.1115/1.2903338>

Modelos y enfoques para la estimación de la pseudo ductilidad en laminados híbridos UD vidrio/carbono

Kevin R. Miranda-Acatitlan*. Arturo Abúndez-Pliego*

*Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Prolongación Palmira Esq. Apatzingán S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, CP 62480, México; (m20ce006@cenidet.tecnm.mx, arturo.ap@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: Los compuestos de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) se caracterizan por poseer excelentes propiedades específicas como alta resistencia y rigidez, por lo que son muy utilizados en la industria; sin embargo, se caracterizan por exhibir una falla frágil que ocurre sin previo aviso o daño visible, lo que ocasiona que se tenga que usar altos factores de seguridad respecto a materiales dúctiles que limitan su potencial. Una de las soluciones más prometedoras es introducir ductilidad similar a la respuesta esfuerzo-deformación que presentan los metales a través de la hibridación, principalmente con el uso de laminados vidrio/carbono unidireccionales (UD). Es posible lograr una falla progresiva a través del control de los mecanismos de daño, obteniendo una respuesta no lineal consiguiendo así una falla pseudo dúctil. En este trabajo se presenta una descripción y comparación en los enfoques de los modelos disponibles para estimar la pseudo ductilidad, dichos modelos resultan en excelentes herramientas tanto para el diseño de laminados pseudo dúctiles como para realizar estudios paramétricos en la estimación de la respuesta esfuerzo-deformación pseudo dúctil.

Palabras clave: Materiales compuestos, pseudo ductilidad, capa fina, CFRP, Modelado.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos reforzados con fibra de carbono poseen una alta rigidez y resistencia, sin embargo, se caracterizan por poseer una falla frágil repentina que genera una respuesta lineal-elástica hasta la falla, por lo tanto, se implementan factores de seguridad sobredimensionados en comparación a los utilizados en materiales dúctiles. Es por eso que se busca introducir ductilidad para obtener una respuesta esfuerzo-deformación similar a la que presentan los metales dúctiles.

Se han estudiado distintos enfoques para introducir ductilidad, como disposición de las capas en los laminados (Wu *et al.*, 2020), o distintos tipos de refuerzos como: fibras metálicas (Keller *et al.*, 2021), distintos tipos de matriz (Pozegic *et al.*, 2020) e híbridos metálicos (Ho and Yanagimoto, 2018), u otros tipos de arreglos como compuestos CFRP bidireccionales (Gautam *et al.*, 2020).

En particular, en el trabajo de Masania (Masania *et al.*, 2015) se buscó aumentar la ductilidad enfocándose en la no linealidad de la respuesta esfuerzo-deformación. Se demostró que, en laminados CFRP con orificio abierto si se reemplazan las capas externas por capas de acero y reorientándolas a 90° con una configuración [90/45/0/-45]_s, se mejoró la resistencia del laminado en comparación con el laminado sin orificio para aplicación en piezas compuestas con orificios y juntas atornilladas.

La hibridación de laminados ha demostrado ser uno de los métodos más prometedores para introducir ductilidad en los materiales compuestos laminados y evitar una falla catastrófica.

En investigaciones como la de Kretsis (Kretsis, 1987) se demostró que, si la capa baja elongación en un híbrido vidrio/carbono es lo suficientemente fina, se suprime la propagación de delaminación catastrófica alrededor de la capa durante su primer evento de falla y se permite que desarrolle más grietas.

En otros trabajos como los de Aveston (Aveston and Kelly, 1973, 1980) se observó que, mientras más alta sea la proporción de la relación de volumen de las capas de baja elongación (BE): alta elongación (AE), se provocará una falla prematura de la capa y, mientras más baja sea se obtendrán múltiples grietas a lo largo de la capa, lo que se conoce como fractura múltiple o fragmentación. Además, establecieron un valor de proporción crítica de la relación de volumen para evitar la falla prematura del laminado después de la falla de la capa BE.

Sin embargo, Czél & Wisnom (Czél & Wisnom, 2013) y Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2014) demostraron a través del análisis de laminados con la misma relación de espesor pero diferentes espesores de capa, que no es posible lograr la fragmentación en capas BE robustas, incluso si el valor es inferior al valor de proporción crítico de Aveston (Aveston and Kelly, 1980). Además, es posible suprimir la propagación de delaminación catastrófica después de la primera falla en la capa BE.

El objetivo más alcanzable con los materiales disponibles actualmente es la pseudo ductilidad, en la que la no linealidad se consigue a través del daño sucesivo, permitiendo así una redistribución de concentración de esfuerzos más uniforme durante el proceso de falla, permitiendo que el material sea más tolerante al daño, sin embargo, hay muchos casos que esto conlleva una caída de carga durante la curva del módulo inicial durante las pruebas a tensión.

En el programa de investigación HiPerDuCT se abordó la pseudo ductilidad mediante el desarrollo de nuevos materiales y arquitecturas con una mayor falla gradual. Partiendo del trabajo inicial de Czél (Czél and Wisnom, 2013), se demostró que se puede obtener una falla gradual si se tiene un control sobre los mecanismos de daño. Además, se propuso la deformación pseudo dúctil como medida clave para evaluar el progreso, definida como la diferencia entre la deformación final de falla, y la deformación elástica al mismo esfuerzo basado en el módulo inicial.

En el modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2015) se establecieron niveles de esfuerzo necesarios para que se inicien y propaguen estos modos de daño, concordando con el trabajo de O'Brien (O'Brien, 1985) en que los esfuerzos requeridos son inversamente proporcionales al grosor de la capa. En trabajos posteriores, Czél & Wisnom (Czél and Wisnom, 2013) y Czél (Czél *et al.*, 2015) demostraron que se puede lograr un comportamiento pseudo dúctil estable utilizando una capa BE fina en una configuración $[G_n/C_m/G_n]$ donde G , C son las capas de vidrio y carbono respectivamente, n y m son el número de capas de cada una.

El uso de una capa BE fina puede suprimir eficazmente las delaminaciones que normalmente se producen durante el proceso de falla en laminados híbridos, al igual que reportan los trabajos de Galos (Galos, 2020), Swolfs (Swolfs *et al.*, 2015) y Wisnom (Wisnom, 2016). Logrando así una falla gradual de las capas BE mediante la fragmentación.

En los trabajos de Fuller y Wisnom (Fuller & Wisnom, 2015) y Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2015) se demostró que, introduciendo reorientación de capas mediante capas angulares $\pm\theta$ en secuencia de apilado $[\pm\theta_m/0_n]_s$, se obtienen fallas por deformación significativamente más altas que en los laminados híbridos UD. Además, en el trabajo de Fuller (Fuller *et al.*, 2014) se resalta que el uso de capas BE finas orientadas a 0° permite un control más preciso del proceso de falla.

En los trabajos de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2015) y Wisnom (Wisnom, 2016) se concluye que hay tres mecanismos fundamentales para obtener pseudo ductilidad en cargas a tensión: a) la reorientación de las fibras, b) la hibridación y c) el deslizamiento interfacial. Además, el comportamiento esfuerzo-deformación depende de las propiedades de cada material, el espesor absoluto de las capas BE y la relación de espesor BE:AE. El ajuste de estos parámetros produce una respuesta de esfuerzo-deformación no lineal que no sería posible sin la hibridación.

En este trabajo se presenta una breve descripción y comparación de los modelos disponibles para estimar la respuesta esfuerzo-deformación en laminados híbridos UD sometidos a pruebas a tensión. Se utilizan laminados vidrio/carbono en las validaciones ya que estos materiales son utilizados en una caracterización previa de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2013). Es importante resaltar las características de los modelos ya que resultan en excelentes herramientas tanto para diseño de laminados pseudo dúctiles como para estudios paramétricos de los materiales utilizados.

2. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE PSEUDO DUCTILIDAD EN LAMINADOS HÍBRIDOS UD

Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2014) presentaron un enfoque numérico de elemento finito que simula el comportamiento de las capas BE y AE durante el proceso de falla. Considera principalmente los procesos de daño de laminados híbridos UD vidrio/carbono.

En la Figura 1 se muestra un esquema del modelo que se realiza por análisis de elementos finitos en 2-D con propiedades lineales-elásticas; Se considera solo la mitad de la cara transversal del laminado debido a la simetría alrededor del plano medio. Esta condición es válida debido a que la fragmentación y la propagación de la delaminación en la capa BE se produce en torno al plano medio, además se utiliza una capa de elementos cohesivos para captar adecuadamente la interacción de los modos de daño de la capa BE y la interfaz BE/AE.

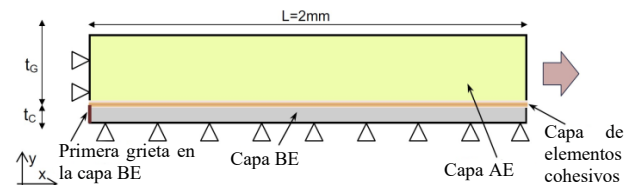


Figura 1.- Esquema del análisis de daños locales para el estudio de la delaminación y la falla de la capa AE (Jalalvand *et al.*, 2014).

Se consideran dos principales modos de daño, fragmentación de la capa BE y delaminación de la interfaz entre capas. Además, se utiliza el criterio de modo II puro de Camanho (Camanho *et al.*, 2003) para describir la delaminación en la interfaz AE/BE.

Se presentan dos metodologías: a) la primera es un análisis del daño local que permite investigar la concentración de esfuerzos en la capa AE alrededor de la capa BE fragmentada; b) en la segunda se realiza un análisis de todo el proceso de falla, superando las deficiencias del enfoque anterior y capturando mejor las grietas y los modos de daño progresivos. El modelado se valida con los resultados de una caracterización previa realizada por Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2013). El modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2015) plantea un enfoque analítico mediante el cual se consideran todos los modos de daño exhibidos por los laminados en la caracterización de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2013) durante el proceso de falla.

Se establecieron tres principales modos de daño: primera falla de la capa BE: i) fragmentación/fractura múltiple de la capa BE, ii) delaminación y iii) fallo de la capa AE. Además, se consideraron criterios y el esfuerzo requerido para cada modo de daño, en los que, el orden de la sucesión de los modos de daño depende del nivel del esfuerzo requerido de cada uno. Los esfuerzos requeridos se definen como: esfuerzo de fragmentación de la capa BE ($\sigma_{@LF}$), esfuerzo de delaminación ($\sigma_{@del}$) y falla de la capa de AE ($\sigma_{@HF}$).

En la Figura 2 se muestra un esquema de la secuencia de los modos de daño, el cual permite ilustrar el comportamiento del laminado durante el procesamiento de falla. Una vez encontrado el orden de los esfuerzos de falla, se puede trazar la respuesta esfuerzo-deformación con los puntos característicos y conectándolos por líneas rectas desde el origen hasta el modo de daño donde falla el material AE.

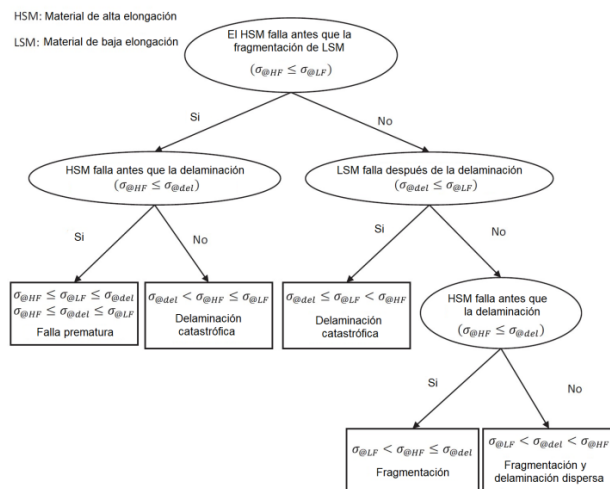


Figura 2.- Esquema del procedimiento del proceso de daño del híbrido basado en el orden de los esfuerzos requeridos para cada modo de daño (Jalalvand et al., 2015).

El modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2016) aborda un enfoque analítico y combina el modelo de Fuller & Wisnom (Fuller and Wisnom, 2015) con los criterios de los modos de daño en los laminados híbridos UD. Cabe resaltar que es una extensión del modelo de Fuller & Wisnom (Fuller and Wisnom, 2015) y se alimenta directamente de sus resultados. Se utiliza una secuencia de apilado $[\pm \theta_m/0_n]_s$ siendo m y n el número de capas, las capas BE se orientan a 0° y las capas AE a $\pm \theta$.

Se consideran tres modos de daño: fragmentación de las capas BE, delaminación de la interfaz BE/AE, y falla de las capas AE. Se asume que, durante el proceso de falla la respuesta esfuerzo-deformación del laminado es lineal-elástica en la dirección de la fibra. Primero se calcula el punto en el que ocurre la primera fractura en la capa BE y posteriormente el comportamiento del laminado, dependiendo de las resistencias y el espesor relativo de las capas BE:AE.

Si la resistencia de la capa AE puede soportar la transferencia de carga y redistribución de esfuerzos creado por la falla de la capa BE, el laminado continúa cargándose desarrollando una respuesta no lineal. Sin embargo, si no es lo suficientemente resistente, se produce una falla completa del laminado. Para determinar si la capa BE puede fragmentarse se usa un modelo de celda unitaria, como se muestra en la Figura 3. Se calcula el esfuerzo en las capas AE en el punto de fractura y después se compara con la resistencia de la configuración utilizada, establecida con el trabajo de Fuller & Wisnom (Fuller & Wisnom, 2015).

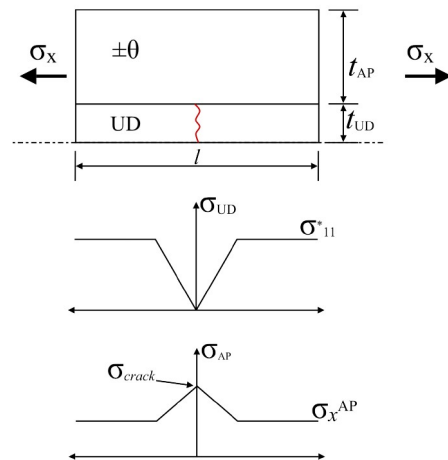


Figura 3.- Esquema del modelo de celda unitaria, con una sola fractura en las capas BE a 0° (Jalalvand et al., 2016).

Durante la fragmentación de la capa BE ocurre una delaminación en la interfaz entre capas BE/AE. Puede ocurrir una gran delaminación si el nivel de delaminación es menor o igual a la fragmentación, lo que conlleva a una caída de carga o una falla prematura. Sin embargo, si la delaminación es igual o mayor a la fragmentación, la capa BE puede seguir fragmentándose con zonas de delaminación dispersa alrededor de las grietas.

La falla de las capas AE resulta en la falla completa o final del laminado y puede ocurrir tanto en la fragmentación inicial, como en cualquier punto del desarrollo de la fragmentación hasta el punto de saturación. Durante el proceso de saturación la carga se transfiere de la capa BE a las capas AE, y se considera que el laminado falla cuando el nivel de tensión sobrepasa el nivel de resistencia de las capas AE.

3. ENFOQUES DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN PARA ESTIMAR LA PSEUDO DUCTILIDAD

Los enfoques abordados por los modelos y las variables que consideran pueden ser utilizados como herramientas de diseño y estudios de investigación sobre las propiedades de los materiales.

El modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2014) aborda principalmente un enfoque numérico por análisis de elementos finito, permite trabajar con el espesor relativo de las capas, en

cual, mediante 2 metodologías, puede examinar la interacción de la delaminación entre capa BE:AE. Sin embargo, sus limitaciones son que el análisis de la segunda metodología se detiene en la primera fractura de la capa AE, por lo cual, no es posible obtener un porcentaje fijo de pseudo ductilidad como tal, además de que el análisis lleva mucho más tiempo respecto a los demás modelos mencionados.

El modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2015) aborda un enfoque analítico en el que establece los escenarios de daño que ocurrirán durante el proceso de falla y definiendo un valor de esfuerzo requerido correspondiente a cada modo de daño. Tiene un tiempo de solución más rápido que el modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2014), dado que no hay ningún preprocesamiento para la preparación del modelo. Sin embargo, tanto el modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2014) como el de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2015) permiten estimar la respuesta de un laminado híbrido UD en distintas secuencias de apilado, por lo cual son una excelente herramienta para explorar secuencias de apilado óptimas para una selección de materiales particulares.

El modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2016) combina el modelo de Fuller & Wisnom (Fuller and Wisnom, 2015) con la metodología tomada por Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2015), el modelo resultante permite estimar una respuesta completa esfuerzo-deformación que presenta pseudo ductilidad. Las variables con las que permite trabajar son el ángulo de las capas $\pm\theta$ y el espesor de las capas tanto relativo como absoluto; esto permite un análisis más profundo para un laminado UD con materiales específicos. Sin embargo, su principal limitación es que solo se puede utilizar para una secuencia de apilado en particular $[\pm\theta_m/0_n]_s$.

4. COMPARACIÓN ENTRE ESTIMACIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los materiales utilizados son capas de carbono pre-impregnadas TR30 SkyFlex USN020A para las capas BE con algunos cambios en el tipo de matriz utilizada, para la capa AE, el modelo de (Jalalvand *et al.*, 2014) usa capas vidrio-E/Hexcel 913, en el modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2015) se usan capas vidrio-S con resina 913 y el modelo de Fuller & Wisnom (Fuller and Wisnom, 2015) utiliza capas de vidrio estándar.

Los trabajos de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2014) y Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2015) presentan una serie de resultados con distintas secuencias de apilado que permite una comparación directa de resultados entre modelos. En la Figura 4 se presentan las curvas de esfuerzo-deformación en el que se puede observar que si bien ambos modelos muestran una buena estimación de la curva inicial de los laminados, el modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2014) muestra una mayor correlación en la curva del módulo inicial, mientras que el modelo de (Jalalvand *et al.*, 2015) estima la falla final del laminado.

Se muestra una gran diferencia entre resultados en el laminado $[G_2/C/G_2]$, esto se debe a la variación de la fragmentación en la capa de carbono. El modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2015)

en comparación logra una representación de la meseta de esfuerzos como se muestra en las gráficas A1 y A2 de la Figura 4; por lo tanto, el modelo puede representar la saturación de fragmentación que exhibe la capa carbono, resultando en una mejora significativa tanto en términos de pseudo ductilidad como en resultados, ya que permite estimar un valor de la deformación pseudo dúctil en comparación con el modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2014).

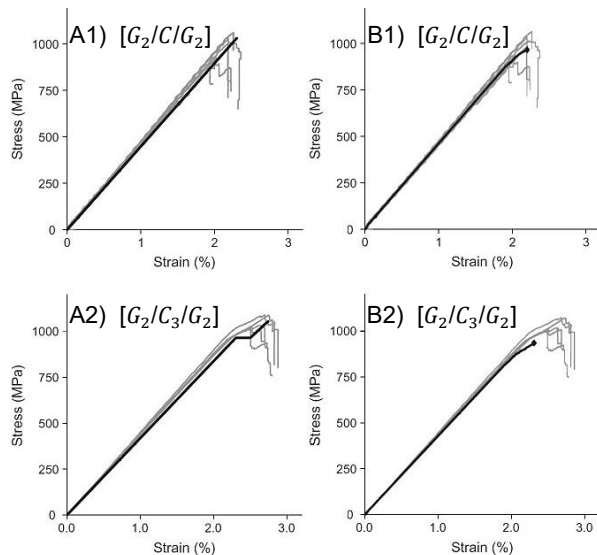


Figura 4.-Comparación de resultados experimentales (línea gris) y estimaciones (línea negra) de los modelos, siendo A1) y A2) resultados del modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2015), B1) y B2) resultados del modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2014).

Los resultados del modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2016) presentan estimaciones muy acordes con los resultados experimentales. En la Tabla 1 se muestran dos estimaciones con configuraciones $[\pm 26_4/0]_s$ y $[\pm 26_5/0]_s$ que consideran una relación de espesor relativo 1:8 y 1:10 respectivamente.

Tabla 1.- Valores medios estimados de esfuerzo último, σ_x^* ; esfuerzo de fragmentación, σ_{frag} ; ϵ_x^* y deformación pseudo dúctil, ϵ_d . 'E' y 'M' corresponden a los resultados experimentales y del modelo, respectivamente. E^t indica que los valores medios considerando los descartes en las probetas $[\pm 26_4/0]_s$. El coeficiente de variación (CV) aparece entre paréntesis (Jalalvand *et al.*, 2016).

	$[\pm 26_4/0]_s$ (1:8)			$[\pm 26_5/0]_s$ (1:10)	
	E	E^t	M	E	M
σ_x^* MPa	756 (3.2%)	773 (2.8%)	781	801 (6.9%)	799
σ_{frag} MPa	701 (5.2%)	685 (2.9%)	708	692 (1.6%)	676
ϵ_x^* MPa	3.00 (27.2%)	3.88 (5.3%)	3.87	4.20 (5.8%)	3.87
ϵ_d MPa	1.3 (66%)	2.20 (7.3%)	2.01	2.2 (7.4%)	1.91

En los resultados en las probetas $[\pm 26_4/0]_S$ mostraron que tres de éstas fallaron prematuramente como se observa en la Figura 5. Se encontró que se debió a una gran delaminación en la interfaz $0/26^\circ$, la cual causó una falla prematura de la capa AE; sin embargo, esto concuerda con las observaciones de Czél (Czél and Wisnom, 2013), permitiendo descartar estos resultados y obteniendo que la diferencia entre resultados para las dos probetas restantes no es muy grande: 55 MPa para el experimental y una diferencia predicha de 73 MPa. Esto resulta en una media de $\epsilon_d=2:20\%$ (CV=7,3%) y $\epsilon_x^*=3:88\%$ (CV=5,3%), los cuales se acercan mucho más a los resultados experimentales.

