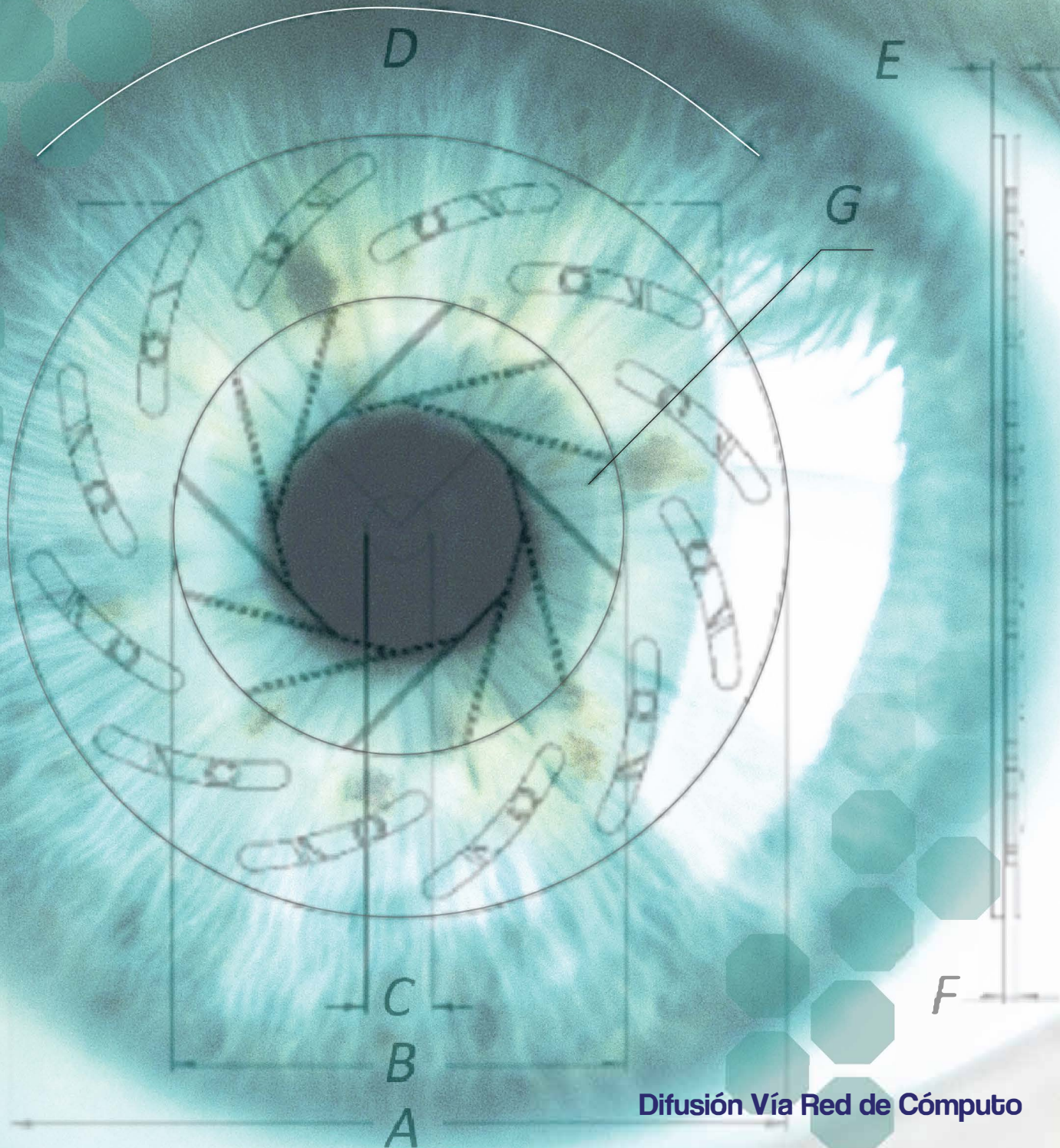


TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Julio - Diciembre 2020

Vol. 3 / Núm. 2

ISSN: En trámite



Difusión Vía Red de Cómputo



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO®

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA

VOLUMEN 3, NÚMERO 2, Julio - Diciembre 2020.

ISSN: En trámite.