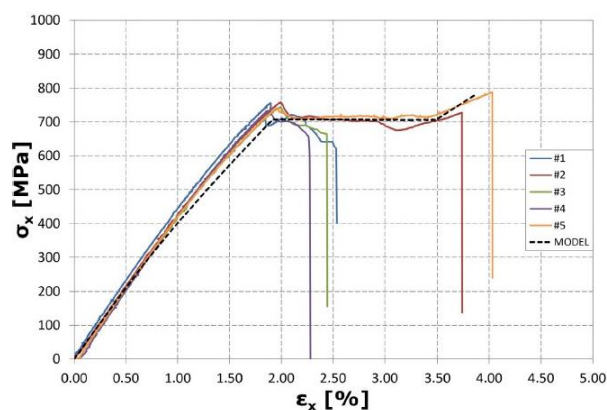


Figura 5.- Resultados experimentales para el laminado $[\pm 26_4/0]_S$, trazados con la predicción analítica inicial (línea de puntos) (Jalalvand *et al.*, 2016).

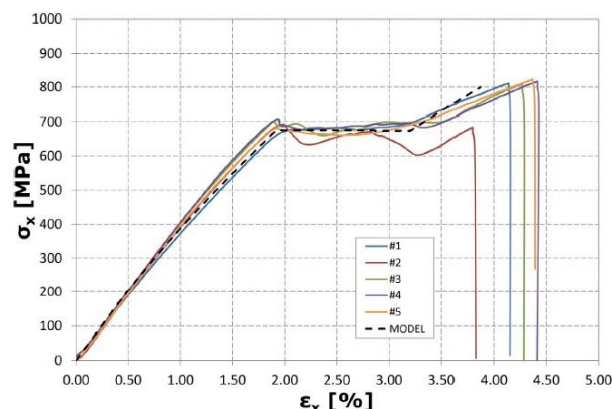


Figura 6.- Resultados experimentales para el laminado $[\pm 26_5/0]_S$, trazados con la predicción analítica inicial (línea de puntos) (Jalalvand *et al.*, 2016).

En cuanto a las probetas $[\pm 26_5/0]_S$, se muestra un resultado mucho más consistente. Cuatro de las cinco probetas mostraron una meseta de esfuerzo y una parte de recarga del laminado hasta la falla completa como se muestra en la Figura 6.

Solo una probeta no mostró una meseta de esfuerzo constante (nº2, línea roja en la Figura 6), en la que sigue una trayectoria ondulada tras la fragmentación inicial de la capa BE. Esto puede deberse a dos problemas, la fabricación del laminado o defectos en los materiales utilizados. Si se trata como anómalo y se descarta, las medias σ_x^* y ϵ_x^* que aparecen en la Tabla 1 aumentan a 826 MPa (CV = 1.14%) y 4.31% (CV = 2,84%) respectivamente.

5. CONCLUSIONES

Los modelos de estimación de pseudo ductilidad muestran enfoques prometedores para introducir pseudo ductilidad en los laminados híbridos, los más utilizados son los laminados vidrio/carbono UD, a partir de los cuales se formulan los modelos descritos.

Cabe destacar que, si bien el modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2014) puede estimar una respuesta acorde durante la curva inicial esfuerzo-deformación, tiene como principal objetivo modelar los posibles modos de daño en el laminado, por lo cual no aporta un valor definido de pseudo ductilidad. Sin embargo, permite realizar un estudio de la variación de los modos de daño con respecto a los espesores relativos de las capas BE:AE permitiendo distinguir la dependencia del proceso de daño de la geometría del laminado.

El modelo Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2015) con un enfoque analítico es capaz de predecir respuestas esfuerzo-deformación muy acordes con los resultados experimentales. Se logró una deformación pseudo dúctil del 1,0% con un límite de elasticidad de 1130 MPa para un laminado $[SG/C_2/SG]$. Exhibiendo fragmentación y delaminación dispersas a lo largo de la probeta sin caída de carga antes de la falla final. Esta respuesta de la tensión es un ejemplo exitoso de pseudo ductilidad de alto desempeño.

Con el modelo de Jalalvand (Jalalvand *et al.*, 2016) se obtuvo una pseudo ductilidad de hasta el 2.2%, demostrando que con un enfoque analítico y combinando la reorientación de capas AE y la fragmentación de las capas BE mediante secuencias de apilado $[\pm \theta_m/0_n]_S$ se pueden conseguir respuestas de esfuerzo-deformación de alto desempeño, similares a las de los metales.

Finalmente, los distintos enfoques presentados por los modelos permiten resaltar cuál de ellos sería una excelente herramienta para un trabajo de investigación, tanto si esta orientado al diseño como a un estudio paramétrico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias al apoyo del CONACYT a través de la beca número 1030089 para estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica.

REFERENCIAS

Aveston, J. and Kelly, A. (1973) 'Theory of multiple fracture of fibrous composites', *Journal of Materials Science*, 8(3), pp. 352–362. doi: 10.1007/BF00550155.

- Aveston, J. and Kelly, A. (1980) 'Tensile first cracking strain and strength of hybrid composites and laminates'. doi: 10.1098/rsta.1980.0061.
- Czél, G., Jalalvand, M. and Wisnom, M. R. (2015) 'Demonstration of pseudo-ductility in unidirectional hybrid composites made of discontinuous carbon/epoxy and continuous glass/epoxy plies', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.01.019.
- Czél, G. and Wisnom, M. R. (2013) 'Demonstration of pseudo-ductility in high performance glass/epoxy composites by hybridisation with thin-ply carbon prepreg', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 52, pp. 23–30. doi: 10.1016/j.compositesa.2013.04.006.
- Fuller, J. D., Jalalvand, M. and Wisnom, M. R. (2014) 'Pseudo-ductility by fragmentation of central unidirectional plies in thin CFRP angle-ply laminates', *16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014*, (June), pp. 22–26.
- Fuller, J. D., Jalalvand, M. and Wisnom, M. R. (2016) 'Combining fibre rotation and fragmentation to achieve pseudo-ductile CFRP laminates', *Composite Structures*. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.01.073.
- Fuller, J. D. and Wisnom, M. R. (2015a) 'Exploration of the potential for pseudo-ductility in thin ply CFRP angle-ply laminates via an analytical method', *Composites Science and Technology*. Elsevier Ltd, 112, pp. 8–15. doi: 10.1016/j.compscitech.2015.02.019.
- Fuller, J. D. and Wisnom, M. R. (2015b) 'Pseudo-ductility and damage suppression in thin ply CFRP angle-ply laminates', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Elsevier Ltd, 69, pp. 64–71. doi: 10.1016/j.compositesa.2014.11.004.
- Galos, J. (2020) 'Thin-ply composite laminates: a review', *Composite Structures*, 236(January). doi: 10.1016/j.compstruct.2020.111920.
- Gautam, M. *et al.* (2020) 'On the behaviour of flattened tubular Bi-axial and Tri-axial braided composites in tension', *Composite Structures*. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113325.
- Ho, Y. C. and Yanagimoto, J. (2018) 'Effect of unidirectional prepreg size on punching of pseudo-ductile CFRP laminates and CFRP/metal hybrid composites', *Composite Structures*. Elsevier, 186(July 2017), pp. 246–255. doi: 10.1016/j.compstruct.2017.11.042.
- Jalalvand, M., Czél, G. and Wisnom, M. R. (2014) 'Numerical modelling of the damage modes in UD thin carbon/glass hybrid laminates', *Composites Science and Technology*. Elsevier Ltd, 94, pp. 39–47. doi: 10.1016/j.compscitech.2014.01.013.
- Jalalvand, M., Czél, G. and Wisnom, M. R. (2015a) 'Damage analysis of pseudo-ductile thin-ply UD hybrid composites - A new analytical method', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Elsevier Ltd, 69, pp. 83–93. doi: 10.1016/j.compositesa.2014.11.006.
- Keller, A. *et al.* (2021) 'Experimental and numerical investigation of ply size effects of steel foil reinforced composites', *Materials and Design*. Elsevier Ltd, 198, p. 109302. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109302.
- Kretsis, G. (1987) 'A review of the tensile, compressive, flexural and shear properties of hybrid fibre-reinforced plastics', *Composites*, 18(1), pp. 13–23. doi: 10.1016/0010-4361(87)90003-6.
- Masania, K. *et al.* (2015) 'Steel foil reinforced composites: Study of strength, plasticity and ply size effects', *ICCM International Conferences on Composite Materials*, 2015-July(September 2018).
- O'Brien, T. K. (1985) 'Analysis of local delaminations and their influence on composite laminate behavior. In Delamination and debonding of materials', *ASTM International*.
- Pozegic, T. R. *et al.* (2020) 'Pseudo-ductile behaviour in fibre reinforced thermoplastic angle-ply composites', *Composites Science and Technology*. Elsevier Ltd, 197(October 2019), p. 108261. doi: 10.1016/j.compscitech.2020.108261.
- Swolfs, Y. *et al.* (2015) 'Introducing ductility in hybrid carbon fibre/self-reinforced composites through control of the damage mechanisms', *Composite Structures*. Elsevier Ltd, 131, pp. 259–265. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.04.069.
- Wisnom, M. R. (2016) 'Mechanisms to create high performance pseudo-ductile composites', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 139(1). doi: 10.1088/1757-899X/139/1/012010.
- Wu, X., Fuller, J. D. and Wisnom, M. R. (2020) 'Role of fibre fragmentation on pseudo-ductility of thin-ply [$\pm 277/0$]s carbon fibre laminates with high modulus 0° plies under compressive and flexural loading', *Composites Science and Technology*. Elsevier Ltd, 199(April), p. 108377. doi: 10.1016/j.compscitech.2020.108377.

Análisis experimental y numérico del impacto de la turbulencia en el desempeño de micro turbinas de eje horizontal

J.J. Monjardín-Gómez*, R. Gómez-Márquez**, R. Campos-Amezcu***, R. Sánchez-García**

* Instituto de Energías Renovables - Universidad Nacional Autónoma de México. Privada Xochicalco S/N, Temixco, Mor. 62580
(Tel: 6871836283; e-mail: jjmoga@ier.unam.mx).

** Instituto de Ingeniería - Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar S/N, Coyoacán, Ciudad de México, 04510
(e-mail: rgomez@iingen.unam.mx, rsanchezg@iingen.unam.mx)

*** Tecnológico Nacional de México - Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Mor. 62490. (e-mail: rafael.ca@cenidet.tecnm.mx)

Resumen: En la presente investigación se reprodujeron y analizaron diferentes niveles de turbulencia en un túnel de viento de capa límite atmosférica para el estudio de su impacto en la producción de energía eléctrica en micro aerogeneradores. La primera etapa consistió en el análisis experimental contemplando dos aspectos importantes; generación de flujo turbulento a través de una reja pasiva de características geométricas $M = 0.35$ m y $b = 0.05$ m, siendo M el claro entre barras y b el espesor de las barras; y la evaluación del micro aerogenerador de eje horizontal en condiciones de flujo de entrada uniforme (intensidad de turbulencia 1.8%) y flujo de entrada turbulento (intensidades de turbulencia de 6.5, 5.4 y 5%). Se determinó que el flujo turbulento de viento afecta a la producción de energía del aerogenerador en comparación con el viento en condiciones uniformes. La segunda etapa consistió en el análisis de desempeño aerodinámico para la obtención de la curva de potencia basado en las características geométricas del aspa.

Palabras clave: Energía eólica, túnel de viento, flujo turbulento, micro aerogenerador de eje horizontal.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población y las necesidades por acceder a los servicios básicos de energía son algunos de los factores que han influido para el desarrollo de las energías renovables, como la hidráulica, solar y eólica, las cuales son una alternativa para reducir el impacto ambiental ocasionado por el uso desmedido de los combustibles fósiles (Langbeheim & Rez, 2017).

La explotación del recurso eólico a través de grandes turbinas de viento es una industria altamente competitiva a nivel mundial, mientras que los pequeños aerogeneradores son una tecnología emergente que representa una opción asequible para el suministro de energía a hogares interconectados a la red eléctrica (Wood, 2010). Los pequeños y micro aerogeneradores regularmente son instalados en campo abierto o en entornos urbanos donde el rotor experimenta altos niveles de turbulencia ($I_u \geq 18\%$) con cambios en la dirección del viento que modifican la operación de los dispositivos (Anup *et al.*, 2019).

Numerosos estudios han utilizado enfoques experimentales y numéricos para investigar el impacto de la turbulencia en la producción de energía y la dinámica estructural. Lubitz (2014) analizó un aerogenerador de eje horizontal de 1 kW en campo abierto e identificó que la intensidad de la turbulencia a bajas velocidades del viento produce un aumento en la producción de energía, mientras que a altas velocidades del viento, el dispositivo mostró una disminución energética considerable.

Evans *et al.* (2018) analizaron la turbina eólica de eje horizontal Aerogénesis de 5 kW en un entorno semiurbano y mostraron que la producción de energía exhibía una disminución del 20% a intensidades de turbulencia altas. Elizondo *et al.*, (2009) estudiaron el comportamiento de el aerogenerador de eje horizontal Aeroluz de 1.4 kW en campo abierto en condiciones de viento bajo y medio, demostraron que a altas intensidades de turbulencia hay una pérdida significativa de potencia.

Por otro lado, diferentes estudios se han centrado en el análisis del túnel de viento para simular condiciones de turbulencia en condiciones controladas, aplicado a modelos aerodinámicos y estructurales. Molina *et al.* (2018) desarrollaron un análisis paramétrico con diferentes modelos de rejillas para la generación de viento turbulento y la evaluación en el aerogenerador de eje vertical H-Darrius. Chu & Chiang (2014) investigaron los efectos de la turbulencia en la producción de energía de un aerogenerador de eje horizontal e identificaron que la producción de energía es afectada a bajas velocidades de viento, mientras que para altas velocidades su efecto puede despreciarse.

Algunas investigaciones se enfocan en la simulación numérica a través de diferentes softwares como lo son; Pro-Prop, OpenPro, Qblade, donde se busca determinar el desempeño aerodinámico óptimo para modelos de aspas existentes en el mercado de la industria eólica de pequeña capacidad, sin embargo, dichos análisis deben ser validados de forma experimental en túneles de viento o entorno abierto (Van Treuren, 2019).

Tomando en cuenta estudios previos, se observa que el estudio de la turbulencia es fundamental para comprender el funcionamiento y la optimización de los aerogeneradores. La aportación de este trabajo consiste en desarrollar una metodología para cuantificar el impacto de la turbulencia en la producción de energía de un micro aerogenerador de eje horizontal, debido que esto no se considera por la norma internacional de diseño IEC 61400-2. La presente investigación se divide en cinco secciones; en la primera sección se presenta la introducción, en la segunda se describe la configuración experimental (instrumentos y equipos), en la tercera describe la metodología utilizada, en la cuarta se muestra el análisis de resultados y en la quinta se presentan las conclusiones.

2. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

Los experimentos se llevaron a cabo en el túnel de viento de capa límite atmosférica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. El túnel de viento cuenta con una configuración de circuito cerrado, lo que permite tener un control adecuado del flujo del viento. Tiene dos secciones de prueba: la primera sección de 3 x 2 m con una longitud de 20 m, incluye dos mesas giratorias separadas por una distancia de 14 m, y la segunda con una sección transversal de 4.3 m x 4 m, con una longitud de 5 m, ver Figura 1. Un panel honeycomb antes de la contracción permite reducir al mínimo los niveles de turbulencia a la entrada de la sección de pruebas 1. El flujo de aire es acelerado mediante un ventilador axial que impulsa el viento hasta a una velocidad de 80 km/h.

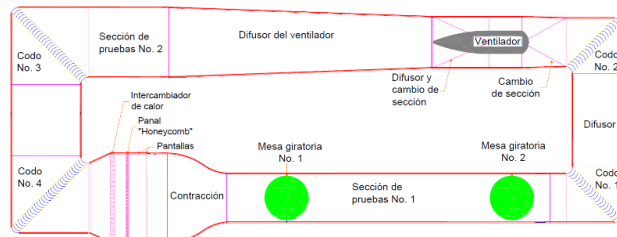


Fig. 1. Túnel de viento de la capa límite atmosférica

El micro aerogenerador utilizado tiene una configuración de eje horizontal con un rotor de tres palas y potencia nominal de 600 W. Las especificaciones técnicas se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del aerogenerador

Especificaciones	Valor
Potencia	600 W
Voltaje de salida	24 V
Velocidad de inicio	2.5 m/s
Velocidad nominal	11 m/s
Rotor diámetro	1.33 m
Velocidad de rotación	500-1000 rpm
Generador	Imanes permanentes

La calibración del túnel de viento se realizó usando un tubo Pitot y las características del flujo de viento se midieron usando un circuito electrónico con un Mini CTA 54T42 en conexión con un módulo portador USB-9162 de alta velocidad que contenía el

registrador de datos NI 9234 y un sensor de hilo caliente modelo 55P61. La adquisición de datos fue a través del software StreamWare de Dantec Dynamics (Jorgensen, 2002).

La instrumentación del aerogenerador para medir la velocidad angular se realizó mediante un tacómetro de efecto Hall y la transmisión de datos vía bluetooth, a una frecuencia de muestreo de 1 Hz durante 60 segundos. La potencia eléctrica de salida se midió en voltaje y corriente a través de un multímetro. Así mismo, se midió directamente la potencia de salida en el inversor, ver la figura 2.

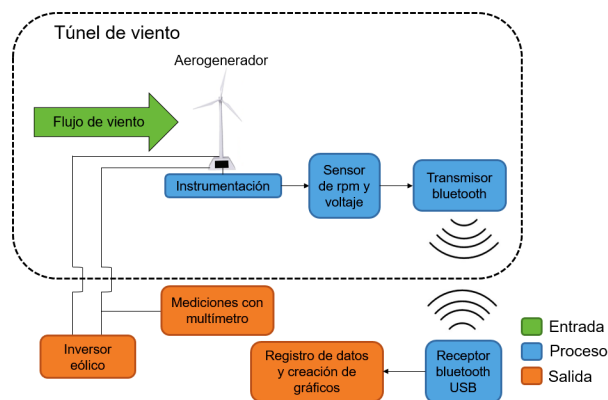


Fig. 2. Configuración experimental del aerogenerador

3. METODOLOGÍA

3.1 Análisis experimental

3.1.1 Análisis de flujo de viento en condiciones uniformes

Para determinar las características de flujo de viento de entrada se realizaron mediciones de viento mediante un anemómetro de hilo caliente montado en una estructura móvil en la posición central en la mesa giratoria 2, ver figura 3b. Un total de nueve alturas fueron evaluadas desde 0.35 m hasta 1.75 m con incrementos de 0.175 m. Se emplearon tres velocidades del ventilador del túnel de viento; 93, 292 y 406 rpm, las cuales generan velocidades de promedio del viento de 3, 11.5 y 16 m/s. La frecuencia de muestreo utilizada fue de 2 kHz para 60 seg.

Posición	Altura (m)
9	1.75
8	1.575
7	1.4
6	1.225
5	1.05
4	0.875
3	0.7
2	0.525
1	0.35



a) Alturas en mesa 2 b) Estructura móvil

Fig. 3. Mediciones de velocidad de viento

3.1.2 Generación de flujo turbulento

El uso de rejillas pasivas es un método simple para generar vórtices de diversos órdenes de magnitud que evolucionan a lo largo de la sección transversal del túnel de viento. Según Vita *et al.* (2018) existen tres parámetros para el diseño de una rejilla pasiva: el espesor de la barra, b , el tamaño de la cuadrícula, M , (medido desde la distancia de las líneas centrales); y la longitud aguas abajo desde la rejilla hasta los puntos de medición, x .

El coeficiente de arrastre, C_D , se origina debido a la caída de presión producida por las barras y está determinado por la relación b/M propuesta por (Laneville, 1973).

$$C_D = \frac{\frac{b}{M} \left(2 - \frac{b}{M}\right)}{\left(1 - \frac{b}{M}\right)^4} \quad (1)$$

Generalmente, se recomiendan valores C_D alrededor de 3 y 4 para un diseño de rejilla adecuado. El coeficiente de arrastre es un parámetro importante que se relaciona con la porosidad, β , dado por la siguiente ecuación:

$$\beta = \left(1 - \frac{b}{M}\right)^2 \quad (2)$$

La porosidad describe el área libre de la sección transversal, la cual se debe de limitar al mínimo para evitar efectos de bloqueo. Las fórmulas anteriormente descritas son una referencia para diseñar rejillas pasivas de barras cuadradas basados en las características del túnel de viento. Una recomendación para la obtención de flujo homogéneo e isotrópico es tomar mediciones a una distancia $x/M > 10$. De acuerdo con (Roach, 1987) describe la intensidad de turbulencia I_u y la longitud de escala integral L_{ux} de forma paramétrica a partir de las siguientes ecuaciones:

$$I_u = 1.13 \left(\frac{x}{b}\right)^{-\frac{5}{7}} \quad (3)$$

$$L_{ux} = 0.20 \cdot b \cdot \left(\frac{x}{b}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

La intensidad de la turbulencia es un parámetro directamente asociado a la variabilidad del viento y se relaciona con el aumento de cargas dinámicas en el rotor, que conducen al deterioro estructural y pueden modificar el desempeño de los aerogeneradores (Manwell, 2010). Por otro lado, la intensidad de turbulencia, I_u a partir de mediciones se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$I_u = \frac{\sigma}{U} \quad (5)$$

donde σ es la desviación estándar y U es la velocidad media del viento en la dirección longitudinal. El parámetro de longitud de escala integral representa el tamaño de los remolinos turbulentos en el flujo medio. El L_{ux} se obtiene mediante la función de autocorrelación, ecuación (6) la cual es normalizada dividida

entre la varianza, ecuación (7); y finalmente, multiplicada por la velocidad media, ecuación (8).

$$R_{uu}(\tau) = \overline{u(t) + u(t + \tau)} \quad (6)$$

$$\rho(\tau) = \frac{R_{uu}}{u^2} \quad (7)$$

$$L_{ux} = U \int_0^{t_0} \rho(\tau) d\tau \quad (8)$$

Los aerogeneradores en entornos complejos experimentan un flujo de viento variable con I_u entre 2 - 30% y L_{ux} entre 1 y 4 m. Desafortunadamente, estas escalas, no se pueden simular en túneles de viento mediante el uso de rejillas pasivas. Por lo que se recomienda emplear rejillas activas para lograr generar valores de I_u superiores al 15% (Cekli & Van de Water, 2010).

3.1.3 Evaluación de flujo turbulento

De acuerdo con Vita *et al.* (2018) y en base a las ecuaciones 1-4, se diseñó una rejilla con características geométricas; $b = 0.050$ m y $M = 0.35$ m. Este tipo de rejillas pasivas genera flujos turbulentos de valores moderados de I_u , menores al 10% y $L_{ux} > c$, donde $c = 0.05$ m es la longitud de cuerda del aspa del aerogenerador.

La rejilla pasiva fue instalada en cinco posiciones corriente arriba del centro de la mesa 2 (1D, 2D, 3D, 4D y 5D) basados en el diámetro del rotor de 1.33 m, como se muestra en la figura 4. La finalidad de esta prueba fue evaluar la I_u y la L_{ux} generadas a partir de diferentes distancias de la rejilla para estimar su efecto en la producción de energía del aerogenerador.

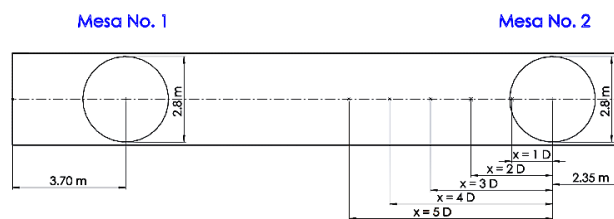


Fig. 4. Mediciones en la distancia x .

3.1.4 Evaluación del aerogenerador

El rotor del aerogenerador fue instalado en la posición central de la mesa 2 a una altura de 1.05 m, posteriormente fue evaluado a velocidades de viento de 5, 7, 9, 11 y 3 m/s para flujo uniforme y turbulento. El desempeño del aerogenerador fue medido a través de la potencia eléctrica de salida obtenida por medio de multímetros y por lecturas del inversor eólico.

El coeficiente de potencia eléctrico C_p fue calculado a través de la fórmula:

$$C_p = \frac{P_{out}}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (9)$$

donde P_{out} es la potencia eléctrica de salida definida por la tensión, V , y la corriente eléctrica, I ; ρ la densidad del aire, A el área y U la velocidad del viento corriente arriba. Otro parámetro importante es la velocidad de punta de aspa λ , que relaciona la velocidad angular del rotor, ω , el radio del rotor, R , y la velocidad del viento U .

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (10)$$

Adicionalmente, se realizó un análisis de varianza ANOVA de dos factores, donde dos tratamientos fueron estudiados; el primero involucra la velocidad de viento e intensidad de turbulencia I_u , mientras que el segundo la velocidad de viento y la longitud de escala integral L_{ux} , así como el efecto en la potencia eléctrica de salida.

El análisis ANOVA consistió en evaluar diferencias entre los valores promedio de potencia eléctrica para cada uno de los tratamientos, así mismo permite determinar la hipótesis nula o la alternativa; la primera establece que los promedios de potencia eléctrica para el caso laminar y turbulento son los mismos, $H_0: \mu_1 = \mu_2$, por lo que no existe influencia de las variables independientes, mientras que la segunda indica diferencias entre los valores promedios para ambos casos $H_A: \mu_1 \neq \mu_2$ y establece una diferencia estadísticamente significativa (Rocha *et al.*, 2018). Para el análisis se tomaron en cuenta un total de 20 mediciones de potencia de eléctrica, 5 referentes para el caso uniforme y 15 para 3 casos con diferentes I_u y L_{ux} generadas a la altura del rotor.

3.2 Análisis numérico

3.2.1 Obtención y generación de la geometría del rotor

Para obtener la geometría del aspa y los diferentes perfiles aerodinámicos que la conforman, se empleó un escáner Quantum FaroArm 3D, 16 secciones transversales fueron trazadas mediante diseño asistido por computadora donde se determinó el ángulo de torcimiento y la longitud de cuerda.

3.2.2 Análisis aerodinámico no viscoso

Para determinar las características aerodinámicas y de operación del aspa se empleó el software Qblade. El proceso se desarrolló en siete etapas: primero se montaron 16 perfiles aerodinámicos obtenidos a través del proceso de escaneo.

El segundo paso consistió en utilizar la herramienta Xfoil para determinar los coeficientes aerodinámicos C_l , C_d , C_m , y C_l/C_d en función del número de Reynolds entre un rango de 7×10^4 a 1.15×10^5 . El número de Reynolds fue determinado por las velocidades de viento U , la longitud de cuerda c del aspa y la viscosidad cinemática ν .

$$Re = \frac{Uc}{\nu} \quad (11)$$

La variación del ángulo de ataque α fue analizada en un rango de -10 a 20° . El tercer paso consistió en la extrapolación de

polares a 360° mediante el método de Montgomery. El cuarto paso fue el diseño del aspa para integrarse al rotor donde se consideró el radio de la raíz $r_{root} = 0.075$ m, longitud de cuerda desde 0.1138 m a 0.0315 m, ángulo de torcimiento variable desde 24.9° a 10.41° de desde la raíz a la hasta la punta.

El quinto paso fue llevar a cabo la simulación BEM del rotor donde se determinaron los rangos de operación en función de la velocidad de punta de aspa λ desde 1 a 10 y con velocidad de viento de arranque de 3 m/s. En sexto paso consistió en la simulación BEM multiparamétrica, donde se definió el rango de velocidad de viento para la operación del aerogenerador en 5 y 13 m/s, con intervalos de velocidad de 1 m/s. El rango de velocidad angular del rotor fue seleccionada de 200 a 1500 rpm, con intervalos de 10 rpm y ángulo de orientación fijo de -1° .

Finalmente, en el séptimo paso se realizó la simulación BEM de la turbina seleccionando el modo de operación del aerogenerador con potencia regular con desprendimiento de flujo, transmisión pre escrita definida por velocidades de rotación de 540 hasta 1420 rpm, velocidades de arranque de 5 m/s y velocidad máxima 13 m/s, ángulo de torcimiento de 2.9° y factor de pérdida de 0.44, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente sección.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Evaluación del flujo de viento

El flujo de viento fue evaluado previo a la instalación del aerogenerador. La figura 5 muestra la evolución del perfil vertical de intensidad de turbulencia obtenido a partir de las diferentes distancias de medición. Se observa que a 1D existen altos gradientes de I_u ocasionado por el desbordamiento de vórtices, a medida que aumenta la distancia los gradientes se reducen considerablemente y a partir de 3D en adelante el flujo modifica su distribución hasta alcanzar un perfil casi recto.

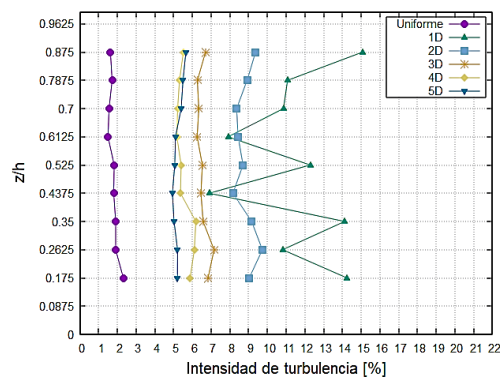


Fig. 5. Perfil de I_u a diferentes distancias

Las mediciones viento fueron realizadas a velocidad de rotación del ventilador de 292 rpm, basados en la velocidad nominal del aerogenerador. La tabla 2 muestra las intensidades de turbulencia I_u obtenidas para los diferentes flujos de viento, las mediciones

fueron tomadas a diferentes distancias de la reja y a la altura de 1.05 m.

$I_{u\text{Uniforme}}$	I_{u1D}	I_{u2D}	I_{u3D}	I_{u4D}	I_{u5D}
1.8%	12.2%	8.7%	6.5%	5.4%	5%

Tabla 2. Características de I_u para diferentes flujos de viento

La longitud de escala integral L_{ux} obtenida a través de las mediciones mostró buena relación en comparación con los valores generados a partir de la fórmula paramétrica (4). Se obtuvieron diámetros de remolinos de 0.07 m hasta 0.12 m para distancias de 1D hasta 5D como se muestra en la figura 6. El tamaño de los remolinos a cortas distancias de la reja es cercano al tamaño del espesor de barra b , mientras que el tamaño de los remolinos en condiciones de flujo uniforme es de 0.01 m, esto es consistente con lo que menciona en la literatura (Davidson, 2015).

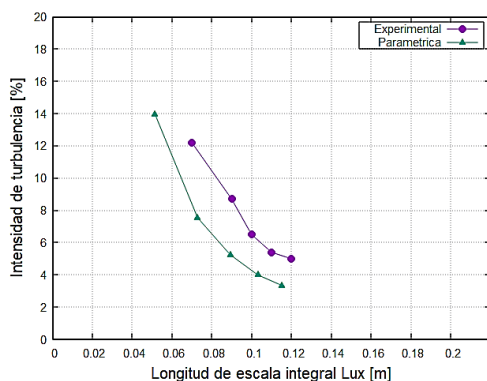


Fig. 6. Longitudes de escala integral a diferentes distancias

4.2 Desempeño del aerogenerador

El desempeño del micro aerogenerador se llevó a cabo en flujo de entrada uniforme y turbulento. Las características inestables de flujo para 1D y 2D no son recomendables para la evaluación de los dispositivos, los altos gradientes de intensidad de turbulencia aumentan las cargas dinámicas y pueden ocasionar fallas en los elementos mecánicos del aerogenerador (Evans *et al.*, 2018), por tal motivo se evaluó el dispositivo a partir de la distancia de 3D, donde las características de turbulencia son estables y se aproximan a un flujo homogéneo e isotrópico, es decir que la turbulencia es normalmente distribuida en cualquier región del espacio (Davidson, 2015).

La figura 7 muestra la curva de potencia del aerogenerador en función de la velocidad del viento, para los dos flujos de viento analizados. En esta figura se observa que para el caso uniforme, el dispositivo produce 13 W a velocidad de viento de 5 m/s, 181 W a 11 m/s y 272 W a 13 m/s; mientras que para el caso turbulento a 3D, se alcanzan valores de 8.9 W, 142 W y 222 W para las mismas condiciones de viento, y para 4D se obtienen

valores de 8.1 W, 140 W y 220W. Por último, a 5D se produjeron 7.2W, 141W y 223W. Por lo que se observa que a la velocidad de arranque, la turbulencia afecta en un 44% la producción de energía, para la velocidad nominal se reduce en 22.65% y para la velocidad máxima la disminución de potencia se ve afectada en 19.11%.

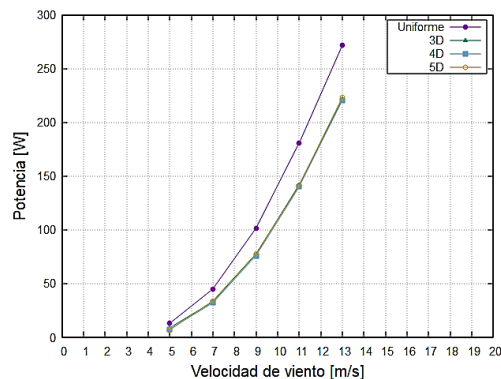


Fig. 7. Curva de potencia para diversos flujos de viento

El mismo comportamiento se observa en el coeficiente de potencia eléctrico, se identificó que la turbulencia afecta la velocidad de rotación y disminuye la velocidad de punta de aspa. El desempeño en condiciones uniformes obtuvo un C_p máximo de 0.16, mientras que para el caso turbulento fue de 0.12. Esto es consistente con los estudios realizados por Lubitz (2014) donde describe que la turbulencia tiene un impacto negativo en los rotores de eje horizontal, ver Figura 8.

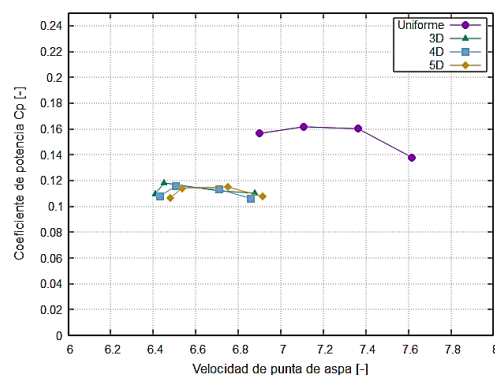


Fig. 8. C_p vs λ para diversos flujo de viento

El análisis ANOVA con valor de $p = 0.016$ en un intervalo de confianza de 95% permitió establecer la hipótesis alterna donde se determinó que la intensidad de turbulencia y la variación de velocidades de viento tiene un efecto estadísticamente significativo para el desempeño del aerogenerador, ver figura 9. La longitud de escala integral L_{ux} no mostró un impacto en la potencia eléctrica, todo parece indicar que la interacción de los remolinos de 0.07 m, 0.09 m, 0.10 m, 0.11 m y 0.12 m a la entrada del rotor no afectaron en la producción de energía.

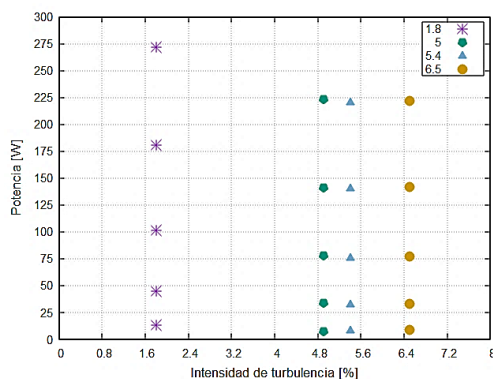


Fig. 9. Dispersión de potencia por niveles

4.3 Simulación numérica

El análisis aerodinámico permitió identificar que el dispositivo no opera en condiciones óptimas, basado en las curvas experimentales se identificó de forma numérica que el aerogenerador opera con 44% de pérdida y un ángulo de torcimiento de 2.9° , mientras que para flujos turbulentos la pérdida aumenta a 54% con un ángulo de torcimiento de 2.5° , es evidente que el desempeño del aerogenerador en flujos turbulentos disminuye en 10% la producción de energía en comparación con el desempeño en flujo uniforme, ver figura 10.

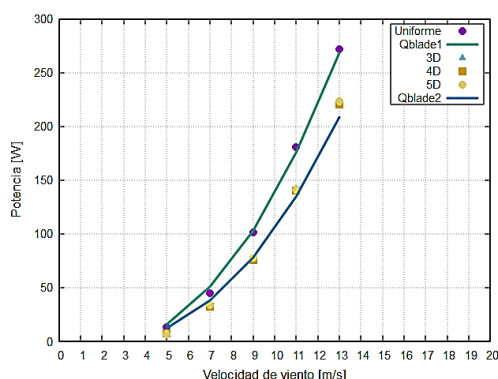


Fig. 10. Curva de potencia numérica - experimental

5. CONCLUSIONES

Los flujos turbulentos evaluados experimentalmente mostraron buena relación en comparación con las formulas paramétricas. El aerogenerador mostró el mejor desempeño en condiciones de flujo de entrada uniforme con un C_p máximo de 0.16, mientras que en condiciones turbulentas el C_p máximo alcanzado fue de 0.12. Los resultados obtenidos demuestran que el flujo turbulento a la entrada del rotor tiene un efecto negativo en el desempeño del micro aerogenerador, los cuales son comunmente instalados en entornos urbanos.

REFERENCIAS

- Anup, K. C., Whale, J., & Urmee, T. (2019). Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review, *Renewable Energy*, 131, pp. 268–283.
- Carbó Molina, A., Bartoli, G. and De Troyer, T. (2018). Generation of uniform turbulence profiles in the wind tunnel for urban VAWT testing, *Green Energy and Technology*. Springer International Publishing.
- Cekli, H. E. and Water, W. Van De (2010). Tailoring turbulence with an active grid, *Experiments in Fluids*, 49(2), pp. 409–416.
- Chu, C. R. and Chiang, P. H. (2014). Turbulence effects on the wake flow and power production of a horizontal-axis wind turbine, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 124, pp. 82–89.
- Davidson, P. A. (2015). *Turbulence: an introduction for scientists and engineers*. Oxford university press.
- Evans, S. P., Bradney, D. R. and Clausen, P. D. (2018). Development and experimental verification of a 5 kW small wind turbine aeroelastic model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 181(September), pp. 104–111.
- Elizondo, J., Martínez, J., & Probst, O. (2009). Experimental study of a small wind turbine for low-and medium-wind regimes. *Int. J. Energy Res.*, 33(3), 309-326.
- Jogensen F. E. (2002). *How to measure turbulence with hotwire anemometers - a practical guide*. Dantec Dynamics.
- Laneville, A. (1973). Effects of turbulence on wind induced vibrations PhD Thesis, University of British Columbia.
- Langbeheim, E. and Rez, P. (2017). Sustainable energy for university science majors: Developing guidelines for educators, *Journal of Geoscience Education*, 65(2), pp. 86–92.
- Lubitz, W. D. (2014). Impact of ambient turbulence on performance of a small wind turbine. *Renewable Energy*, 61, pp. 69–73.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons.
- Roach, P. E. (1987). The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 8(2), pp. 82–92.
- Rocha, P. A. C. et al. (2018). The effects of blade pitch angle on the performance of small-scale wind turbine in urban environments. *Energy*, 148, pp. 169–178.
- Van Treuren, K. W. (2019). Current Status and Future Challenges for Small Horizontal Axis Wind Turbines, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 141(9).
- Vita, G. et al. (2018). Generating atmospheric turbulence using passive grids in an expansion test section of a wind tunnel, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 178(May), pp. 91–104.
- Wood, D. (2010). Small wind turbines for remote power and distributed generation, *Wind Engineering*, 34(3), pp. 241–254.

Simulación numérica de un intercambiador de calor tipo serpentín empotrado en la parte media de una losa de concreto.

Josafat Leyva Salmerón*, Efraín Simá Moo*

*Tecnológico Nacional de México / CENIDET. Av. Palmira esq. Apatzingán s/n. Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos, México. C.P. 62490.
E-mail: josafat.leyva19ma@cenidet.edu.mx, efrain.sm@cenidet.tecnm.mx

Resumen: Este trabajo presenta los resultados de la simulación de un intercambiador de calor tipo serpentín empotrado en el interior de una losa de concreto. La losa de concreto tiene un espesor de 0.12m y un área de 1.44 m², con diferentes separaciones entre tubos. Las simulaciones se realizaron utilizando Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD), utilizando el software comercial ANSYS-Fluent®. Se realizaron cinco simulaciones del intercambiador de calor, variando la separación entre tubos (0.12m; 0.15m; 0.17m; 0.26m; 0.29m) y una simulación sin el intercambiador de calor, con el fin de obtener la distribución más uniforme posible en la parte inferior de la losa y compararlo con la losa sin intercambiador de calor. Los datos de salida de las simulaciones fueron: la distribución de temperatura en la parte inferior de la losa, la caída de presión en la red de tubería, la temperatura promedio en la parte superior e inferior de la losa, el flux de calor promedio en la parte inferior de la losa y la longitud total de tubería para cada caso de simulación. Los resultados indicaron que el caso (3) con 0.17m de separación entre tubos, fue el que mejor distribución de temperatura proporcionó, con una temperatura promedio en la parte superior de la losa de 51°C, temperatura promedio en la parte inferior de la losa de 36.13°C, temperatura promedio en la cavidad de 24.88°C, caída de presión en el intercambiador de calor de 59.53Pa, un flux de calor promedio en la parte inferior de la losa de 4.27W/m² y una longitud de tubería de 5.93m. Se encontró que al utilizar el intercambiador del caso (3), la temperatura promedio en la parte inferior de la losa y la temperatura promedio en la cavidad disminuyen 16.45°C y 8.51°C respectivamente con respecto a la losa de concreto sin intercambiador [caso (6)], lo cual indica que reduce la transferencia de calor en la losa.

Palabras clave: Intercambiador de calor, serpentín, losa de concreto, cavidad, CFD

1. INTRODUCCIÓN.

El sector energético ha desempeñado un papel importante a través de los años en el desarrollo de la humanidad, debido a que la energía es indispensable para realizar las actividades cotidianas. Según la agencia internacional de energía en 2014 la producción mundial anual de energía primaria proviene 31.4 % del crudo, 28.8 % carbón y sus derivados, 21.3 % gas natural, 4.8 % nucleenergía y 13.7 % de renovables (World Energy Balances, 2015). La demanda de energía eléctrica ha sido una de las principales causas de contaminación para el medio ambiente, la mayor parte de la energía eléctrica se obtiene mediante la quema de combustibles fósiles, por ello el hombre ha tratado de buscar nuevas fuentes de energía para tratar de reducir la contaminación ambiental por la generación de energía eléctrica (Aste *et Al.* 2014). Para evitar un aumento de la temperatura global entre 5-6°C en el planeta Tierra para finales de este siglo, la humanidad necesitará adoptar programas más ambiciosos de eficiencia energética en todos los sectores, pero particularmente en el de edificaciones (Su *et Al.* 2015).