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

Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada, Volumen 3, Núm. 2, Julio - Diciembre 2020, es una publicación semestral, publicada y editada por el Tecnológico Nacional de México dependiente de la Secretaría de Educación Pública, a través del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Avenida Universidad No. 1200, 5to. Piso, Colonia Xoco, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, Ciudad de México, México, Tel. + (52) 5536002500. Ext. 65064, d_vinculacion05@tecnm.mx, Editora Responsable M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2019-0222612512500-2013, ISSN: En trámite, ambos son otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino, docente del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Colonia Palmira, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 62490, Tel. +(52) 777 362 7770, fecha de término de última actualización, 4 de diciembre de 2020.

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

Para su publicación los artículos son sometidos a arbitraje, su contenido es de la exclusiva responsabilidad de los autores y no representan necesariamente el punto de vista de la Institución.

Las publicaciones de los artículos son sometidas a revisión por un comité de arbitraje y el contenido es responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

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

Directorio

Dr. Enrique Fernández Fassnacht
Director General del Tecnológico Nacional de México (TecNM)

Dra. Yesica Imelda Saavedra Benítez
Directora del TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET)

Dr. 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. Guadalupe Madrigal Espinosa
Jefe de la Oficina de Transferencia de Tecnología del TecNM/CENIDET

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

Dr. 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

El Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), ha tomado acciones concretas para continuar la publicación electrónica semestral de la Revista Académica 'Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada', un espacio que compila los artículos aprobados y presentados en las áreas de Ciencias Computacionales, Ingeniería Electrónica e Ingeniería Mecánica.

En esta ocasión la revista Julio-Diciembre 2020, Volumen 3, Número 2 contiene 30 artículos que provienen de estudiantes de maestría, doctorado, así como de profesores-investigadores de más de 15 instituciones nacionales públicas y privadas como: el TecNM/CENIDET en Cuernavaca, Morelos; el TecNM campus Tlalpan, Ciudad de México; el TecNM campus Matamoros, Tamaulipas; el TecNM campus del Istmo, Oaxaca; el TecNM campus Pachuca en Hidalgo; el TecNM campus Tuxtla Gutiérrez en Chiapas; el TecNM campus Hermosillo, Sonora; el Centro de Innovación y Desarrollo Agroalimentario de Michoacán, la Universidad Veracruzana, el Instituto Politécnico Nacional Zacatenco, Ciudad de México; la Universidad Autónoma del Estado de Baja California y el CIATEQ-Conacyt en San Luis Potosí, entre otras, así como de instituciones internacionales como el Laboratorio de Automatización de Caen en Francia.

Cada artículo plasma los resultados de investigación y desarrollos tecnológicos, relacionados con las 3 áreas académicas del CENIDET, las cuales además de ser relevantes por la calidad de sus contenidos, tienen un impacto en la sociedad.

Desde el inicio de la publicación electrónica el arbitraje de cada artículo es revisado por expertos en las áreas que indica la Convocatoria, con prestigio y reconocimiento de las Instituciones Educativas y de Investigación de donde provienen.

En este número participaron en el Comité Técnico el Dr. Andrés Blanco Ortega, quien también fungió como Coordinador General de la 5.a. Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada; el Dr. Arturo Abúndez Pliego, el Dr. Jesús Darío Mina, el Dr. Abraham Claudio Sánchez y el Dr. Manuel Mejía Lavalle, a quienes se les agradece su compromiso y apoyo.

Finalmente, agradecemos a los académicos del CENIDET y a los externos, el arbitraje que realizaron a los artículos científicos de este ejemplar electrónico, con el objetivo de presentar trabajos de calidad; cuidando aspectos de edición, contenido, citas, referencias, así como sugiriendo aspectos de interés que fortalezcan el texto del autor con rigor científico y ética.

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Editora

JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA

Comité de Arbitraje TecNM/CENIDET

Ciencias Computacionales

Dra. María Yasmín Hernández Pérez
Dra. Alicia Martínez Rebollar
Dr. Javier Ortíz Hernández
Dra. Olivia Graciela Fragosó Díaz
Dr. Manuel Mejía Lavalle

Ingeniería Electrónica

Dra. Susana Estefany de León Aldaco
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel
Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Dr. Abraham Claudio Sánchez
Dr. Jesús Darío Mina Antonio

Ingeniería Mecánica

Dra. Claudia Cortés García
Dr. Arturo Abúndez Pliego
M.C. Enrique Alcudía Zacarías
Dr. Eladio Martínez Rayón
Dr. Carlos Manuel Lara Barrios
Dr. Andrés Blanco Ortega
Dr. Wilberth Melchor Alcocer Rosado

Comité de Arbitraje Externo

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

Dra. Adriana Mexicanó Santoyo
Dr. Jesús Carlos Carmona Frausto
Tecnológico Nacional de México,
campus Ciudad Victoria.

Dra. Blanca Alicia Vargas Govea
OCC Mundial

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

Dr. Jorge Ochoa Somuano
Universidad del Mar campus Puerto
Escondido

Dr. Osslan Osiris Vergara Villegas
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Dr. Cornelio Morales Morales
Tecnológico Nacional de México,
campus Cuautla.

Dr. Héctor Ramón Azcaray Rivera
Universidad del Valle de México
Online campus Coyoacán.

Dr. Ricardo Eliu Lozoya Ponce
Tecnológico Nacional de México,
campus Chihuahua.

Dr. Fabio Abel Gómez Becerra,
TecNM Tecnológico José Mario
Molina Pasquel y Henríquez,
campus La Huerta, Jalisco.

Dr. Manuel de Jesús Palacios
Gallegos Universidad Politécnica de
Chiapas

JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA

Consejo editorial de la publicación

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Editora

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Coeditor

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

Ing. Víctor Josué Ruiz Martínez
Sitio Web

María Regina Ortiz García Alonso
Diseño de Portada

Daniela Abigail Martínez Gama
Diseño Editorial

María Regina Ortiz García Alonso
Apoyo Editorial

Comité Técnico de los Artículos de la 5ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada

Dr. Andrés Blanco Ortega
Editor General de los Artículos

Dr. Manuel Mejía Lavallo
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

M.C. Mario Guillén Rodríguez
Administrador de la plataforma
EasyChair



ÍNDICE



Ciencias Computacionales

Lógica difusa para el análisis subjetivo de la cotización bursátil en la Bolsa Mexicana de Valores	9
Una Revisión Sobre Características de Alto Nivel en la Recuperación de imágenes Basadas en Contenido	14
Algoritmo genético multiobjetivo para optimización topológica de una red neuronal	24
Características mecánicas del texto para medir la legibilidad de los recursos de aprendizaje contenidos en Servicios Web	31
Sintonización automática de controladores clásicos usando el método de optimización por enjambre de partículas	36
SuperMarket: Videojuego Serio para personas con Síndrome de Down	41
Modelo de Learning Analytics para Predecir el Rendimiento de los Alumnos Basado en un LMS	46
Aplicación De Geoposicionamiento Para Fumigar Áreas De Un Vehículo Aéreo No Tripulado En Rutas Específicas	52
Adquisición de competencias de ciencias computacionales de nivel superior a través de la realización de Cursos en Línea Masivos y Abiertos (Massive On-line Open Courses, MOOC`s)	56
Red Neuronal Pulso Acoplada Simplificada Adaptada para la Mejora de Iluminación en Imágenes Médicas a Color	60
Segmentación semántica de escenas interiores en una computadora embebida	67
Uso de las Tics en la Educación ante la Pandemia (COVID-19) ¿Estamos preparados?	73
Implementación Ágil de Servicios para Aplicaciones de Internet de las cosas	78
Comparativo de metodologías y estándares para el Internet de las Cosas	83



Ingeniería Electrónica

Simultaneous State and Actuator Fault Estimation in a Double Pipe Heat Exchanger via Fuzzy Descriptor Approach.	88
Estudio de Técnicas de Mejora de la Eficiencia en Cargas Ligeras para Convertidores CD-CD.	93
Desarrollo de un Simulador de Sistemas Dinámicos para Aplicación en Métodos Heurísticos de Optimización.	98
Arreglo experimental de bajo costo para el análisis del comportamiento de un panel fotovoltaico en relación con la temperatura.	103
Uso de la espectroscopia de impedancia eléctrica para determinar la madurez del plátano.	109
Convertidor Sepic como CFP aplicando la estrategia de control OCC.	115
Control basado en observador para el desplazamiento de estructuras con retardo en la señal de control.	121
Estudio comparativo de convertidores multinivel con número reducido de interruptores.	126