Una manera de ahorrar energía en las edificaciones es utilizando tecnologías pasivas. Las tecnologías pasivas, aprovechan la energía natural sin transformarla, entre ellas se encuentran diferentes técnicas enmarcadas en la arquitectura bioclimática: la orientación de los edificios al sol, la selección de materiales con una masa térmica favorable o que tengan propiedades para la dispersión de luz, natural, todo con el fin del lograr el confort térmico al interior de una edificación (Fonseca, 2011). El confort térmico representa un estado en el cual una persona se encuentra en un equilibrio fisiológico dado que no existe un malestar térmico (Werbin *et Al.* 2015). A raíz de la necesidad de tener un mejor confort térmico durante los últimos años se han empleado equipos mecánicos para climatizar hogares, oficinas, escuelas, edificaciones en general, siendo estos equipos los que mayor energía eléctrica consumen (Rhee *et Al.* 2017).

La aplicación de intercambiadores de calor empotrados en el interior de alguna de las componentes de la vivienda es una alternativa eficaz, para mitigar el consumo de energía eléctrica. Se han realizado cálculos acerca del consumo de energía eléctrica en una habitación típica, reportando que mediante el

uso de sistemas radiantes se puede obtener un ahorro de hasta el 10% en el consumo energético, en comparación de los sistemas convencionales (Mosa *et Al*, 2019). Con el fin de analizar la factibilidad del uso de un intercambiador calor tipo serpentín, como un sistema pasivo de enfriamiento, en este trabajo se presenta el estudio teórico de un intercambiador de calor tipo serpentín de 0.0254m de diámetro, empotrado en una losa de concreto cuadrado de 1.2m por lado y 0.12m de espesor, utilizando CFD, para cinco separaciones entre tubos y se compara con una losa de concreto convencional sin serpentín.

2. MODELO FÍSICO.

En la Figura 1, se muestra el modelo físico del sistema, el cual consiste en una losa de concreto de 0.12m de espesor cubriendo una cavidad de 0.9m x 0.9m x 0.9m. La cavidad está aislada por un cubo de poliestireno extruido (Foamular 250) de 0.95m x 0.95m x 0.0254m y esta a su vez está forrada de madera OSB de 1m x 1m x 0.0254m. El serpentín de 0.0254m de diámetro, se encuentra empotrado en la losa con separaciones de 0.12m, 0.15m, 0.17m, 0.26m, 0.29m,

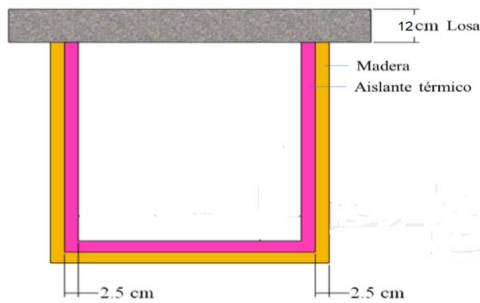


Fig. 1. Modelo físico.

2.1 Propiedades termofísicas.

En la Tabla 1, se proporcionan las propiedades termofísicas de los materiales de construcción utilizados para la losa, como para la cavidad.

Tabla 1. Propiedades termofísicas.

Componente de construcción	Conductividad térmica (λ) W/m-K	Calor específico (C_p) J/kg-K	Densidad (ρ) kg/m ³
Aislante térmico	0.0288	1470	10
Madera OSB	0.13	1880	650
Concreto	1.74	840	2300

3. SIMULACIÓN.

Las simulaciones se realizaron con el software ANSYS-Fluent®, el cual está basado en la técnica numérica de volumen finito. Las variables principales que se consideraron son: el flujo másico, la temperatura del fluido a la entrada, el flux de calor en la parte superior de la losa, el diámetro de la tubería.

En este estudio se consideró que el agua se va a tomar de una cisterna (22°C), el flujo másico se tomó como referencia el reportado para colectores solares de agua comerciales (0.021 kg/s). El flux de calor (408 W/m²) se tomó del trabajo reportado por Carreto en el 2019, donde midió el flux de calor en la parte superior de una losa, para la condición de máxima radiación solar en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. Adicionalmente, se realizaron las siguientes consideraciones: análisis en 3D, estado estacionario, flujo laminar, tubería PVC de 0.0254m.

3.1 Validación.

Como parte de la verificación del manejo correcto del software, se realizó la reproducción del trabajo que realizaron Ampofo & Karayiannis en 2003. El cual consistió en la obtención de datos experimentales, de la temperatura adimensional en la parte media de una cavidad calentada diferencialmente por convección natural, que contaba con las siguientes dimensiones 0.75m x 0.75m. Los parámetros utilizados fueron: temperatura de la pared caliente (T_{hot}) = 50°C, temperatura de la pared fría (T_{cold}) = 10°C, número de Rayleigh (Ra) = 1.58×10^9 , número de Prandtl (Pr) = 0.71. En la Figura 2 a), se ilustra el modelo físico del problema de referencia y en la figura 2 b), se presentan la comparación de los resultados de la temperatura adimensional de los resultados obtenidos experimentalmente, contra los resultados obtenidos en la simulación.

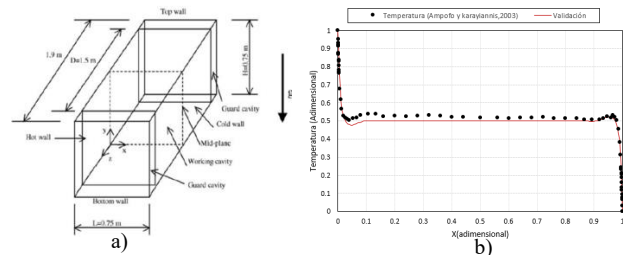


Fig. 2. a) Modelo físico del problema de referencia, b) Comparativa de resultados.

Al comparar los resultados obtenidos de la verificación y los resultados reportados por Ampofo & Karayiannis en 2003, se observa de manera cualitativa que los resultados son similares, por otra parte, de manera cuantitativa se encontró una desviación del 3.2%. Lo cual quiere decir, que los resultados de la validación son confiables y se realizó un correcto manejo del software para la realización de las simulaciones.

3.2 Geometría.

En la Figura 3, se presenta la geometría de la losa, cavidad e intercambiador de calor tipo serpentín, para el caso 3, donde la separación de los tubos es de 0.17m. Las dimensiones de la cavidad, está limitado a los módulos de prueba con que se cuenta en la institución, donde más adelante se pretende realizar la parte experimental, del intercambiador que resulte de este estudio.

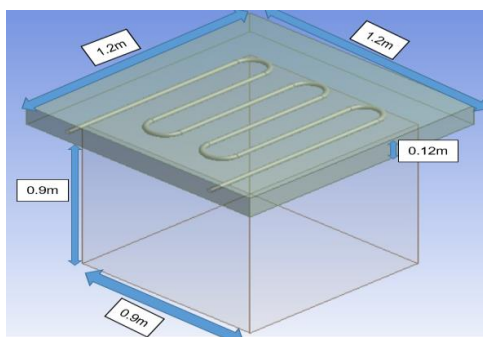


Fig. 3 Geometría del intercambiador de calor empotrado en una losa de concreto.

Se realizaron seis simulaciones, uno únicamente con la losa sin intercambiador de calor (caso 6) y cinco diferentes casos de losa con intercambiador de calor tipo serpentín, considerando que la entrada y salida del serpentín estén del mismo lado. Los criterios utilizados fueron: espacio entre tubos (S), espacio entre tubo y cavidad (E), número de pasos (Np). Los cinco casos con intercambiador de calor fueron los siguientes: (1) S=0.12m, E=0.02m, Np=8 pasos; (2) S=0.15m, E=0.07m, Np=6 pasos; (3) S=0.17m, E=0.02m, Np= 6 pasos; (4) S=0.26m, E=0.05, Np= 4 pasos; (5) S= 0.29m, E= 0.02m, Np= 4 pasos. En la Figura 4 se muestra el espaciado en el intercambiador de calor tipo serpentín del caso (2).

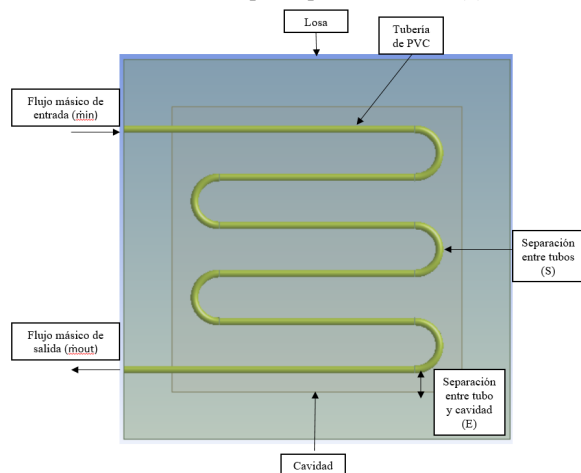


Fig. 4 Distribución del intercambiador de calor en la losa.

3.3 Mallado.

En la Tabla 2, se muestra la cantidad de nodos y elementos utilizados para cada caso de simulación del intercambiador de calor. El mallado fue una malla estructurada con elementos hexaédricos en el fluido de la cavidad, en el fluido de trabajo del intercambiador de calor tipo serpentín y en la losa de concreto. Se observa que el caso 6 es el que presenta el menor

número de elementos y nodos, al ser el caso sin intercambiador de calor.

Tabla 2. Número de nodos y elementos.

Caso	Número de elementos	Número de nodos
(1)	507850	250167
(2)	502863	256435
(3)	509690	257981
(4)	508028	265131
(5)	507113	265119
(6)	334118	182770

3.4 Condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera que se utilizaron para las simulaciones de los cinco casos se proporcionan en la Tabla 3.

Tabla 3. Condiciones de frontera.

Variable	Valor
Flux de calor (Q) W/m ²	408
Velocidad de entrada (V _{in}) m/s	0.033
Flujo másico (ṁ) kg/s	0.021
Temperatura de entrada (T _{in}) °C	22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones, de los cinco casos propuestos del intercambiador de calor tipo serpentín y de la configuración sin intercambiador de calor, de manera cualitativa.

Al ser un primer estudio de un intercambiador de calor empotrado en una losa de concreto, en este trabajo se pretende seleccionar el mejor diseño con base en la distribución de los campos de temperatura, la energía removida, el flux de calor que se transmite por conducción por la losa y la caída de presión generada por el intercambiador de calor.

Los resultados que se presentan son: a) distribución de temperatura en la parte inferior de la losa y b) distribución de temperatura en la parte central de la losa y la cavidad.

4.1 Resultados en la parte inferior de la losa.

En la Figura 5 se presenta de manera cualitativa la distribución de la temperatura en la parte inferior de la losa. Se observa que en el caso (6) es el que presenta la temperatura más elevada a lo largo de la superficie de la losa, de todos los casos estudiados. Por otra parte, las temperaturas superficiales disminuyeron al emplear un intercambiador de calor empotrado en la parte media de la losa, el cual fue uniformizando la distribución de temperaturas en la parte inferior de la losa conforme se iban presentando los casos. El caso (3) presentó una distribución de temperatura uniforme a lo largo de la parte inferior de la losa

con respecto a los demás casos. Se observa que el caso (1) a pesar de contar con una mayor longitud en la red de tubería, el fluido de trabajo fue adquiriendo temperatura a partir de la mitad de su trayectoria, dando como resultado una distribución de temperatura no uniforme en la parte inferior de la losa. En los casos (4) y (5) se muestra que al reducir la longitud de tubería y aumentar el espacio entre tubos, la temperatura en la parte inferior de la losa tuvo un valor mayor con respecto a los otros tres casos, lo cual indica que la capacidad de enfriamiento del serpentín disminuyó.

4.2 Resultados en la parte central de la losa y la cavidad.

En la Figura 6 se presentan los contornos de temperatura, en un corte transversal en la parte central de la losa y la cavidad, de

los casos estudiados. Se presenta de manera cualitativa la evolución desde el caso (1) hasta el caso (6). Se observa que la inclusión de un intercambiador de calor ayuda a retirar una gran cantidad de energía que se transmite por conducción en la losa, lo cual ayuda a disminuir y homogenizar las temperaturas tanto en la losa como en la cavidad. Se observa que el caso (6), es el que presenta la mayor temperatura en el interior de la cavidad, esto se debe a que este caso no tiene intercambiador de calor en la losa. Por otra parte, el caso (3) presenta una mejor distribución de temperaturas en la losa y como consecuencia disminuyó la temperatura en el interior de la cavidad, debido a que se tuvo una mejor distribución en la red de tubería en la parte media de losa.

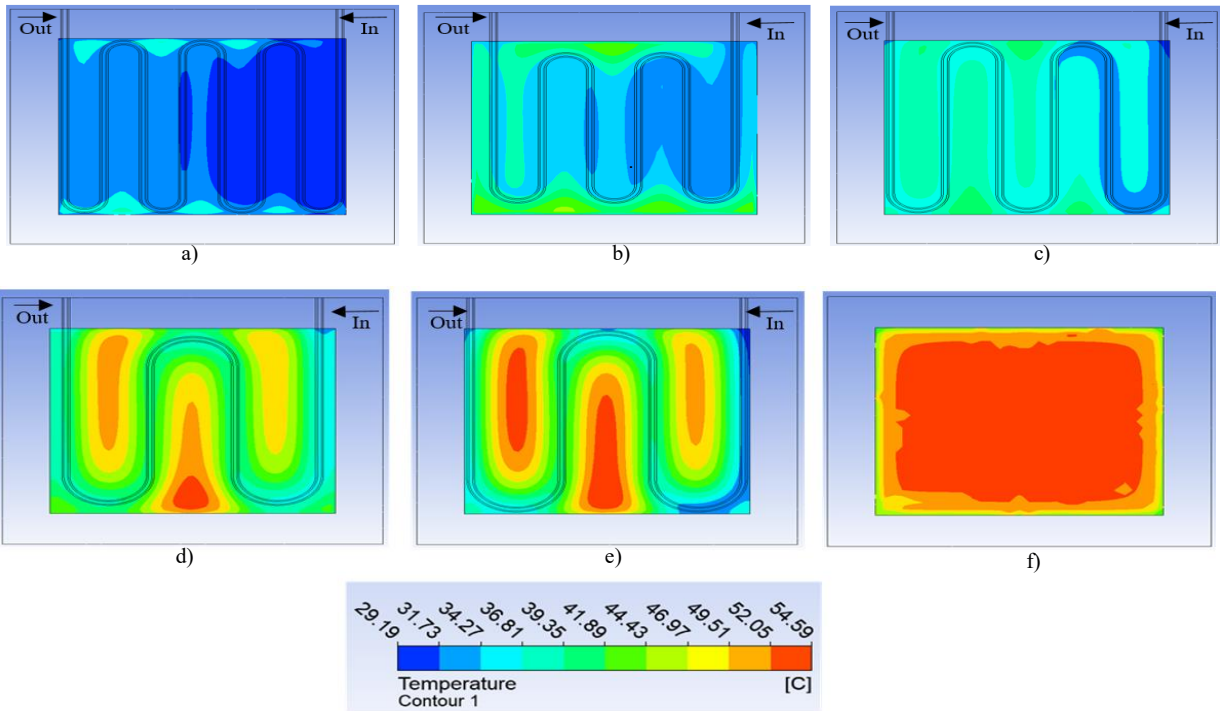
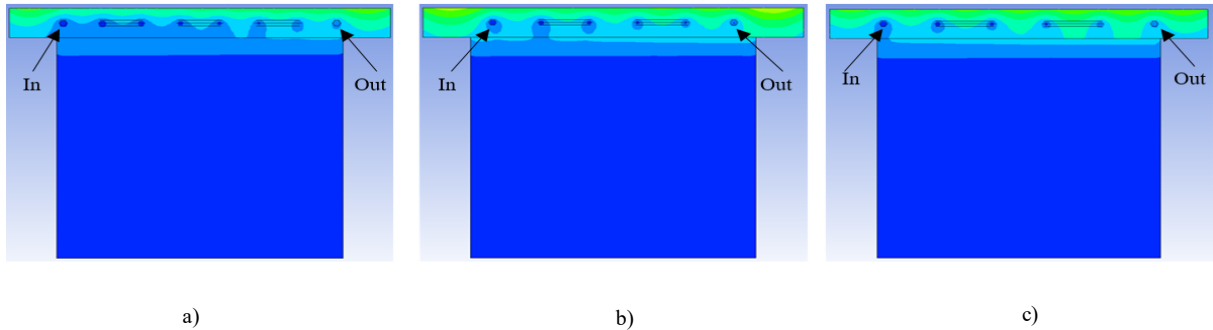


Fig. 5 Distribución de temperatura en la parte inferior de la losa para diferentes separaciones entre tubos: a) 0.12m, b) 0.15m, c) 0.17m, d) 0.21m, e) 0.26m, f) configuración sin intercambiador de calor.



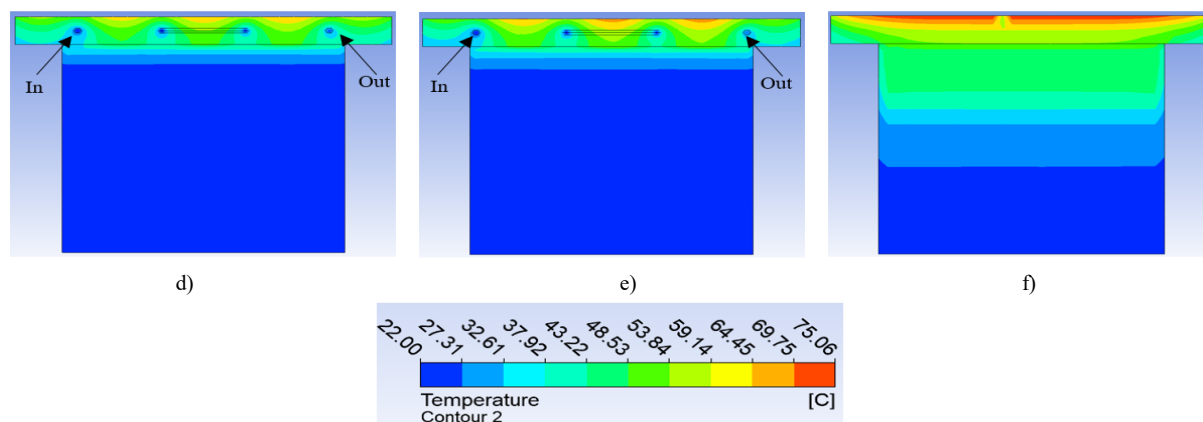


Fig. 6 Contornos de temperatura de un corte transversal en la parte central de la losa y la cavidad para diferentes separaciones entre tubos : a) 0.12m, b) 0.15m, c) 0.17m, d) 0.21m, e) 0.26m, f) configuración sin intercambiador.

4.3. Resumen de resultados.

En la Tabla 4 se presenta de manera cuantitativa los promedios pesados sobre la superficie de: la temperatura en la parte superior de la losa (TPsl), la temperatura en la parte inferior de la losa (TPil), la temperatura del agua a la salida del ducto (Tasd), la caída de presión del fluido de trabajo entre la entrada y la salida en la red de tubería (CP), el flux de calor en la parte inferior de la losa (QPil). De igual manera se presenta el promedio pesado volumétrico de la temperatura en el interior de la cavidad (TPic) y la longitud total de la red de tubería del serpentín (Lt). En el caso (6) al no utilizar un intercambiador de calor no se presentan los resultados de Tasd, Cp y Lt. De acuerdo con los resultados, se observa que la longitud total del serpentín está relacionada de forma inversa con las variables de temperatura y flujo de calor, y de forma directa con la caída de presión. Se observa que el caso (6) es el que presenta la mayor temperatura promedio en las superficies y en el interior de la cavidad, esto se debe a que no tiene un intercambiador de calor que retire el flux de calor que incide sobre la losa. Para los casos con intercambiador de calor la temperatura en la superficie superior de la losa, la temperatura en la superficie inferior de la losa y la temperatura en el interior de la cavidad, oscilan entre 48.35 °C y 57.32°C, 32.11°C y 45.41°C, 24.78°C y 25.32°C, respectivamente. En el caso del fluido de trabajo la variación entre los casos es pequeña (1°C). Lo anterior indica que, que la inclusión de un intercambiador de calor empotrado en la parte media de una losa de concreto ayuda al decremento de las temperaturas promedio tanto en la losa como en la cavidad, cuya temperatura es prácticamente similar en cualquiera de los cinco casos con intercambiador de calor. En el caso de la temperatura promedio en la parte superior de la losa, el caso (1) presenta el menor valor con 48.35°C, con una longitud de tubería de 7.51m, y aumenta conforme la longitud de la tubería disminuye. Por otra parte, la mayor diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior de la losa se

presenta en el caso (1) con 16.24°C, seguido del caso (3) con 14.87°C. En el caso del fluido de trabajo, de acuerdo con los resultados obtenidos el caso (5) es el que presenta un mayor gradiente entre la salida y la entrada con 5.04°C, seguido del caso (3) con 5.02°C. Por lo tanto, la ubicación del intercambiador de calor en el interior de la losa y la separación entre tubos adquiere un papel importante al momento de incrementar la temperatura de salida del fluido de trabajo, como se demuestra en el caso (1) que, al contar con una separación entre tubos a menor distancia, el fluido de trabajo va elevando su temperatura en el tramo final de su trayectoria. Desde el punto de vista térmico el caso (1) es el que presenta menor temperatura en la parte inferior de la losa, sin embargo, es el que requiere mayor inversión al utilizar más tubería, presenta una mayor oposición al flujo. Por otra parte, el caso (3) es el segundo mejor en la temperatura al interior de la cavidad, opone menos resistencia al flujo del fluido que el caso 1 y segundo en retirar energía de la losa. Por lo cual se concluye que el caso (3) presenta un mejor balance.

Tabla 4. Resumen de resultados.

Caso	TPsl (°C)	TPil (°C)	TPic (°C)	Tasd (°C)	CP (Pa)	QPil (W/m²)	Lt (m)
(1)	48.35	32.11	24.78	26.98	65.20	2.48	7.51
(2)	49.73	35.74	25.07	26.94	58.94	4.54	5.38
(3)	51.00	36.13	24.88	27.02	59.53	4.27	5.93
(4)	57.15	43.71	25.50	26.96	57.16	7.97	4.00
(5)	57.32	45.41	25.32	27.04	57.03	7.94	4.21
(6)	68.34	51.58	33.39	-	-	30.05	-

5. CONCLUSIONES.

En este trabajo, se simuló el comportamiento térmico de cinco diferentes casos de intercambiadores de calor tipo serpentín, empotrados en la parte media de una losa de concreto y una

losa de concreto sin intercambiador de calor. Se realizó un análisis paramétrico de los resultados promedio de las temperaturas en la parte superior e inferior de la losa, la temperatura promedio del fluido de trabajo a la salida del conducto, la caída de presión y la energía removida.

Con base a los resultados presentados, se concluye lo siguiente:

- La inclusión de un intercambiador de calor en el interior de una losa de concreto ayuda a la remoción de energía, debido a que el fluido de trabajo absorbe gran parte de la energía que incide sobre la losa y ayuda a uniformizar la distribución de temperaturas en la losa y en la cavidad.
- El caso (3) es el que mejores resultados presentó de manera cualitativa, al presentar una distribución de temperatura homogénea en la parte inferior de la losa, con la menor caída de presión. Además, se encontró que la temperatura promedio en la parte inferior de la losa y la temperatura promedio en la cavidad disminuyen 16.45°C y 8.51°C respectivamente con respecto a la losa de concreto sin intercambiador [caso (6)].
- Si bien los casos (4) y (5) dieron como resultado una menor caída de presión, debido que se utilizó una menor cantidad de tubería y un menor número de curvas, sin embargo, al tener una menor longitud en la tubería, no permitió que hubiera una distribución de temperaturas homogénea a lo largo de la losa, lo que mermó su capacidad de enfriamiento.
- Finalmente, utilizar un intercambiador tipo serpentín incrementa hasta 5.04°C la temperatura del fluido de trabajo, lo cual podría utilizarse para algún proceso donde se requiera precalentar agua, como por ejemplo el agua para lavar ropa, o el agua para la higiene personal.

REFERENCIAS.

ASHRAE Handbook. (2012). *HVAC System and Equipment*, Chapter 6. Panel heating and cooling. ASHRAE, Atlanta, GA.

Energía, A. I. d., Ed. (2015). *World Energy Balances*, France: s.n.

F. Ampofo and T.F. Karayiannis. (2003). Experimental benchmark data for turbulent natural convection in air filled square cavity: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46.

H. Tang, X.-H. Liu, H. Li, Y. Zhou, Y. Jiang. (2016). Study on the reduction of condensation risks on the radiant cooling ceiling with superhydrophobic treatment, *Build and*

Environment. 100.

K. N. Rhee, B. W. Olsen, K.W. Kim. (2017). Ten questions about radiant heating and cooling system, *Build and Environment*. 112.

K. Werbin, Z. Min, L. Xing, M. Xiang, Experimental investigation on a ceiling capillary radiant heating system: *The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE* (2015).

L. Carreto. (2019) *Simulación del comportamiento térmico de una cavidad con techo verde*. (Tesis de maestría). Centro Nacional de investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

L. Muñoz, A. Hernández, L. Lorenzini. (2017). Simulación de la disipación de energía usando enfriadores de líquido (Energy Dissipation Simulation Using Liquid Coolers): *Vol. 3 no. 2, Verano de la Investigación Científica*.

L. Su and X. Zhang. (2015). Experimental Study on Cooling Characteristics of Concrete Ceiling Radiant Cooling Panel: *9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) and the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE)*.

M. Mosa, M. Labat, S. Lorente. (2019). Role of flow architectures on the design of radiant cooling panels, a constructal approach: *Applied Thermal Engineering* 150.

M.R. Hajmohammadi. (2017). Introducing a ψ shaped cavity for cooling a heat generating medium. *International Journal of Thermal Sciences* 121.

M. Tye-Gingras and L. Gosselin. (2012). Comfort and energy consumption of hydronic heating radiant ceilings and walls based on CFD analysis: *Building and environment* 54.

N. Aste, C. Del Pero, F. Leonforte. (2014). Water flat plate PV-thermal collectors: a review, *Sol. Energy* 102

N. Fonseca. (2011). Experimental study of thermal condition in a room with hydronic cooling radiant surfaces, *Int. J. Refrig* 34

Revisión y evaluación de modelos de daño a la fatiga en materiales metálicos a través de métodos energéticos basados en la entropía

Víctor I. Rodríguez-Reyes. Arturo Abúndez-Pliego

Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Prolongación Palmira Esq. Apatzingán S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, 62480, México; (d18ce030@cenidet.tecnm.mx, arturo.ap@cenidet.tecnm.mx).

Resumen: En este trabajo se presenta una revisión de la literatura sobre modelos para la estimación del daño de materiales metálicos sometidos a fatiga basados en la generación de entropía, los cuales corresponden a investigaciones realizadas por grupos líderes a nivel internacional. Se evaluaron tres enfoques, empleando datos de entropía existentes en la literatura de aluminio 6061-T6 sometido a fatiga a flexión, a amplitud de carga constante. Se muestran y discuten las características, semejanzas y diferencias de los modelos evaluados. Se propone extender los estudios de fatiga empleando la termodinámica, ya que aporta una base teórica que parte de principios físicos, contrario a las metodologías tradicionales para generar modelos empíricos, en las que se requiere una gran cantidad de datos experimentales para ajustar curvas.

Palabras clave: Daño mecánico, fatiga, entropía, termodinámica.

1. INTRODUCCIÓN

La fatiga es un proceso de acumulación del daño en un material sometido a cargas cíclicas, el cual conduce a una falla por fractura, incluso en casos donde el material está sometido a una carga que no supere el límite elástico. La fatiga llega a causar hasta el 90% del total de fallas reportadas en estructuras y componentes de ingeniería (Zakaria *et al.*, 2016). En la falla por fatiga los daños se desarrollan lentamente durante los primeros ciclos, y se aceleran cerca del final de la vida útil (ver Fig. 1). En la etapa I se presenta la iniciación de una grieta, la cual está localizada usualmente en un área pequeña con concentración de esfuerzos elevados. En la etapa II se propaga la grieta dominante, además de que se forma la característica más típica del daño por fatiga, las *marcas de playa*. En la etapa III se lleva a cabo la fractura súbita.

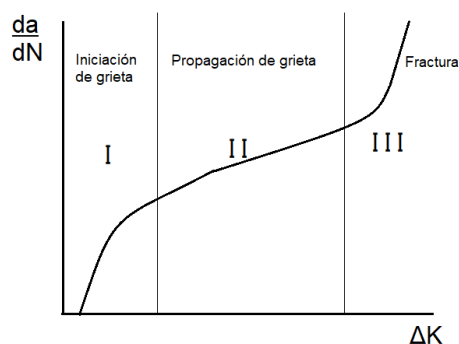


Fig. 1. Crecimiento característico de la grieta.

Desde las primeras investigaciones de fatiga de August Wöhler en 1860, quien planteó las bien conocidas curvas de esfuerzo-vida ($S - N$), se han desarrollado una serie de modelos para la estimación de la vida a la fatiga, en su mayoría basados en trabajos experimentales. Uno de los primeros modelos que representó datos experimentales de fatiga es el de Basquin (1910), el cual relaciona el esfuerzo aplicado con el número de ciclos a la falla a través de un par de parámetros empíricos A y b , que representan un coeficiente y un exponente de resistencia a la fatiga. Otro modelo que se puede mencionar es la regla de daño lineal de Miner (1945), donde el parámetro de daño D se obtiene sumando los cocientes entre los ciclos aplicados n_i y los ciclos a la falla N_i para cada i -ésimo nivel de esfuerzo. Cuando $D = 1$, se origina la falla. Este modelo es el más tradicional y fácil de implementar, por lo que muchos trabajos reportados en la literatura lo toman como base, aunque es el menos exacto, debido a la suposición de la linealidad. Otro de los principales modelos para el diseño y análisis de vida a la fatiga es la relación de Coffin-Manson (Manson, 1962; Tavernelli & Coffin, 1962) entre la duración a la fatiga y la deformación total. La ley de Paris (Paris & Erdogan, 1963) se emplea en el método de crecimiento de grieta, en el cual se asume que una grieta ya se ha generado y detectado. Se expresa en términos de constantes empíricas del material y del intervalo de intensidad de esfuerzos ΔK_I , que se obtiene de la mecánica de la fractura.

Los modelos descritos son de los más populares y son sólo una muestra de todos los que se han propuesto para la estimación de la vida a la fatiga. Sin embargo, ninguno ha recibido aceptación universal, ya que sacrifican el rango de aplicabilidad en favor de ganar precisión en la estimación de la vida a la fatiga, generando las siguientes dificultades (Cui, 2002): la predicción de vida útil

bajo cargas de amplitud variable y multiaxiales, la transferencia de información de probetas pequeñas a componentes o estructuras reales, la influencia de la corrosión y de la fluencia viscosa (creep), así como el tipo de distribución probabilística y el tratamiento de las dispersiones observadas experimentalmente. Muchos modelos se enfocan en cargas uniaxiales y se basan en que el material es homogéneo. Además, algunos de los más conocidos aún presentan deficiencias y limitaciones al considerar los efectos de la secuencia e interacción de cargas. Se han propuesto varios enfoques, como las teorías basadas en energía, las cuales tienen el potencial de unificar el daño causado por diferentes tipos de cargas (Basaran & Yan, 1998; Bryant et al., 2008).

En este trabajo se presenta una revisión sobre enfoques energéticos para el estudio de fatiga. Se discuten las semejanzas, diferencias, alcances y limitaciones de tres de ellos. Para esto, se emplearon datos de la evolución de la acumulación de la entropía existentes en la literatura de aluminio 6061-T6, sometido a cargas cíclicas de flexión totalmente invertidas. Se distinguen las principales variables y parámetros empleados por cada uno de los grupos de investigación. Los tres modelos de daño evaluados se deducen de manera particular, lo que hace que presenten una tendencia de evolución diferente. En los tres casos, se realizan suposiciones con el fin de simplificar el cálculo de la entropía, limitando el rango de aplicación de los modelos. El objetivo del trabajo radica en conocer y discutir los enfoques existentes más recientes en el uso de la entropía como índice de daño para el estudio de la fatiga de materiales metálicos. Esta revisión puede ser útil para el lector en la selección de algún modelo, dependiendo de las características del tipo de estudio que se pretenda realizar.

2. TERMODINÁMICA

La termodinámica es una rama de la física encargada del estudio de la interacción entre el calor y otras manifestaciones de la energía y se basa en cuatro leyes principales. Para el estudio de los sólidos, en conjunción con la mecánica del medio continuo, generalmente se emplean dos leyes: la primera ley, o la ley de la conservación de la energía; y la segunda ley, o la ley de la entropía o de la irreversibilidad de un proceso.

La primera ley de la termodinámica es la correspondiente a la conservación de la energía, la cual establece que la energía puede transformarse de una forma a otra, pero no puede ser creada o destruida. Se expresa mediante (1), donde E es la energía interna, K la energía cinética, Q el flujo de calor y $P_{(x)}$ el trabajo hecho por fuerzas externas (Lemaitre & Chaboche, 1990).

$$(d/dt)(E + K) = P_{(x)} + Q \quad (1)$$

La segunda ley explica los fenómenos de naturaleza irreversible y de degradación y deriva en otra propiedad llamada entropía, la cual dicta la dirección de un proceso, cuantificando la energía disipada como calor que no se puede convertir en trabajo útil. Por ello, esta propiedad se relaciona con una *flecha del tiempo* y

se recurre a ella para determinar la evolución de un sistema durante un proceso irreversible (Khonsari & Amiri, 2013).

La entropía se expresa como una variación de la energía con respecto a una variación de temperatura, de acuerdo con (2), donde ρ es la densidad, s la entropía específica, J_q el flujo de calor y T la temperatura. Esta ecuación plantea la irreversibilidad en la entropía de un sistema, ya que el cambio de entropía será más grande que para un proceso reversible. (Lemaitre & Chaboche, 1990).

$$\rho \frac{ds}{dt} \geq -\text{div} \left(\frac{J_q}{T} \right) \quad (2)$$

Como se ha reportado en la literatura (Basaran & Yan, 1998; Bryant et al., 2008; Naderi et al., 2010), el daño por fatiga es un proceso termodinámicamente irreversible que está acompañado por disipación de energía, llevando a la generación de entropía. Ésta ofrece una medida de la degradación de los materiales con la que se puede predecir la vida a la fatiga. Es útil como indicador de daño, ya que es independiente de varios parámetros involucrados en el proceso.

3. RESUMEN DE MODELOS BASADOS ENTROPÍA

En los últimos años se han realizado estudios para plantear modelos de estimación de vida a la fatiga partiendo de principios termodinámicos. Por ejemplo, Basaran y Yan (1998) plantearon una medida de daño por fatiga basada en la segunda ley de la termodinámica y la mecánica estadística. Para ello se asume al cuerpo sólido como un sistema termodinámico en el que la producción de entropía es no negativa. Mediante la ecuación de Boltzmann y la energía libre de Helmholtz, desarrollaron un parámetro de daño en función de la entropía y de propiedades del material. Bryant et al. (2008) desarrollaron el *teorema de degradación-generación de entropía (DEG)*, por sus siglas en inglés, que relaciona la generación de entropía con procesos de degradación irreversible a través de fuerzas termodinámicas generalizadas y fuerzas de degradación. Naderi et al. (2010) postularon que la entropía en el punto de fractura en metales que experimentan cargas cíclicas repetidamente es constante, independientemente de la geometría de las probetas, tipo y amplitud o frecuencia de carga, concepto nombrado como *Entropía de Fractura a la Fatiga (FFE)*, por sus siglas en inglés. Con base en esta hipótesis, se propuso una metodología para la prevención de fallas en metales que experimentan cargas cíclicas (Naderi & Khonsari, 2011).

La entropía ha sido útil para evaluar la evolución del daño por fatiga de materiales metálicos sometidos a cargas uniaxiales de amplitud constante (Naderi & Khonsari, 2010a; Temfack & Basaran, 2015) y de amplitud variable (Naderi & Khonsari, 2010b). Además, se ha empleado como índice de daño para estudiar la fatiga en ambientes corrosivos y con fines de monitoreo de la salud estructural (Imanian & Modarres, 2015, 2018). Por otra parte, se han desarrollado modelos para la estimación de la velocidad del crecimiento de la grieta en función del flujo de entropía, partiendo del teorema DEG

(Hajshirmohammadi & Khonsari, 2020; Idris *et al.*, 2019). Los resultados mostraron una relación lineal entre el flujo de entropía y la velocidad del crecimiento de la grieta por fatiga. Por lo tanto, el flujo de la entropía es un parámetro prometedor para la predicción de la velocidad de crecimiento de la grieta, tanto en fatiga de bajo y alto ciclaje.

Sin embargo, en alto ciclaje existe disipación de energía asociada tanto a las deformaciones microplásticas como a la fricción interna. Se ha determinado que la fricción interna es despreciable en fatiga de bajo ciclaje, pero se acumula con el tiempo y se vuelve notable en fatiga de alto ciclaje, por lo que se sugiere considerarla para el cálculo de la FFE (Jang & Khonsari, 2018; Ontiveros *et al.*, 2017).

A continuación se presenta la comparación de tres enfoques que han sido desarrollados por distintos grupos de investigación, los cuales emplean la evaluación de la entropía como índice de daño, partiendo de un modelado teórico.

3.1 Enfoque de Naderi y Khonsari

Naderi y Khonsari (2010a, 2010b) mostraron que la generación de entropía puede usarse de manera efectiva para evaluar la evolución del daño por fatiga. Calcularon la entropía γ de acuerdo con (3), la cual es la desigualdad de Clausius-Duhem,

$$D = \sum_{k=1}^n \left\{ D_{N_{k-1}} + \frac{D_c - D_{N_{k-1}}}{\ln \left[\frac{(1 - (s_{ic}/s_g))}{(1 - (s_{k-1}/s_g))} \right]} \ln \left[\frac{1 - (s/s_g)}{1 - (s_{k-1}/s_g)} \right] \right\} \quad (4)$$

Naderi y Khonsari evaluaron la vida a la fatiga con cargas cíclicas a flexión, tensión-compresión y torsión en amplitud constante y con historiales de carga con amplitud variable, con probetas de aluminio 6061 y acero inoxidable 304. Los autores encontraron que el daño para distintas geometrías de probetas, sometidas a diferentes tipos, amplitudes y secuencias de bloques de carga, evoluciona de una manera general para todos los casos al normalizar la acumulación de entropía. También observaron que el parámetro de daño crece con una pendiente constante hasta que alcanza aproximadamente el 90% de la FFE. En este punto, el daño crece rápidamente hasta alcanzar la unidad. Este cambio coincide con el punto en el que la macrogrieta comienza a crecer hasta la falla.

3.2 Enfoque de Temfack y Basaran

Temfack y Basaran (2015) presentaron un modelo para fatiga basado en la generación de entropía, apoyándose en un método físico que combina la mecánica estadística con las leyes de la termodinámica. Obtuvieron la desigualdad de Clausius-Duhem para la estimación de la entropía, de acuerdo con (5), donde σ es el tensor de esfuerzos, ε^p el tensor de deformación plástica, k el coeficiente de conductividad térmica, ρ la densidad, r la fuente interna de calor y T la temperatura.

donde σ es el tensor de esfuerzos, $\dot{\varepsilon}_p$ la evolución de la deformación plástica, $\dot{V}_k$ la evolución de las variables internas, A_k la fuerza termodinámica asociada con las variables internas, J_q el flujo de calor y T la temperatura del sistema.

$$\dot{\gamma} = \frac{\sigma: \dot{\varepsilon}_p}{T} - \frac{A_k \dot{V}_k}{T} - J_q \cdot \frac{\nabla T}{T^2} \geq 0 \quad (3)$$

La ecuación (3) es válida para fatiga de bajo ciclaje. En su estudio, Naderi y Khonsari consideraron que la generación de entropía debida a variables internas es pequeña, y que no existe transferencia de calor, siendo la entropía calculada solo en función de la disipación por deformación plástica. Propusieron un parámetro de daño adimensional D en función de la generación de entropía, definido en (4). Para su desarrollo, tomaron como base un modelo de daño de la literatura (Duyi & Zhenlin, 2001) que está en función del agotamiento de la tenacidad. En el modelo de Naderi y Khonsari se suman todas las variaciones de daño k para cada etapa de carga n , donde s_{k-1} representa la entropía acumulada para la etapa $k-1$, D_c es el valor del daño crítico, el cual debe ser ≤ 1 , s es la generación de entropía, s_{ic} es el valor crítico de la generación de entropía y s_g es la generación total de entropía en el punto de la fractura.

$$\gamma = \frac{\sigma: \varepsilon^p}{T} + \frac{k}{T^2} |\overrightarrow{grad} T|^2 + \frac{\rho r}{T} \geq 0 \quad (5)$$

Para el parámetro de evolución del daño D , los autores plantearon una razón de cambio entre el desorden presente W y el desorden de un estado inicial W_o . La representación matemática de este planteamiento se presenta en (6), donde $(s_i - s_{i0})$ es la diferencia de la producción de entropía, m_s la masa molar y R la constante universal de los gases. La obtención de esta ecuación, con dichos parámetros, se debe al uso de la ecuación de Boltzmann.

$$D = \frac{W - W_o}{W} = 1 - \exp \left(-(s_i - s_{i0}) \frac{m_s}{R} \right) \quad (6)$$

Este modelo de daño es igual a cero en el estado inicial del material e incrementa progresivamente hasta alcanzar el valor de la unidad en el momento de la falla. Temfack y Basaran probaron el modelo con probetas de acero estructural A36 en fatiga de bajo ciclaje, con cargas uniaxiales a tensión-compresión, siendo controladas mediante desplazamientos. En la estimación de la entropía, los autores despreciaron el flujo de calor con los alrededores, así como la variación de la temperatura, quedando solo en función de la disipación plástica, por lo que no es aplicable en fatiga de alto ciclaje, ya que se necesitaría estimar la entropía considerando otros procesos disipativos. Los autores

también sugieren que para una aplicación práctica, su parámetro de daño debería multiplicarse por un factor de seguridad. Este parámetro de daño tiene una tendencia particular a crecer aceleradamente durante los primeros ciclos de la prueba hasta alcanzar un valor asintótico cercano a la unidad.