Ingeniería Mecánica

Cinemática del diseño de un prototipo rehabilitador del tobillo de tres grados de libertad	133
Efecto del voltaje de electrodeposición sobre la vida a fatiga de aluminio recubierto con carbono	139
Propuesta de un procedimiento práctico para evaluar turbias eólicas Savonius en zonas urbanas del Istmo de Tehuantepec	147
Evaluación del comportamiento tribológico de materiales compuestos de matriz polimérica	155



Implementación de sistema de adquisición de datos y control, en tribómetro cilindro a cilindro mediante aplicación móvil	160
Análisis experimental de un inversor en un sistema MRA de dos grados de libertad	165
Diseño de un extrusor de inyección variable para manufactura aditiva	171
Diseño conceptual y análisis del desplazamiento angular de un banco de pruebas para prótesis de cadera	177

Lógica difusa para el análisis subjetivo de la cotización bursátil en la Bolsa Mexicana de Valores

Ing. Mario Iván Ortiz Velázquez* Dr. Dante Mújica Vargas*
Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez*

* Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (mario.ortiz19ca@cenidet.edu.mx, dante.mv@cenidet.tecnm.mx, noe.cs@cenidet.tecnm.mx).

Resumen: Es imposible predecir el comportamiento de los mercados y productos financieros, dicho argumento se sostiene con base en el funcionamiento y operación de estas entidades financieras en más de un siglo. La cantidad de factores que influyen en los mercados financieros es enorme, incluyendo reportes financieros de las empresas, políticas monetarias, noticias de medios especializados e incluso las propias emociones de los inversionistas. Para que sea rentable obtener beneficios operando en estos mercados se requiere de un nivel de percepción y experiencia cuando menos suficiente para encontrar las debilidades de los mercados sin exponer las debilidades propias, ya que gran parte de la interpretación del valor es subjetiva. En este trabajo se desarrolló un sistema basado en lógica difusa para estimar el movimiento de emisoras cotizadas en la Bolsa Mexicana de Valores (BMV), modelando la interpretación subjetiva de información procedente de diversas fuentes de consulta para servir como medio de apoyo en la toma de decisiones de inversión.

Keywords: lógica difusa, bolsa de valores, mercados financieros, inversión, análisis financiero

1. INTRODUCCIÓN

Debido al constante, y casi permanente, crecimiento y expansión de los mercados financieros, las entidades que operan en dichos entornos, y principalmente los inversionistas, se han encontrado con la necesidad y oportunidad de incorporar nuevas tecnologías para el desarrollo de sus actividades financieras. A pesar de que el “santo grial” de las inversiones se trataría de la capacidad de predecir con anticipación el movimiento de los mercados y productos, a día de hoy es imposible, esto debido a la gran cantidad de variables que interactúan en el entorno y en cortos periodos de tiempo. Sin embargo, una opción atractiva es el uso de nuevas técnicas para el soporte de las decisiones financieras que se toman, sirviendo como apoyo en vez de ser una solución definitiva.

La lógica difusa es una opción adecuada para su uso en entornos financieros, apoyando en la toma de decisiones, debido a que estas suelen basarse en una gran cantidad de factores y por lo general estando supeditadas al razonamiento subjetivo del inversor, según (Sanchez-Roger et al., 2019) el razonamiento se puede modelar con lógica difusa para interpretar esas ideas y congregarlas en una decisión que englobe la perspectiva y experiencia del analista.

En la actualidad existe una considerable cantidad de trabajos de investigación enfocados a la aplicación de la lógica difusa en entornos financieros, específicamente en la gestión de inversiones, el análisis de indicadores financieros y en general como soporte para las decisiones relacionadas con inversiones bursátiles. Los sistemas difusos parecen

ser capaces de atenuar en cierta medida los efectos de la siempre presente incertidumbre financiera (Naranjo Mota, 2018), y ya son ampliamente utilizados en diversos estudios obteniéndose resultados variables.