3.3 Enfoque de Imanian y Modarres

Imanian y Modarres (2018) estudiaron el proceso combinado de corrosión-fatiga, proponiendo una variable de daño para el pronóstico y la gestión de la salud estructural, con una base en la evolución de la generación de entropía, como se muestra en (7), donde γ_d es la generación de entropía, γ_{d_0} la entropía en el punto inicial, y γ_{d_E} el valor del límite de la entropía. En este modelo, la falla ocurre cuando la generación total de entropía alcanza el nivel del límite de entropía.

$$D = \frac{\gamma_d - \gamma_{d_0}}{\gamma_{d_E} - \gamma_{d_0}} \quad (7)$$

La desigualdad de Clausius-Duhem para la estimación de la entropía se presenta en (8), donde T es la temperatura, J_q el flujo de calor, $J_{M,a}$ es la corriente anódica y $J_{M,c}$ la corriente catódica de activación para la reacción de oxidación, $J_{O,a}$ es la corriente anódica y $J_{O,c}$ la corriente catódica de activación para la reacción de reducción, $\tilde{A}_M$ es la afinidad electroquímica para la reacción de oxidación y $\tilde{A}_O$ para la reacción de reducción, α_M es un coeficiente de transporte de carga para la reacción de oxidación y α_O para la reacción de reducción, σ_Ω la energía de disipación óhmica, $E_{Mconc,c}$ es el sobrepotencial de oxidación catódica, $E_{Oconc,c}$ el sobrepotencial de difusión de reducción, τ el tensor de esfuerzos, $\dot{\epsilon}_p$ la tasa de deformación plástica y $\sigma_{M,e}$ la energía disipada resultado de la deformación elástica (Imanian & Modarres, 2015). En (8) se involucran pérdidas de calor, pérdidas electroquímicas resultado de un potencial de activación, y de un sobrepotencial óhmico, pérdidas por difusión y pérdidas mecánicas.

$$\begin{aligned} \sigma = & \frac{1}{T^2} J_q \nabla T + \frac{1}{T} (J_{M,a} \alpha_M \tilde{A}_M + J_{M,c} (1 - \alpha_M) \tilde{A}_M \\ & + J_{O,a} \alpha_O \tilde{A}_O + J_{O,c} (1 - \alpha_O) \tilde{A}_O) + \frac{\sigma_\Omega}{T} \\ & + \frac{1}{T} (J_{M,c} E_{Mconc,c} + J_{O,c} E_{Oconc,c}) \\ & + \frac{\dot{\epsilon}_p : \tau}{T} + \frac{\sigma_{M,e}}{T} \end{aligned} \quad (8)$$

Imanian y Modarres probaron el modelo experimentalmente con aluminio 7075-T651. Calcularon la entropía en términos del área de la curva de histéresis debida a los esfuerzos y deformaciones mecánicas, y a la variación de la corriente eléctrica y el potencial corrosivo en cada ciclo de carga. Obtuvieron una distribución fina de los resultados de entropía, que justifica la capacidad de esta propiedad para tratar las incertidumbres asociadas con las variabilidades del microestado, además de una independencia a la condición de carga. Por otra parte, explicaron la dispersión

obtenida, entre otras cosas, por errores en los instrumentos de medida, las consideraciones hechas en la evaluación de la entropía, el control del experimento, condiciones ambientales y operacionales y al error humano.

La evolución de este parámetro de daño presenta una tendencia lineal desde el comienzo de la prueba hasta el punto de la falla.

4. COMPARACIÓN ENTRE LOS MODELOS PRESENTADOS

Khonsari y Amiri (2013) experimentaron con probetas de aluminio 6061-T6, sometidas a flexión a diferentes amplitudes de desplazamiento, con una relación de esfuerzos totalmente reversible en bajo ciclaje, a frecuencia de 10 Hz (ver Fig. 2). Calcularon la generación de entropía cíclica, considerando solamente la disipación plástica, a través de la energía de histéresis y la medición de la temperatura con una cámara de termografía infrarroja. Se observa que la tasa de cambio es diferente para cada nivel de desplazamiento, pero finalmente alcanzando una entropía acumulada media de $4.07 \text{ MJ/m}^3 \text{K}$ en el punto de la fractura (ver Fig. 3).

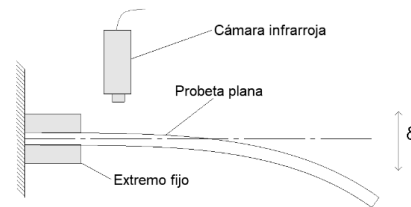


Fig. 2. Diagrama esquemático de la configuración experimental.

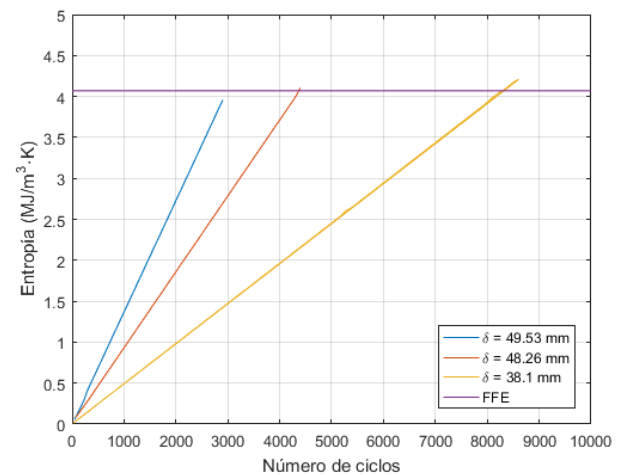


Fig. 3. Evolución de la acumulación de entropía hasta la fractura para probetas de aluminio 6061-T6 en pruebas de flexión cíclica (Khonsari & Amiri, 2013).

En el presente trabajo se emplearon los datos de la prueba con desplazamiento de 49.53 mm para evaluar los tres modelos de daño descritos anteriormente. Khonsari y Amiri (2013)

reportaron que, para estas condiciones, el material alcanza una vida a la fatiga de 2910 ciclos y un valor de entropía máximo de $3.97 \text{ MJ}/\text{m}^3\text{K}$. Los tres modelos discutidos emplean la entropía como la variable independiente. La evolución del parámetro de daño para cada uno de ellos se presenta en la Fig. 4. Se añade la evolución del daño del parámetro de Dui y Zhenlin (2001) como referencia, cuyo modelo fue obtenido experimentalmente del agotamiento de la tenacidad del material.

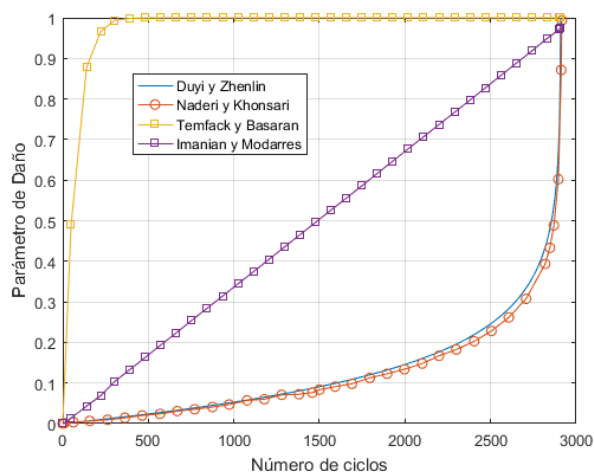


Fig. 4. Evolución del parámetro de daño para los tres modelos comparados.

Se observa que el parámetro de daño de Naderi y Khonsari crece con pendiente constante hasta aproximadamente el 90% de la vida a la fatiga (aproximadamente en 2600 ciclos), momento en el cual presenta un incremento súbito hasta la fractura, donde el valor del daño se aproxima a la unidad. En cambio, el parámetro de Temfack y Basaran crece de manera acelerada durante los primeros ciclos, aproximándose al valor de la unidad en alrededor de 663 ciclos. Éste es un valor muy lejano al número de ciclos a la falla, incluso al del punto crítico en el 90% de la vida útil que se aprecia con el parámetro de Naderi y Khonsari. A partir de este punto, el comportamiento del daño de Temfack y Basaran es asintótico en $D = 1$ hasta alcanzar la FFE.

El parámetro de Imanian y Modarres crece de manera lineal a lo largo de toda la vida a la fatiga del material. Esto es debido a que, para este caso, se está considerando un material prístino con daño inicial igual a cero. Esto quiere decir que (7) se convierte en un cociente entre el valor de la entropía en el instante medido y el del límite de entropía, relación análoga a la regla del daño lineal de Miner.

Se realizó un análisis de correlación entre cada uno de los parámetros de daño y la entropía. El modelo de Naderi y Khonsari tiene un valor R de 0.771, el de Temfack y Basaran de 0.416, y el de Imanian y Modarres de 1. El modelo de Imanian y Modarres tiene dicha correlación debido a que se asemeja a una relación lineal. El modelo de Naderi y Khonsari supera una correlación de 0.7, lo que indica una relación fuerte entre las

variables. El modelo de Temfack y Basaran está muy por debajo de ese valor, por lo que su relación sería de moderada a débil.

5. DISCUSIÓN SOBRE LOS MODELOS PRESENTADOS

Los tres modelos presentados emplean la entropía como índice de daño, cuantificándola mediante las leyes de la termodinámica. Con ellas, todos los autores plantean una desigualdad de Clausius-Duhem acorde a las condiciones del problema estudiado. En los tres estudios se consideró carga uniaxial y material continuo homogéneo.

Naderi y Khonsari derivaron su modelo de daño de otro de la literatura y aprovechan la FFE como una propiedad del material, que es constante en el punto de la fractura, independientemente de la geometría de la probeta, amplitud, frecuencia y tipo de carga. Calcularon la entropía considerando a la deformación plástica como el único proceso de disipación de energía. Con ello, estiman el punto de daño crítico conforme se alcanza la FFE. Tras este punto, la pendiente de la evolución del daño crece a un ritmo más acelerado con respecto a su comportamiento previo, alcanzando el valor de la unidad en unos pocos ciclos. De esta forma, se tiene la ventaja de retirar de operación a una pieza sometida a fatiga con suficiente anticipación a la falla. La principal limitación del modelo es que ha sido evaluado con escenarios de carga específicos, por lo que se requiere de más secuencias de cargas y probar otro tipo de condiciones de temperatura y atmosféricas. Por otra parte, sería idóneo extender el modelo al régimen de alto ciclaje, donde los niveles de esfuerzo no serían suficientes para estimar la entropía considerando solamente disipación plástica, además de que habría muy poca variación de temperatura.

Temfack y Basaran emplearon la ecuación de Boltzmann para incorporar la entropía como índice de daño en su modelo. Para el cálculo de la entropía realizaron suposiciones de tal manera que sólo se requiera la disipación plástica. Esto ocasiona que su modelo sea aplicable sólo en bajo ciclaje. El parámetro de daño se planteó a partir de la variación del estado de desorden presente con respecto a un estado de referencia inicial. La evolución del parámetro de daño es atípica, comparada con otros modelos, dado su crecimiento acelerado en los primeros ciclos de carga, hasta alcanzar un valor asintótico en la unidad. Este comportamiento es matemáticamente correcto, debido al exponencial negativo, pero es contrario a las mediciones experimentales y del comportamiento del crecimiento de la grieta. Se requiere revisar su formulación, ya que, si bien es matemáticamente correcta, minimiza en gran medida los ciclos a la falla del material. Por otra parte, se puede extender el modelo a escenarios de alto ciclaje, donde la producción de entropía debe calcularse en función del trabajo elástico, además de considerar materiales anisotrópicos.

Imanian y Modarres estudiaron el proceso combinado de corrosión-fatiga, por lo que su desigualdad de Clausius-Duhem está compuesta por una serie de términos que incluyen procesos disipativos electroquímicos y eléctricos. Ellos también emplean un concepto de límite de fatiga, mediante el cual argumentan que

la probabilidad de la falla se incrementará conforme la entropía acumulada en el proceso de degradación del material alcanza dicho límite. La desigualdad de Clausius-Duhem formulada incluye un término para la disipación de energía por deformaciones elásticas, lo que la haría aplicable en cierta medida en el régimen de alto ciclaje. El modelo de daño es bastante simple, lo que resulta en una evaluación semejante a la de la regla del daño lineal de Miner. Esto resulta en una aplicabilidad sencilla, aunque no permite observar algún punto de daño crítico en el material.

El modelo de Naderi y Khonsari es muy ventajoso, ya que permite distinguir un punto crítico en la evolución del daño que posibilita al usuario tomar una decisión anticipada. El modelo de Imanian y Modarres en simple, pero de comportamiento lineal. En cambio, si se quisiera emplear el modelo de Temfack y Basaran, se deben tomar precauciones, debido a que resulta en una evolución del daño bastante acelerada en los primeros ciclos de carga.

Naderi y Khonsari, probaron su modelo para ciertas secuencias de bloques de cargas. Temfack y Basaran solo probaron su modelo con cargas de amplitud constante. Por otra parte, Imanian y Modarres demuestran que el enfoque de daño con entropía es aplicable a escenarios con cargas más allá de las mecánicas; en su caso, someten una serie de probetas a cargas mecánicas y a corrosión a la vez.

Aunque los modelos de Temfack y Basaran y de Imanian y Modarres no se probaron para cargas de amplitud variable, incluyen un término para un estado inicial de daño. Si se cuantifica la acumulación de entropía tras cierta cantidad de ciclos a una carga dada, se podría emplear este valor para el estado inicial de un segundo bloque de cargas. Por lo tanto, sería útil extender el estudio en estos modelos para verificar su aplicabilidad en escenarios de carga de amplitud variable y con secuencias de bloques aleatorias.

6. CONCLUSIONES

El proceso de fatiga de los materiales es un fenómeno irreversible, en el que hay disipación de energía involucrada. Varios autores han planteado que este problema pueda ser tratado a partir de las leyes de la termodinámica. Específicamente, es la entropía el parámetro que se relaciona con irreversibilidades, en las que se involucran procesos disipativos. Los resultados obtenidos por los investigadores con estos modelos demuestran que la entropía es un parámetro prometedor para emplearse como índice de daño en procesos de fatiga.

La principal ventaja que tiene este enfoque es que se basa en leyes físicas, lo que permite un modelado teórico. Con esto, se deja atrás el enfoque tradicional que consiste en el ajuste de curvas a datos experimentales, el cual es un método muy arraigado en la comunidad científica e ingenieril.

En los estudios revisados se probaron escenarios de carga simples, con consideraciones para el cálculo de la entropía que no serían válidas para escenarios más complejos. Los métodos

energéticos pueden considerar los diversos procesos de degradación presentes durante la fatiga, tanto a macro, meso y microescala. Es necesario ampliar la aplicabilidad de estas metodologías a una mayor gama de materiales, más escenarios de carga donde se involucren amplitudes y frecuencias variables y aleatorias, cargas combinadas, diferentes geometrías con concentradores de esfuerzos, así como variar las condiciones ambientales y de temperatura de las pruebas, con el fin de emular situaciones de aplicaciones de ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

Víctor I. Rodríguez-Reyes manifiesta su reconocimiento y agradecimiento al CONACYT por la beca número 773824 otorgada para sus estudios doctorales.

REFERENCIAS

- Basaran, C., & Yan, C.-Y. (1998). A Thermodynamic Framework for Damage Mechanics of Solder Joints. *Journal of Electronic Packaging*, 120(4), 379–384. <https://doi.org/10.1115/1.2792650>
- Basquin, O. H. (1910). The exponential law of endurance tests. *American Society for Testing and Materials Proceedings*, 10, 625–630.
- Bryant, M. ., Khonsari, M. ., & Ling, F. . (2008). On the thermodynamics of degradation. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 464(2096), 2001–2014. <https://doi.org/10.1098/rspa.2007.0371>
- Cui, W. (2002). A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures. *Journal of Marine Science and Technology*, 7(1), 43–56. <https://doi.org/10.1007/s007730200012>
- Duyi, Y., & Zhenlin, W. (2001). A new approach to low-cycle fatigue damage based on exhaustion of static toughness and dissipation of cyclic plastic strain energy during fatigue. *International Journal of Fatigue*, 23(8), 679–687. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00027-5](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00027-5)
- Hajshirmohammadi, B., & Khonsari, M. M. (2020). On the entropy of fatigue crack propagation. *International Journal of Fatigue*, 133, 105413. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105413>
- Idris, R., Abdullah, S., Thamburaja, P., & Omar, M. Z. (2019). Prediction of Fatigue Crack Growth Rate Based on Entropy Generation. *Entropy*, 22(1), 9. <https://doi.org/10.3390/e22010009>
- Imanian, A., & Modarres, M. (2015). A Thermodynamic Entropy Approach to Reliability Assessment with Applications to Corrosion Fatigue. *Entropy*, 17(12), 6995–7020. <https://doi.org/10.3390/e17106995>
- Imanian, A., & Modarres, M. (2018). A thermodynamic entropy-based damage assessment with applications to prognostics and health management. *Structural Health Monitoring*,

- 17(2), 240–254.
<https://doi.org/10.1177/1475921716689561>
- Jang, J. Y., & Khonsari, M. M. (2018). On the evaluation of fracture fatigue entropy. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 96, 351–361.
<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.05.013>
- Khonsari, M. M., & Amiri, M. (2013). *Introduction to Thermodynamics of Mechanical Fatigue*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Lemaitre, J., & Chaboche, J.-L. (1990). *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139167970>
- Manson, S. S. (1962). Discussion: “Experimental Support for Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue” (Tavernelli, J. F., and Coffin, Jr., L. F., 1962, ASME J. Basic Eng., 84, pp. 533–537). *Journal of Basic Engineering*, 84(4), 537–541.
<https://doi.org/10.1115/1.3658702>
- Miner, M. A. (1945). Cumulative fatigue damage. *Journal of applied mechanics*, 12(3), A159–A164.
- Naderi, M., Amiri, M., & Khonsari, M. M. (2010). On the thermodynamic entropy of fatigue fracture. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2114), 423–438.
<https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0348>
- Naderi, M., & Khonsari, M. M. (2010a). An experimental approach to low-cycle fatigue damage based on thermodynamic entropy. *International Journal of Solids and Structures*, 47(6), 875–880.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.12.005>
- Naderi, M., & Khonsari, M. M. (2010b). A thermodynamic approach to fatigue damage accumulation under variable loading. *Materials Science and Engineering: A*, 527(23), 6133–6139. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.018>
- Naderi, M., & Khonsari, M. M. (2011). Real-time fatigue life monitoring based on thermodynamic entropy. *Structural Health Monitoring*, 10(2), 189–197.
<https://doi.org/10.1177/1475921710373295>
- Ontiveros, V., Amiri, M., Kahirdeh, A., & Modarres, M. (2017). Thermodynamic entropy generation in the course of the fatigue crack initiation. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 40(3), 423–434.
<https://doi.org/10.1111/ffe.12506>
- Paris, P., & Erdogan, F. (1963). A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. *Journal of Basic Engineering*, 85(4), 528–533. <https://doi.org/10.1115/1.3656900>
- Tavernelli, J. F., & Coffin, L. F. (1962). Experimental Support for Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue. *Journal of Basic Engineering*, 84(4), 533–537.
<https://doi.org/10.1115/1.3658701>
- Temfack, T., & Basaran, C. (2015). Experimental verification of thermodynamic fatigue life prediction model using entropy as damage metric. *Materials Science and Technology*, 31(13), 1627–1632.
<https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000074>
- Zakaria, K. A., Abdullah, S., & Ghazali, M. J. (2016). A Review of the Loading Sequence Effects on the Fatigue Life Behaviour of Metallic Materials. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 9(5), 189–200.
<https://doi.org/10.25103/jestr.095.30>

Diseño experimental para evaluar un calentador solar híbrido de escala industrial con monitoreo vía remota

Hernández- Martínez, J.A. y Flores-Prieto, J.J.

Tecnológico Nacional de México - CENIDET.

Int. Internado Palmira s/n, Cuernavaca, Morelos, México, ZIP 62490,

(e-mail: Jess.a5@hotmail.com, jose.fp@cenidet.tecnm.mx)

Resumen: En este documento se presenta el diseño experimental para evaluar la eficiencia térmica de un calentador solar híbrido de escala industrial para asistir a un secador por lotes de productos agrícolas. La evaluación de la eficiencia es asistida con monitoreo remoto continuo. El secador se ubica en el Parque Científico y Tecnológico de Xochitepec, Morelos. El calentador híbrido se compone por un sistema de calentamiento solar de aire directo (SCDA), con 16 colectores de aire de placa plana (37 m^2) y un sistema de calentamiento solar indirecto de aire (SCIA), con 16 colectores de placa plana (37 m^2) y almacenamiento de 2.5 m^3 . El SCDA trabaja durante las horas soleadas y el SCIA cuando la irradiancia es insuficiente, para extender las horas de trabajo con continuidad. El experimento basa en calorimetría de flujo, considera la calibración de los transductores y la instalación de la red de cableado. El sistema monitorea las temperaturas de operación, el flujo de agua y aire, la radiación solar, y las condiciones de temperatura y humedad ambiente. El monitoreo remoto es vía internet con registros a cada 30 s de manera ininterrumpida. El diseño experimental con monitoreo remoto continuo permitió generar un histórico de la energía útil del calentador híbrido en tiempo real, durante el tiempo del secado del lote de las 8:00-18:00 h. La eficiencia promedio diaria del sistema fue del $0.279 \pm 2.45\%$.

Palabras clave: Secado solar, calentamiento de aire solar, monitoreo remoto, calentador solar híbrido.

1 INTRODUCCIÓN

El secado es el proceso más antiguo conocido para la conservación de alimentos, y a la fecha, continúa siendo de los más importantes. El secado con energía solar implica un alto recurso energético, sin embargo, ya que como no siempre se cuenta con buena disponibilidad solar, el proceso de secado se orientó hacia el uso de combustibles fósiles que conllevan importantes efectos de contaminación ambiental, por lo que se ha dirigido nuevamente hacia el uso de formas de energía alternas o combinaciones energéticas (Del Pilar, 2018). Así, el secado solar resurge como una alternativa, donde la intermitencia natural de la radiación solar es el mayor reto para su desarrollo (Herrera, 2009). En este sentido, el almacenamiento térmico se presenta como alternativa para brindar mayor continuidad en el suministro energético.

Los secadores híbridos permiten disponer de energía en momentos no soleados para aumentar la continuidad en días nublados o durante la noche (Amer *et al.*, 2010). En la actualidad, el desarrollo de sistemas híbridos demanda un control cada vez más detallado, tendiendo hacia una inspección continua en cada operación unitaria (Gonzalo Durán, 2011). Buscando mayor competitividad comercial, el monitoreo remoto continuo permite el control, el mantenimiento y la seguridad operacional del sistema de secado solar mediante la adquisición, el análisis y

el procesamiento de datos de una manera más eficiente (López, 2011). En trabajos previos se ha reportado que brinda un progresivo rendimiento operativo y comercial (Logic, 2020). Con lo anterior, el presente trabajo aborda el diseño experimental para evaluar la eficiencia térmica de un calentador solar híbrido, para la deshidratación de productos agrícolas por lotes, asistido con monitoreo remoto continuo.