En este trabajo de investigación el enfoque se centró principalmente en simplificar en el mayor grado posible una solución a la interpretación subjetiva de la información, con la finalidad de evaluar el desempeño de un sistema difuso poco robusto en la tarea de combinar las variables basadas en la experiencia para obtener una estimación en el comportamiento de un conjunto de empresas cotizadas en bolsa, evaluando el resultado para inferir los posibles puntos fuertes y débiles de aplicar lógica difusa como apoyo en la tarea de análisis del mercado de valores.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Lógica difusa

La teoría de lógica difusa se introdujo en el año 1965 como una herramienta para modelar sistemas no lineales y aprender de los datos haciendo uso de determinados algoritmos de aprendizaje (Naranjo Mota, 2018). Los conjuntos difusos tienen la capacidad de agrupar objetos con base en una magnitud predefinida, asignando un grado de pertenencia a cada elemento en el universo y relacionándolo con cada conjunto establecido, resultando en una solución más adecuada para modelar fenómenos y sistemas del mundo real, ya que estos suelen comportarse acorde a la representación que la lógica difusa permite.



Es necesario contar con modelos que tengan la capacidad de capturar con mayor precisión la realidad, una realidad que por naturaleza es imprecisa y subjetiva, y en la que no cuadra el razonamiento de la lógica clásica. Los modelos matemáticos convencionales son de gran utilidad aunque dependen de la disponibilidad de suficientes datos para su análisis y en caso contrario se requieren soluciones alternativas. Es necesario entonces que los sistemas de análisis combinen las técnicas puramente analíticas con la percepción y razonamiento humanos, algo que a través de la lógica difusa se puede plasmar debido a su razonamiento tan similar a la forma en la que piensan los seres humanos.

2.2 Mercados financieros

Los mercados financieros, o mercados bursátiles, actúan como sistemas de distribución y asignación de recursos que tienen la finalidad de proporcionar el entorno adecuado para la producción de bienes y servicios que demanda la sociedad (Gómez Bezares, 1997).

3. TRABAJOS RELACIONADOS

Si bien hay múltiples enfoques en los que se pueden aplicar técnicas difusas, como en (De Marco et al., 2018) en donde se sirven de estos métodos para el estudio del índice de morosidad en créditos bancarios de consumo, en realidad el espectro de análisis es muy amplio cuando se consideran todas las posibilidades dentro del entorno financiero. En (Sanchez-Roger et al., 2019) se analiza la utilidad de aplicar lógica difusa (FL, por sus siglas en inglés) para el estudio de crisis bancarias. Mientras que en (Nakano et al., 2017) se utiliza como apoyo en la creación de carteras de inversión con altos rendimientos, sirviéndose de un conjunto de carteras para extraer los activos más prometedores e integrarlos en una nueva cartera de inversiones.

Una gran ventaja de la FL es que permite el modelado de para servir como apoyo en la toma de decisiones. En (Nazemi et al., 2017) se utiliza como medio de apoyo en la estimación de pérdidas en caso de incumplimientos en el pago de deuda, por parte de empresas o gobiernos. En dicho trabajo se incorporaron en el modelo difuso aproximadamente 100 variables, lo que demuestra también la escalabilidad de este tipo de sistemas, siendo ajustables al fenómeno estudiado. Tal y como lo menciona (Muñoz et al., 2017), el uso de la lógica difusa permite modelar la incertidumbre de los mercados financieros, al permitir captar la realidad. Además de servir como herramienta de apoyo para el diseño de estrategias de inversión.

El uso de la FL en la literatura se enfoca a al análisis específico de determinados activos o conceptos financieros, como en el caso del oro en (Nguyen et al., 2020) y el mercado de las materias primas. También se utiliza para el estudio de fenómenos a nivel local (dentro de un país o continente), como en (Penawar & Rustam, 2017) en donde se analiza el mercado de bienes raíces de Indonesia y su importancia en la economía local. Incluso hay trabajos que realizan el análisis de indicadores financieros, y no directamente en los activos comercializados, con la finalidad de determinar el nivel de riesgo de inversión en determinadas condiciones económicas (Díaz Córdova et al., 2017). Como

se puede notar, son distintos los enfoques que se pueden adoptar por parte de la FL en el ámbito financiero.

3.1 El papel de la información

En este contexto es cuando la frase “la información es poder” toma sentido, debido a que el valor de un activo financiero no solo se encuentra influenciado por la oferta y demanda del producto, sino que también es víctima de factores externos relacionados con información a diferentes escalas: A nivel empresa, a nivel industria, a nivel sector económico, a nivel nacional e incluso a nivel mundial. Por lo tanto existen una serie de factores externos que influyen en el comportamiento de un producto y que en su mayor parte son subjetivamente interpretados por el especulador o inversor, basándose para ello en su experiencia con la finalidad de determinar el posible impacto de un dato concreto en una posición de interés.