2 CALENTADOR SOLAR HÍBRIDO

La configuración del sistema híbrido de calentamiento solar (SHCS) se compone de un Sistema de Calentamiento Directo de Aire (SCDA) y un Sistema de Calentamiento Indirecto de Aire (SCIA). El SCDA está compuesto por 37 m^2 de captadores solares planos, que suministran aire caliente al túnel de secado con un ventilador centrífugo. El SCIA está conformado por dos circuitos: captación y de almacenamiento. El circuito de captación cuenta con 37 m^2 de colectores de placa plana y utiliza agua como fluido de trabajo. El circuito de almacenamiento tiene un taque térmico con capacidad de 2.5 m^3 de agua. El circuito calienta el aire con un intercambiador de calor agua-aire. El secador se encuentra ubicado en México, en el municipio de Xochitepec dentro del estado de Morelos, en el Parque Científico y Tecnológico de Morelos en las coordenadas 18.78°N y -99.23°O donde se cuenta con una radiación solar global promedio de $5.07 \text{ kWh/m}^2\text{-día}$.

En la **Figura 1** se muestra la configuración del sistema híbrido de calentamiento solar SHCS, que se compone del subsistema de calentamiento indirecto de aire SCIA, del subsistema de calentamiento directo de aire SCDA, y de la cámara de secado. El SCIA se conforma de colectores de agua con almacenamiento térmico donde un intercambiador de calor agua-aire permite el calentamiento del aire. El SHCS opera en tres modos: Calentamiento del almacenamiento térmico con calentamiento directo de aire, Calentamiento indirecto junto con calentamiento directo y Calentamiento Indirecto. La operación del sistema depende de las condiciones climáticas y de la temperatura de secado del producto. El SHCS recibe aire caliente del SCDA cuando existe suficiente irradiancia solar para alcanzar la temperatura de operación del secador, como se indica en la **Figura 1**. En el caso nocturno o muy nublado, el SCIA entrega la energía al aire de secado mediante un intercambiador de calor agua-aire. La combinación de los sistemas alarga el tiempo de operación de la cámara de secado.

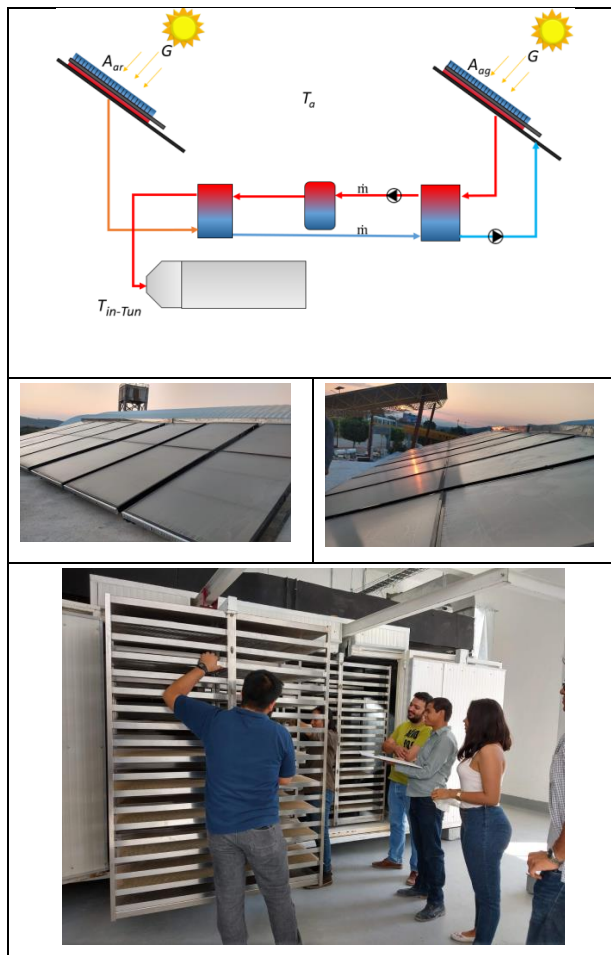


Fig 1. Sistema híbrido de calentamiento de aire solar.

3 CÁLCULO DE EFICIENCIA

La eficiencia del sistema híbrido de calentamiento solar se determina con la integración de la energía útil en la cámara de secado y la energía solar útil en los colectores, se emplea la irradiancia en los colectores G (W/m^2), el área de colección del SCDA A_{ar} , el área de colección del SCIA A_{ag} , la temperatura ambiente T_a , la temperatura de entrada a la cámara de secado T_{in-tun} y el flujo que circula a través de los colectores $\dot{m}$ (m/s), en el intervalo de tiempo de t_1 y t_2 . La eficiencia del sistema del SHCS η_{sc} , se evalúa con la **Ecuación 1**.

$$\eta_{sc} = \frac{Q_{in-tun}}{Q_{sol}} \quad (1)$$

donde Q_{in-tun} es la energía que proporciona el calentador híbrido a la cámara de secado y Q_{sol} es la energía solar que reciben los colectores de aire y agua.

$$Q_{in-tun} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{m} Cp [T_{in-tun}(t) - T_a(t)] dt \quad (2)$$

$$Q_{sol} = A_{ar} \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt + A_{ag} \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt \quad (3)$$

El tiempo de secado por lote va de t_1 a t_2 . Para el caso de estudio t_1 inició a las 8:00 h y finalizó en t_2 a las 18:00 h. La incertidumbre experimental determinó con el método de difusión de error (Domínguez-Muñoz *et al.*, 2012).

4 ESTRATEGIA DE MONITOREO

En la **Figura 2** se muestra la estrategia de monitoreo remoto propuesto para determinar la eficiencia del calentador de aire para el secado de manera remota.

El diseño experimental para el cálculo de la eficiencia del SHCS se realiza como se indica en la **Figura 2**. El registro de variables involucra la temperatura ambiente T_a , y radiación incidente G (W/m^2). En el SHCS se registra la temperatura de entrada al cámara desecado T_{in-tun} ($^{\circ}C$), el flujo que circula a través de los colectores $\dot{m}$ (m/s), y el tiempo final e inicial t_2 y t_1 .

En la estrategia de monitoreo se realiza una prueba del sistema general de los sensores para asegurar su funcionalidad, de no ser funcional, se vuelven a reconfigurar. El registro de las variables (T_a , G , T_{in-tun}) se hace a cada 30 s, en el periodo que se contempla el secado de un lote, de 8:00-18:00 h (10 h). La eficiencia del calentador que aporta la configuración energética híbrida se calcula con la **Ecuación 1**.

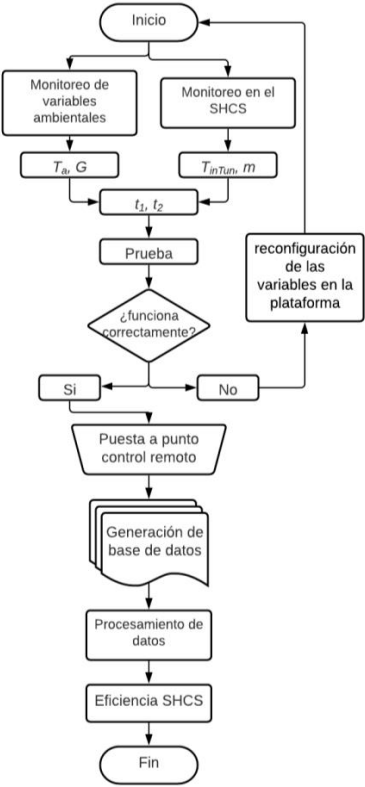


Fig 2. Estrategia experimental.

El monitoreo remoto se realiza con el software HP-VEE que tiene capacidad de transmitir vía internet las variables registradas en las entradas-salidas de los componentes del sistema como se muestra en la **Figura 3**. La configuración permite la realización de los balances de energía y masa en cada componente y en cada subsistema, ya sea el de captación solar directa o indirecta.

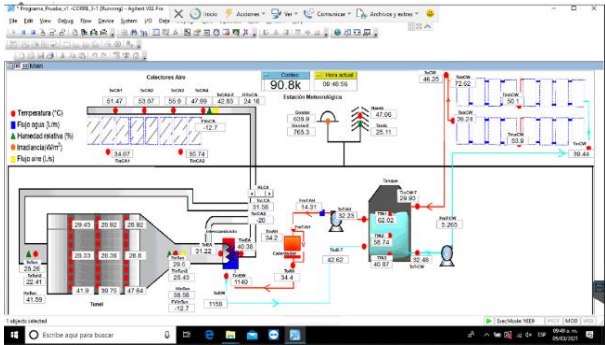


Fig. 3. Plantilla de monitoreo.

5 INSTRUMENTACIÓN

La plataforma de monitoreo se basa en un adquisidor de datos Keysight 34980A, opera con 22 bits y 8 puertos para módulos multiplexores. Para el propósito se utiliza un módulo multiplexor 34922A y un módulo 34921T. El sistema tiene la capacidad de monitorear señales de entrada de voltaje, corriente, frecuencia y resistencia. Los sensores utilizados son: treinta y tres detectores de temperatura resistiva (RTD) tipo PT100 (para medir las temperaturas de entrada y salida de cada componente) y veintidós RTD tipo PT1000 (para medir temperaturas al interior de la cámara de secado), dos sensores de frecuencia para el flujo de agua tipo turbina FTB1423 en cada uno de los circuitos de las bombas, dos transmisores de velocidad de aire a la salida del banco de colectores de aires y a la entrada del túnel de secado y cinco sensores para humedad relativa y temperatura (ambiente, entrada y salida de los colectores de aire, en el ducto de entrada y a la salida de la cámara de secado) y un piranómetro. En la **Tabla 1**, se muestran las variables que mide cada sensor, el intervalo de trabajo y la incertidumbre.

Tabla 1. Instrumentación del CHCS.

Variables	Símbolo	Intervalo	Incertidumbre
Temperatura ambiente	T _a	0-100 °C	±0.1 %
Radiación solar	G	0-1300 W/m ²	±3 %
Flujo aire en entrada de secador	m	0-50 m/s	±2 %
Temperatura de entrada al túnel de secado	T _{in-Tun}	-60 a +200 °C	±0.1 %

6 RESULTADOS

La prueba de eficiencia del calentador de aire híbrido fue para un periodo para un lote de producto. El SCIA se precalentó un día antes, operó de las 12:30-18:30 h (11/03/21), también operó de las 10:00-16:00 h el día de trabajo (12/03/21). El SCDA operó al igual que el suministro de aire caliente al túnel de secado, que fue de las 8:00-18:00 h (12/03/21), como se indica en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Condiciones ambientales durante la prueba.

Entrada	Intervalo de pruebas
MM/DD	12/03/21
HH/MM- HH/MM	8:00-18:00 h
Irradiación máxima	929 W/m ²

En la **Figura 4** se muestra el histórico de las condiciones climáticas de T_a y G . Como se presenta en la figura, se trabajó con cielo claro. La temperatura ambiente promedio del día de precalentamiento fue de 29°C y del día de trabajo de 26°C .

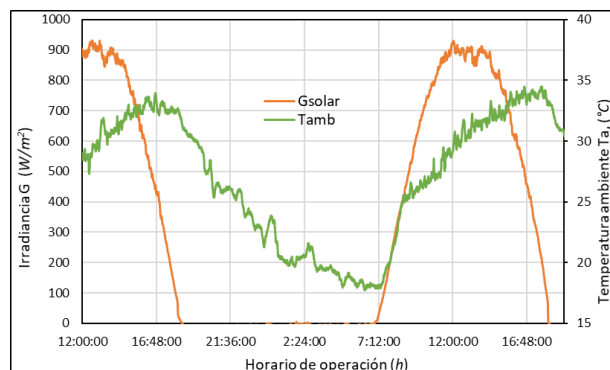


Fig. 4. Condiciones climáticas.

En la **Figura 5** se muestra que el SCIA el día de precalentamiento y de trabajo de secado recibió una potencia solar semejante en las horas de operación con un total de 39.9 MJ . Por su parte el SCDA durante el día de trabajo de secado recibió en total 30.8 MJ . De acuerdo a la forma en que se operó, la energía útil de calentamiento de aire en el día de trabajo de secado fue de 19.7 MJ . Con lo anterior, de acuerdo a la **Ecuación 1**, la eficiencia del sistema híbrido fue del $0.279 \pm 2.45\%$. El resultado es concordante reportes de evaluación de calentamiento solar de aire solar, donde la eficiencia oscilan entre 0.22 y 0.35 de acuerdo a (Barki E. *et al.*, 2012; Boughali S. *et al.*, 2009; Flores-Prieto *et al.*, 2014; Murali S. *et al.*, 2020; Pérez-Espinoza *et al.*, 2019).

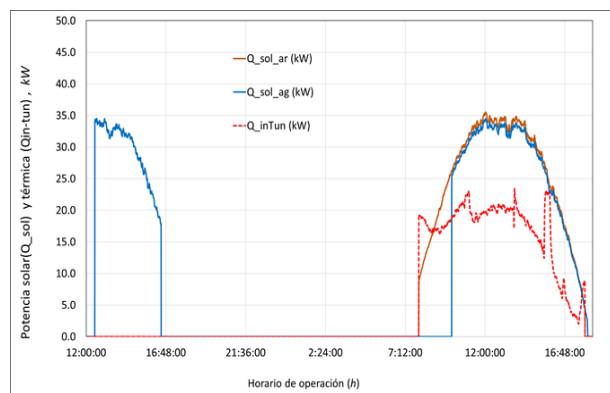


Fig. 5. Histórico de flujos de energía.

También, en la **Figura 5** se puede observar que la eficiencia del SHCS depende considerablemente de la forma en que se opera el sistema. Es de observar que se puede mejorar utilizando

la energía almacenada en el SCIA, operando el sistema durante dos o tres horas antes de finalizar el tiempo de secado; esto en razón de que durante el ocaso se operó únicamente de manera momentánea en espacios de tiempo de 30 y 20 min a las 15:30 h y 16:00 h respectivamente.

7 CONCLUSIONES

Es de resaltar que el diseño experimental permite recolectar y almacenar los datos requeridos para determinar el desempeño del sistema de calentamiento solar híbrido de manera remota. El diseño experimental permite evaluar la eficiencia térmica de un calentador solar híbrido de escala industrial, con monitoreo remoto continuo de las variables ambientales y parámetros de operación. La eficiencia se determina mediante calorimetría de flujo generando un histórico de los flujos de energía involucrados en la operación por lotes del sistema. La energía que es suministrada durante el periodo de precalentamiento y trabajo del sistema fue de 70.7 MJ , mientras que la energía útil en el calentamiento de aire de secado fue de 19.7 MJ , permitiendo así una eficiencia del $0.279 \pm 2.45\%$. El manejo de la información de manera remota se contempla que permitirá optimizar el desempeño del sistema considerando las condiciones de operación.

8 REFERENCIAS

- Amer B. M. A., Hossain M. A., Gottschalk K., (2010). Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana, *Energy Convers. Manag.*, 51, (4), 813–820, doi: 10.1016/j.enconman.2009.11.016.
- ANSI/ASHRAE 93-1986, Method of Testing to Determine the Thermal Performance of solar Collectors, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 1993.
- Barki E., Ibrahim J. S., Eloka-Eboka A. C. (2012). Performance Evaluation of an Efficient Solar Dryer with a Backup Incinerator for Grated Cassava under Makurdi Humid Climate. *International Journal of Environment and Bioenergy*, 1(2): 131-139. ISSN: 2165-8951.
- Boughali, S., Benmoussa, H., Bouchekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., & Bechki, D. (2009). Crop drying by indirect active hybrid solar - Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar Energy*, 83(12), 2223–2232. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.09.006>.
- Del Pilar, M.M (2018). *México se constituye como una potencia en producción de alimentos, 2018 tendrá 3%*. [en línea] El Economista. Disponible en: <<https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Mexico-se-constituye-como-una-potencia-en-produccion-de-alimentos-2018-tendra-3-20180322-0061.html>> [Revisado 9 February 2021].

- Desaleng A. (2019). Thesis: Design, construction, experimental investigation and performance evaluation of indirect forced convection solar ginger dryer. Bahir Dar, Ethiopia. <http://hdl.handle.net/123456789/10410>.
- Domínguez-Muñoz, F., Cejudo-López, J. M., Carrillo-Andrés, A., & Ruivo, C. R. (2012). *Design of solar thermal systems under uncertainty. Energy and Buildings*, 47, 474–484. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.031>
- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems III: Low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 657–667. doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00094-6.
- FAO, (2015). Iniciativa mundial sobre la reducción de la pérdida y el desperdicio de alimentos. <http://www.fao.org/3/a-i4068s.pdf>.
- Flores-Prieto J. J., Aguilar-Castro K. M., Baltazar-López M. E, G. Alvarez, Castillo-Rincón R. and Bahena-Bustos J. C. (2014). Indoor indirect solar dryer for ceramic craft industry, *Journal of Mechanical Science and Technology* 28 (1) 349-356. DOI 10.1007/s12206-013-0974-1.
- López G., Fernández Llebraz F. y Villanueva M. (2008). Fomento activo de la energía solar: consideraciones sobre las instalaciones solares activas. *Planeamiento urbanístico. Era Solar: Energías renovables*, 142, 60-63.
- Murali S., Amulya P. R., Alfiya P. V., Delfiya D. S. A., Samuel M. P.,(2020). Design and performance evaluation of solar - LPG hybrid dryer for drying of shrimps, *Renewable Energy*, 147, 2417– 2428. doi: 10.1016/j.renene.2019.10.002.
- Pérez-Espinosa, R., García-Valladares, O., O., Pilatowsky, I., (2019). Numerical modeling and experimental validation of back-pass rectangular ducts solar air heaters, submitted to *Applied Thermal Engineering*, Part 1: Direct Air Heating System, *Renewable Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.069>.
- Subcomité de Calentadores Solares; del comité Técnico de Normalización Nacional para Energía solar, NESO-13, Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S.C, NORMEX, Centro de Investigaciones de Energía, CIE-UNAM, Grupo Ovonic, Heliocol de México, IIC-Universidad de Guanajuato. PROY-NMX-001-NORMEX-2005, *Energía solar, Rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares para calentamiento de agua- Métodos de prueba y etiquetado*, Febrero, 2005.
- Váquiro, H.H. (2009). *Contribución al estudio y optimización del secado intermitente: aplicación al secado de mango (mangifera indica l var. tommy atkins)* Universidad politécnica de Valencia (34-36).

Propuesta de alimentación energética de una cámara de deshidratación mediante sistemas FVT

V. Flores. J. Bedolla. J. M. Cruz. M. Bedolla

Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Apizaco, Carretera Apizaco-Tzompantepec, esquina con Av. Instituto Tecnológico S/N C.P.90300, Conurbado Apizaco-Tzompantepec, Tlaxcala, (e-mail:f117u2@yahoo.com)

Resumen: Se estudia la capacidad de generación energía de un sistema híbrido fotovoltaico-térmico (FVT) como parte de un deshidratador solar, se construyó el sistema FVT a partir de un módulo fotovoltaico de 250 W y el acoplamiento de aletas tipo L con canal rectangular en su superficie posterior, se ensayó para evaluar su capacidad de retirar calor del panel fotovoltaico. Se construyó un deshidratador solar alimentado por la energía de un sistema híbrido y por la absorción de la radiación solar en la cámara de deshidratación, con el propósito de hacer el análisis de las condiciones termofísicas que se generan en el interior de la cámara del deshidratador en vacío. Los resultados son: la recuperación de energía térmica entre 1600 Wt y 2200 Wt en las mejores condiciones climáticas, suficiente para la demanda de energía en la cámara de deshidratación ya que, en el interior de la cámara predomina una humedad específica entre 3.4 g/kg y 6.5 g/kg de aire seco, la temperatura promedio es de 48.8°C, la humedad relativa se encuentran en el rango de 7% a 20.6%, con entalpías de 63.93 kJ/kg. Se concluye que las propiedades termofísicas del aire en el interior de la cámara son propicias para el proceso de deshidratación

Keywords: energía, térmico, cámara, deshidratación.

1. INTRODUCTION

Los paneles solares, permiten ser rediseñados para crear sistemas híbridos térmicos fotovoltaicos, y generar dos formas de energía, la eléctrica, función del panel fotovoltaico, y la térmica, función del sistema que se agrega al panel, a través de interactuar el panel con un fluido de transferencia de calor. Se han estudiado técnicas de remoción de calor desde la superficie del módulo fotovoltaico, entre ellas, el doble paso del flujo de aire a través de la superficie superior y posterior del módulo Ahmer et al. (2015). Se han propuesto sistemas híbridos acoplando aletas, obstrucciones o haciendo rugosa la superficie del canal, en donde se busca mejorar la transferencia de calor entre el panel y un fluido de trabajo, para lo cual las variables de estudio son, flujo másico, diámetro hidráulico, caídas de presión o factor de fricción, así como la geometría de las aletas, dimensiones y configuración entre ellas. El mayor problema que reportan está relacionado con la adherencia de las aletas u obstrucciones al panel por la posibilidad de generar un daño a su superficie, la técnica consiste en adherir aletas a una lámina metálica y ésta se adhiere a la superficie posterior del módulo; pero la transferencia de calor es baja debido a que las aletas no están en contacto directo con la superficie del módulo, Fakoor et al. (2011), Sarhaddi et al. (2010). Los sistemas híbridos que trabajan con aire como fluido de transferencia de calor, se les ha dado aplicación para la calefacción de espacios, también se han hecho estudios para aplicarse en el secado de frutas, sin embargo, no se han logrado las condiciones térmicas estables del aire para

mantener el proceso, Banabrook and Sproul (2012). Lo anterior ha conducido a investigar geometrías de cámaras de deshidratación considerando las variables climáticas; ya que; la presión atmosférica, la radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura ambiente son parámetros que gobiernan el proceso Ekechukwu and Norton (1999). Las condiciones internas también han sido consideradas en las investigaciones, como el régimen de flujo interno, distribución de las charolas que contienen el producto, tipo de producto, cantidad de producto, entre otras, Cruz, (2018). En este trabajo a partir de estudios teóricos y experimentales se estudian las condiciones termofísicas generadas en el interior de la cámara de deshidratación cuando es alimentada energéticamente por un sistema híbrido fotovoltaico térmico, tanto térmica a través de aire caliente, como eléctrica a través del panel fotovoltaico.