En (Hens & Meier, 2014) se hace referencia al proceso cíclico de la inversión, un concepto que hace referencia a la obtención de información, la elección de inversiones, la tendencia y la venta de inversiones o posiciones. Se puntualiza en que es un proceso cargado de dificultades, con acciones rápidas y movimientos del mercado aún más veloces que distorsionan la percepción estadística y obligan al inversionista a actuar basándose en la interpretación subjetiva de la información.

4. OBJETIVO

Desarrollar una herramienta de software que incorpore lógica difusa para la transformación de variables estimadas subjetivamente por un analista e ingresadas manualmente, con base en su experiencia y percepción, para proporcionar una estimación sobre el movimiento de la cotización de empresas cotizadas en la Bolsa Mexicana de Valores (BMV), centrándose específicamente en el mercado de acciones.

5. DESARROLLO

5.1 Planteamiento de la solución

Se realizó el planteamiento de las variables de entrada, basadas en la experiencia y opinión subjetiva, siendo seleccionadas 5 las cuales se describen a continuación:

- **Tendencia:** Se refiere al movimiento del precio en una gráfica, en un intervalo de tiempo determinado. La dirección que toma la forma de la gráfica se denomina tendencia alcista si es que el precio es ascendente, tendencia lateral cuando se mantiene en una dirección horizontal y tendencia bajista cuando el precio es descendente en un lapso de tiempo (Diario, semanal, anual).
- **Noticias:** Noticias relacionadas a la emisora, o empresa, que se evalúa. Subjetivamente se interpretan los textos informativos que se obtienen a partir de la búsqueda en distintas fuentes de información públicas.
- **Previsiones:** Se refiere al entorno económico nacional e internacional y a los posibles cambios en este entorno que puedan afectar el precio de una acción.
- **Precio:** Es la diferencia entre el precio actual de la acción y el promedio de los precios que ha tenido diariamente a lo largo de 1 año.



- **Actitud:** Es el comportamiento de los inversionistas hacia una determinada emisora, ya sea siendo optimistas y comprando más acciones o siendo pesimistas y vendiendo.

5.2 Estructura del controlador difuso

Se consideran cinco entradas y una salida. Tendencia a la alza, lateral o baja (Tendencia), Comportamiento del mercado con base en los precios anteriores (Actitud), Noticias relacionadas con la empresa que se analiza (Noticias), Análisis del entorno (Previsiones) y el precio de la Acción evaluada (Precio) como entradas. El posible movimiento (Cotización) como salida.

5.3 Definición de los conjuntos difusos

- Se definen 3 conjuntos difusos para Tendencia (Entrada).
- Se definen 2 conjuntos difusos para Actitud (Entrada).
- Se definen 2 conjuntos difusos para Noticias (Entrada).
- Se definen 2 conjuntos difusos para Previsiones (Entrada).
- Se definen 2 conjuntos difusos para Precio (Entrada).
- Se definen dos conjuntos difusos para Cotización (Salida).

5.4 Definición de las funciones de pertenencia

La función de pertenencia de un conjunto indica el grado en que cada elemento de un universo dado pertenece a dicho conjunto. Es decir, la función de pertenencia de un conjunto A sobre un universo X será de la forma: $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$, donde $\mu_A(x) = r$ si r es el grado en que x pertenece a A. Si $\mu_A(x) = 0$ el elemento no pertenece al conjunto, si $\mu_A(x) = 1$ el elemento sí pertenece totalmente al conjunto.

Se consideraron las funciones de pertenencia más sencillas (triangulares y trapezoidales) para las variables relacionadas con la valoración del activo. Haciendo uso de las funciones gaussianas para las variables relacionadas con el comportamiento del mercado.

A continuación se describe cada una de las funciones de pertenencia incluidas en la herramienta:

- **Tendencia:** Se consideran tres conjuntos difusos representados por funciones triangulares: Bajista (Tendencia a la baja), Alcista (Tendencia a la alta) y Lateral (Tendencia lateral). En un rango [0, 1].
- **Actitud:** Se consideran dos conjuntos difusos representados por funciones gaussianas: Pesimista (El comportamiento del precio es negativo) y Optimista (Comportamiento del precio positivo). En un rango [0, 1].
- **Noticias:** Se consideran dos conjuntos difusos representados por funciones gaussianas: Negativas (Noticias relacionadas con la emisora con connotación negativa) y Positivas (Noticias con connotación positivas). En un rango [0, 1].
- **Previsiones:** Se consideran dos conjuntos difusos representados por funciones gaussianas: Negativas (Entorno económico negativo) y Positivas (Entorno económico positivo). En un rango [0, 1].

- **Precio:** Se consideran dos conjuntos difusos representados por funciones triangulares: Infravalorado (Precio promedio mayor que el actual) y Sobrevalorado (Precio actual mayor que el promedio anual). En un rango [0, 1].

- **Cotización:** Se consideran dos conjuntos difusos representados por funciones trapezoidales: Disminuye (El precio del día siguiente baja) y Aumenta (El precio del día siguiente sube). En un rango [0, 100].

5.5 Reglas e Inferencia difusa

Se incorporan 12 reglas, de las cuales 6 tienen como salida que la cotización disminuye, y las otras 6 tienen como salida que la cotización aumenta.

Se trata de un sistema de inferencia difusa basado en reglas de tipo 1 (mamdani). Algunos de los conjuntos incorporados a la herramienta, y con los cuales se realizó la experimentación, se muestran en la Figura 1.

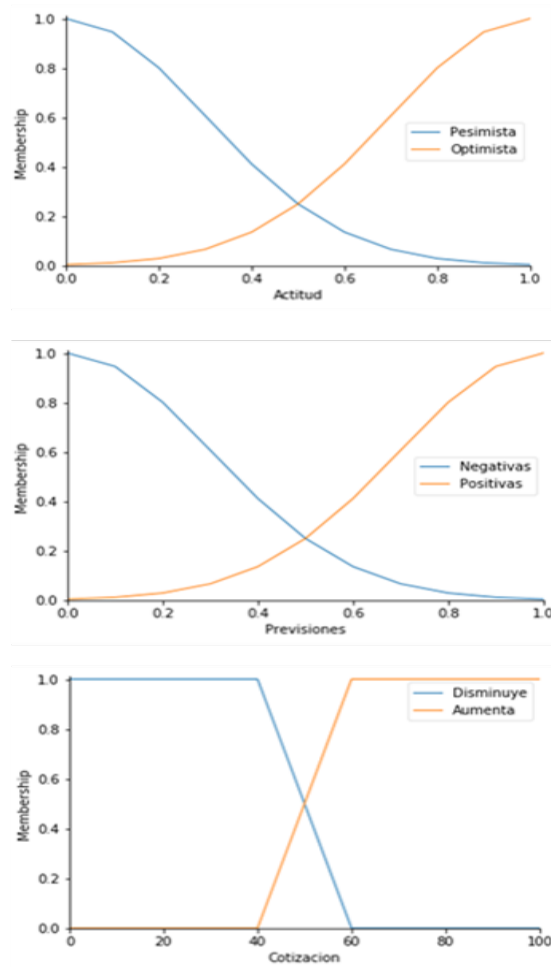


Figura 1: Parte de los conjuntos difusos incorporados en la herramienta.



5.6 Interfaz de la herramienta

El diseño se trasladó al lenguaje de programación Python, además se incluyó una interfaz gráfica para que el usuario ingrese un valor subjetivo a cada una de las variables de entrada. A continuación se muestra el resultado:

Figura 2: Vista previa de la interfaz.

Apoyándose en esta interfaz el usuario puede interpretar subjetivamente la información con la que cuenta, obteniéndose como resultado una estimación del posible comportamiento de la acción en las 24 horas siguientes del análisis.

6. PRUEBA DE LA HERRAMIENTA

Con la finalidad de probar el desempeño de la herramienta en un entorno real se utilizó información extraída manualmente del portal Yahoo Finanzas (<https://es-us.finanzas.yahoo.com/>), analizando 10 emisoras (empresas) que forman parte del Índice de Precios y Cotizaciones (IPC), de la Bolsa Mexicana de Valores (BMV).