2. MARCO TEORICO

2.1. Balance de energía en el sistema fotovoltaico térmico

La energía solar que incide sobre la superficie del panel fotovoltaico se fracciona en absorbida y en reflejada ($G = \alpha G + \rho G$) cantidades que dependen de la propiedad óptica de absorción y reflectancia respectivamente. De la fracción absorbida un porcentaje provoca el aumento de la energía interna del panel, manifestándose como aumento de su temperatura, la cual da origen a la emisión de radiación desde la superficie del

panel fotovoltaico hacia el ambiente y al efecto convectivo en la misma dirección, considerándose estas como pérdidas de energía. En el esquema de la figura 1 se muestra lo descrito anteriormente y su correspondiente balance de energía en (1).

$$\alpha G = \Delta U + Q_L + E_e \quad (1)$$

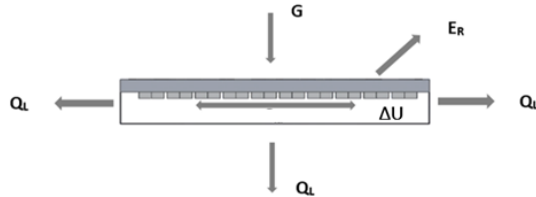


Fig. 1. Formas de energía interactuando en un panel fotovoltaico.

Donde, G es la energía solar que incide sobre el panel fotovoltaico, Q_L es la energía que se pierde a través de las paredes al ambiente por convección y radiación, ΔU es el aumento de energía interna en el panel fotovoltaico y E_R la componente de la energía reflejada por la superficie del panel fotovoltaico

La transferencia de calor desde la superficie posterior del módulo hacia el fluido, se determina mediante la ecuación del calor sensible y si se considera la convección como el mecanismo de transferencia de calor predominante, la siguiente igualdad puede emplearse.

$$Q_u = \dot{m} c_p (T_s - T_{en}) = h A_{sp} (T_p - T_f) \quad (2)$$

Donde $\dot{m}$, es el flujo másico (kg/s); c_p , calor específico (kJ/kg K); T_s , temperatura de salida (°C); T_{en} , temperatura de entrada (°C); h , coeficiente convectivo (W/m²K); A_{sp} , superficie posterior del módulo (m²); T_p , temperatura de superficie posterior del módulo (°C); T_f , temperatura del fluido (°C).

El balance de energía para un panel fotovoltaico se expresa como la energía solar absorbida por el panel, igual a la pérdida de energía que se transfiere desde la superficie frontal, más la energía térmica que se transfiere desde la superficie posterior del panel al ambiente, más la energía eléctrica, lo anterior en forma de ecuación:

$$\alpha_c \beta_m G A_m = U_{sa} (T_c - T_a) A_m + U_{pa} (T_{sp} - T_a) A_m + \beta_m \eta_c I_t A_m \quad (3)$$

Donde α_c , absorptividad de la celda; β_m , factor de empaquetamiento del módulo; A_m , superficie del módulo fotovoltaico; U_{sa} , coeficiente global de transferencia de calor, desde la superficie frontal del módulo al ambiente; U_{pa} : coeficiente global de transferencia de calor, desde la superficie posterior del módulo al ambiente; T_c , temperatura de operación del panel solar; T_a , temperatura ambiente; η_c , eficiencia de la celda; T_{sp} , temperatura de la superficie posterior del panel solar.

2.2. Comportamiento térmico del sistema

Las ecuaciones que gobiernan el desempeño térmico del sistema de remoción de calor se presentan a continuación. La energía térmica útil que gana el aire al pasar a través del panel

$$Q_u = \dot{m} c_p \Delta T_c \quad (4)$$

Donde, $\dot{m}$: flujo másico de aire a través del panel (kg/s) c_p : calor específico del aire (J/kg °C), ΔT_c : diferencia de temperaturas del aire a través del panel (°C)

La eficiencia térmica instantánea del sistema de remoción de calor se obtiene mediante (5), Kabee et al. (2016).

$$\eta_{ins} = \frac{Q_u}{G A_p} \quad (5)$$

Donde A_p : área de captación solar (m²), G : radiación solar incidente sobre la superficie del panel (W/m²)

El coeficiente de transferencia de calor convectivo entre el fluido y la superficie posterior del panel solar, Kabee et al (2016).

$$h = Q_u / A_p (T_{pm} - T_{am}) \quad (6)$$

Donde Q_u : calor útil recuperado por el aire (W), T_{pm} : temperatura promedio de la superficie posterior del panel solar (K), T_{am} : temperatura promedio de aire a través del panel (K).

La eficiencia diaria del sistema de remoción de calor se define como la relación entre el calor acumulado que gana el aire entre la energía solar acumulada que incide sobre la superficie del panel, a través del día, la cual se expresa por (7), Kabee et al (2016).

$$\eta_{da} = \frac{\sum Q_u}{\sum A_p G} \tag{7}$$

3. MATERIALES Y METODOS

Se estudiaron tres configuraciones de sistemas térmicos de remoción de calor, los cuales se muestran en Tabla 1. Las pruebas se realizaron en la región del altiplano orientando el sistema Norte-Sur e inclinación fija de 19 grados, equivalente a la latitud del lugar. Condiciones climáticas predominantes de: temperatura ambiente 23°C, velocidad del aire 2.2 m/s, humedad relativa 46%, radiación solar 838 W/m². Condiciones internas: flujo forzado con velocidad entre 1.5 m/s y 3 m/s mediante un ventilador axial de 20W, alimentado por el mismo panel fotovoltaico, la temperatura del aire en la entrada se consideró la del aire ambiente. En (fig. 2) se muestra el sistema FVT experimental.

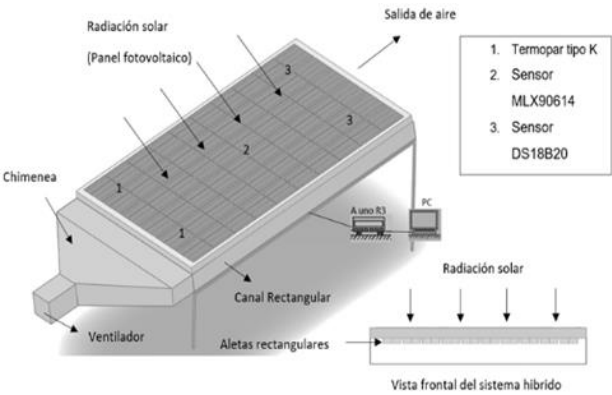


Fig. 2. Esquema experimental de panel con sistema térmico (sistema híbrido)

Tabla1. Características de las tres configuraciones experimentales.

Configuración	Número de aletas	Dimension de aletas	Disposición
 1	95	Ancho: 0.04m Largo: 0.05m Distancia transversal: 0.09m Distancia longitudinal: 0.11m	Alternada Aleta Larga (AL)
 2	55	Ancho: 0.035m Largo: 0.04m Distancia transversal: 0.15m Distancia longitudinal: 0.16m	Alternada Aleta Corta (AC)
 3	39 15 largas 24 cortas	Aletas largas: 0.15mx0.04m Aletas cortas: 0.05mx0.04m	Alternada-diagonal Aleta en Diagonal (AD)

3.1. Sistema fotovoltaico térmico

Las tres configuraciones de sistemas térmicos se estudiaron para seleccionar el de mejor desempeño en la remoción de calor en el panel, su comportamiento se representa con base en el calor útil generado, como se muestra en (fig. 3), siendo el promedio, Qu-AL =685.77 W, Qu-AC =1027.29 W y Qu-D = 1606.03 W; para aleta larga, aleta corta y aleta en diagonal respectivamente.

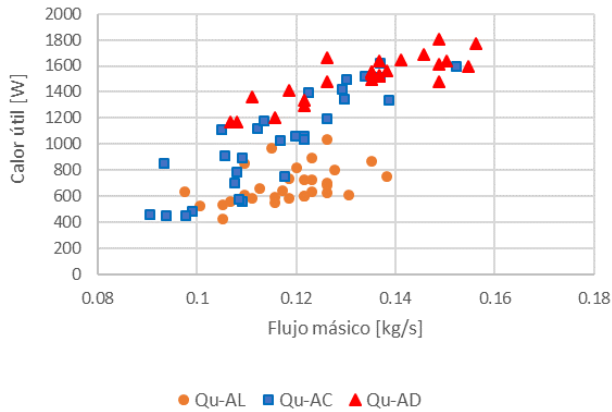


Fig. 3. Calor removido por las tres configuraciones de sistemas térmicos

Las cantidades graficadas en la figura anterior prueban que el sistema con mayor capacidad de remoción de calor, es aquel que incluye las aletas dispuestas en diagonal, la cantidad de calor removido es mayor a 1100 W y en el mejor caso 1800 W, para pruebas realizadas con flujo másico entre 0.113 kg/s y 0.156 kg/s, en este mismo rango de flujo, la configuración de aletas largas remueve calor entre 600 W y 900 W; en el caso de aletas

cortas 600 W y en el mejor caso 1500 W, este último valor se obtiene con flujo másico de 0.135 kg/s. También se observa que el rango de flujo másico en el que operan tanto la configuración de aletas largas como cortas es menor que con el que opera la configuración de aletas en diagonal, a lo cual se atribuye su capacidad de remoción de calor.

En este contexto, el desempeño de las 3 configuraciones de aletas con base en el gradiente térmico obtenido entre la entrada y salida del aire a través del panel, se presenta en (fig. 4). Para esta prueba, el flujo másico fluctuó entre 0.1 kg/s y 0.15 kg/s. Para el caso de la configuración 1 se logra un gradiente promedio de 6°C, mostrando su mejor desempeño con un flujo másico de 0.12 kg/s, las aletas largas es la configuración que muestra mayor estabilidad que las otras configuraciones. Para el caso de la configuración 2, el comportamiento es más inestable como se observa en la figura, ya que el flujo másico fluctúa entre 0.09 kg/s y 0.14 kg/s y el gradiente térmico que se logra se encuentra entre 5°C y 11°C. En cuanto al gradiente térmico que se obtiene con la configuración 3, aletas en diagonal, es más estable con un valor promedio de 11°C, mientras el flujo másico se mantiene entre 0.115 kg/s y 0.15 kg/s, a partir de lo cual, se considera un mejor desempeño para las aletas en diagonal.

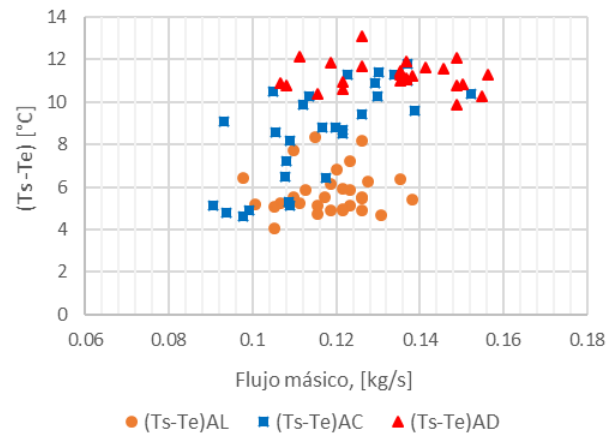


Fig. 4. Gradiente térmico provocado al fluido de trabajo en cada configuración de sistema térmico.

Los parámetros de mayor influencia en el comportamiento del sistema híbrido, son la radiación solar y el flujo másico. En particular para la configuración con aletas en diagonal se muestra a continuación en forma gráfica su desempeño térmico, (fig. 5).

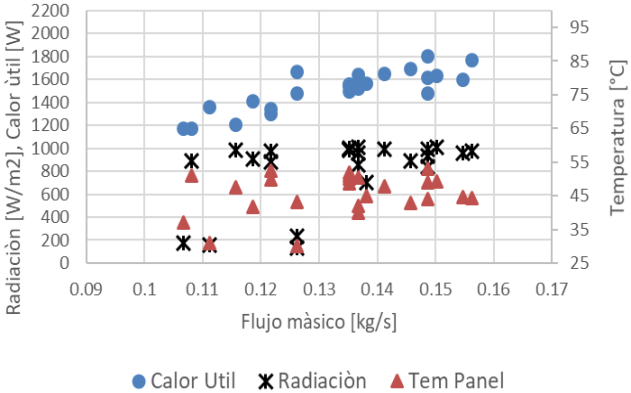


Fig. 5. Desempeño térmico, configuración con aletas en diagonal

Adicionalmente, en Tabla 2 se presentan parámetros representativos promedio del desempeño de las tres configuraciones, en condiciones de operación similares. El flujo másico es el parámetro que mayor influencia presenta comparado con el gradiente térmico, en el valor del calor útil; el sistema térmico con la configuración en diagonal logra mayor eficiencia térmica.

Tabla 2. Desempeño de las tres configuraciones.				
Configuración con:	Radiación [W/m²]	Flujo másico [kg/s]	Calor útil removido [W]	Eficiencia global [%]
Aleta larga	881	0.12	713	48
Aleta corta	816	0.1225	1039	77
Aleta en diagonal	957.56	0.1125	1470	88

3.2. Cámara de deshidratación

La cámara de deshidratación, figura 6, se propuso a partir de un estudio térmico y de dinámica de fluidos [6], buscando una distribución homogénea de temperatura y de flujo de fluidos, sus dimensiones se consideran para una capacidad de deshidratar entre 8kg y 10 kg de producto, mediante tres bandejas extraíbles de malla de alambre, de diferentes dimensiones, resultado de la simulación, donde se buscó obstruir en lo menor posible el flujo de aire; para la primera, colocada en la parte inferior, de 0.15 m de ancho y 0.99 m de largo, la segunda, colocada en el centro, de 0.20 m ancho y 0.99 m de largo y la tercera colocada en la parte superior de 0.25 m de ancho y 0.99 m de largo. Las bandejas descansan en el interior de la cámara de deshidratación sobre

barras de aluminio, permitiendo su deslizamiento para la alimentación de producto que se desee deshidratar

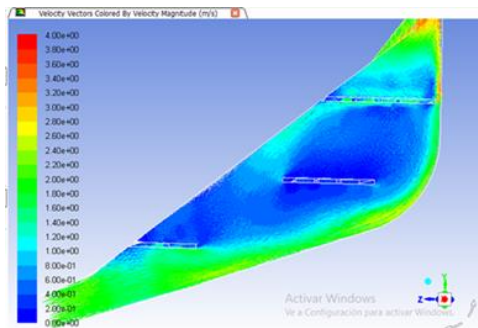


Fig. 6. Geometría de la cama de deshidratación

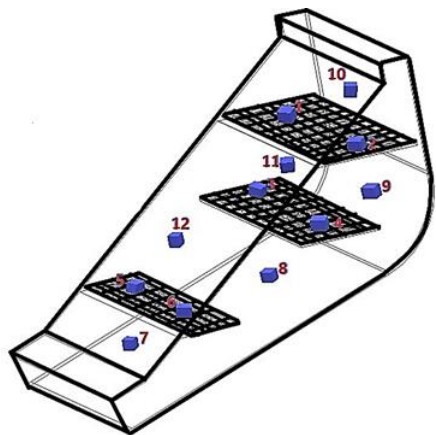


Fig.8. Distribución de sensores en la cámara de deshidratación



Fig. 7. Deshidratador solar

En Fig. 7, se muestra el sistema de deshidratación con panel fotovoltaico térmico de aletas en diagonal.

Tabla 3. Campo de temperatura en convección forzada y convección natural

Números de sensores	Temperatura °C (Convección Forzada)	Temperatura °C (Convección Natural)
1	50.7	61.95
2	52.009	56.744
3	51.764	58.369
4	51.045	64.815
5	47.057	44.552
6	45.16	55.892
7	40.6	50.877
8	48.818	54.585
9	53.264	60.65
10	56.54	58.094
11	44.63	56.93
12	47.58	47.96

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Deshidratador solar con panel fotovoltaico térmico

Se experimentó el sistema de deshidratación con flujo forzado y flujo natural sin producto a deshidratar, registrándose las temperaturas en doce puntos del interior de la cámara, se situaron tres charolas y en ellas sensores como puntos de interés, (Fig. 8), Tabla 3. La base de la lámina es metálica con recubrimiento en color negro, por lo que también existe generación de calor por la absorción de la radiación solar.

Las temperaturas en las charolas inferior, media y superior, en flujo forzado son, 51.3°C, 51.4°C y 46.1°C respectivamente y en flujo natural 59.34°C, 61.59°C y 50.22°C respectivamente; condiciones propicias para deshidratar. A continuación, en la carta Psicométrica se fijan las variables climáticas de la región, así como, la zona de operación del sistema solar de deshidratación marcada en azul (Fig. 9). Se puede apreciar el proceso que sigue el aire atmosférico hasta quedar en las condiciones de deshidratación, en el interior de la cámara. La temperatura del aire, pasa de 24°C a 52°C, la humedad relativa de 23.41% a 7.9%, la entalpia de 43 kJ/kg a 64.5 kJ/kg y el contenido de humedad de 4.8 g/kg a 4.2 g/kg de aire seco.

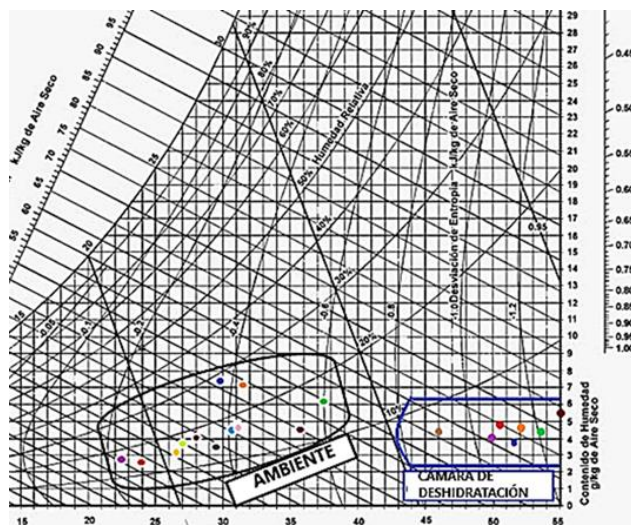


Fig. 9. Condiciones generadas en el interior de la cámara de deshidratación, en comparación con las ambientales.

5. CONCLUSIONES

Se construyó y evaluó el comportamiento térmico de tres configuraciones de sistemas de remoción de calor. El sistema con aletas en diagonal, permite trabajar con mayores flujos máscicos, generando mayor calor útil. Lo anterior se determinó de forma experimental. Mediante análisis numérico se propuso la geometría de una cámara de deshidratación, con la que se obtiene distribución de temperaturas y flujo de aire en el interior de la cámara buscando homogenizar los parámetros anteriores. A partir de lo anterior, se construyó la cámara de deshidratación. Se hizo el acoplamiento de la cámara de deshidratación con el sistema fotovoltaico térmico y se experimentó en diferentes condiciones establecidas por las variables climáticas y de parámetros de operación del sistema, principalmente, el flujo máscico, lo anterior para conocer si el sistema FVT proporcionaría la energía suficiente para llevar a cabo el proceso de deshidratación. Con los ensayos con flujo natural y forzado, se obtuvieron campos de temperaturas y las características termofísicas del aire se mostraron en la carta Psicrométrica; a partir de ello se concluye que un sistema híbrido fotovoltaico térmico puede satisfacer las necesidades energéticas tanto térmicas como eléctricas para generar las condiciones térmicas que demande el proceso de deshidratación con las condiciones climáticas de la región en cuestión, hipótesis que deberá comprobarse en trabajos futuros al operar el sistema de deshidratación con producto.

REFERENCIAS

- Ahmer A. B., Haitham M.S., Al-Sulaiman F.A., (2015), Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling, *Energy Conversion and Management*, 103, 14-27.
- Fakoor P. M., Lashkari A., Basirat Tabrizi H., Hosseini R., (2011), Performance evaluation of a natural-convection solar air-heater with a rectangular-finned absorber plate, *Energy Conversion and Management*. – 52, 1215-1225.
- Sarhaddi F., Farahat S., Ajam H., Behzadmehr A., (2010), Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, *Energy and Buildings* 42, 2184–2199.
- Bambrook S. M., Sproul A.B., (2012) Maximising the energy output of a PVT air system, *Solar Energy* 86, 1857–1871.
- Ekechukwu O. V.; Norton B.; (1999), Review of solar-energy drying systems II: An overview of solar drying technology, *Energy Conversion & Management*. 40, 615-655.
- Cruz J. M., (2018) Propuesta de cámara de deshidratación a partir de la energía entregada por un sistema solar híbrido, Tesis de maestría, Tecnológico nacional de México/Instituto Tecnológico de Apizaco, México.
- Kabee A.E., Khalil A., Shalaby S.M., Zayed M.E., (2016), Experimental investigation of thermal performance of flat and v-corrugated plate solar air heaters with and without PCM as thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 113, 264-272

REDES SOCIALES TecNM / CENIDET



@TecNMCenidet.mx



Cenidet



cenidet_oficial



CENIDET



<https://cenidet.tecnm.mx/>