6.1 Método de análisis

- Búsqueda y descarga de los datos históricos correspondientes al periodo 10 de mayo de 2019 – 10 de mayo de 2020 (Un año), con una frecuencia de búsqueda diaria, obteniéndose datos de 251 días para cada una de las emisoras.
- Obtención del precio unitario actual para cada una de las acciones de la empresa.
- Obtención del valor fundamental a partir del promedio de la suma de las 251 cotizaciones de cierre, obteniéndose la media aritmética del total de precios de cierre en el periodo de un año.
- Análisis del entorno: Búsqueda de noticias relacionadas con la empresa que se está analizando, con la finalidad de determinar subjetivamente las variables necesarias para la herramienta difusa.

- Relación de la información encontrada durante la investigación con la variable de entrada correspondiente.
- Análisis utilizando la herramienta.

6.2 Ejemplo de implementación del método

A continuación se ejemplifica la implementación de los pasos descritos en la sección anterior, sobre los datos de una de las emisoras analizadas (KIMBERA.MX):

- 1) Nombre de la empresa: Kimberly-Clark de México, S. A. B. de C. V. (KIMBERA.MX)
- 2) Precio actual (Por título): \$34.51 MXN
- 3) Valor fundamental: \$37.556 MXN (El precio promedio es mayor que el precio actual, por lo que se puede argumentar que el precio actual se encuentra infravalorado).
- 4) Análisis del entorno: Para analizar el entorno económico internacional, nacional e individual de la emisora, se consultaron 4 portales especializados (Yahoo finanzas, Investing México, El financiero, El economista). Las noticias tomadas en cuenta fueron únicamente las de más reciente publicación, no considerando aquellas con más de una semana (7 días) de publicación.

Los resultados obtenidos con base en el análisis subjetivo realizado se etiquetaron manualmente para cada una de las variables de entrada que requiere la herramienta, proporcionando un resumen de la situación basado en las conclusiones del analista:

Tendencia = Lateral.
Noticias = Mayormente positivas.
Previsiones = Levemente negativas.
Precio = Levemente infravalorado.
Actitud = Neutral.

Teniendo las 5 variables de entrada con su respectiva etiqueta se procedió a realizar la estimación haciendo uso de la herramienta desarrollada. La estimación obtenida por medio de la herramienta es que el precio unitario de la acción aumentara el próximo día hábil que opere la Bolsa Mexicana de Valores.

7. RESULTADOS

Los datos correspondientes a la columna “precio inicial” y estimación de la Tabla 1 se recopilaron el día 10/05/2020 del portal Yahoo finanzas. Así mismo, la estimación que arrojó la herramienta se realizó en la misma fecha. El precio actual de la Tabla 1 se obtuvo el día 11/05/2020, a la hora del cierre de la Bolsa Mexicana de Valores (3:00 pm), del mismo portal.

Para el día siguiente 6 de las emisoras se comportaron de la misma forma que el estimado arrojado por la herramienta, determinado 24 horas antes. Por lo tanto, el 60 % de las estimaciones de precio se comportó de acuerdo al estimado subjetivo obtenido por medio de la herramienta, mientras que el otro 40 % tuvo un comportamiento contrario al de la estimación.

En la Tabla 1 se muestra la comparativa entre la estimación y el comportamiento real de las emisoras analizadas.



Emisora	Precio inicial (\$MXN)	Estimación	Precio actual (\$MXN)	Comportamiento
KIMBERA.MX	34.51	Aumenta	34.52	Aumenta
BOLSAA.MX	43.85	Aumenta	43.68	Disminuye
OMAB.MX	93.09	Aumenta	93.21	Aumenta
PINFRA.MX	170.23	Aumenta	170.32	Aumenta
ASURB.MX	250.85	Disminuye	243.64	Disminuye
IENOVA.MX	75.42	Aumenta	73.48	Disminuye
CEMEXCPO.MX	5.12	Aumenta	5.10	Disminuye
ALSEA.MX	20.08	Disminuye	19.33	Disminuye
BIMBOA.MX	34.50	Disminuye	36.30	Aumenta
ALPEKA.MX	12.21	Aumenta	12.39	Aumenta

Tabla 1: Comparativa entre el comportamiento estimado al utilizar la herramienta y el comportamiento real del mercado.

8. CONCLUSIONES

El experimento llevado a cabo para contrastar los resultados obtenidos por medio de la herramienta desarrollada con la información acontecida en el mundo real parecerían confirmar que efectivamente es posible estimar con antelación el desempeño de, cuando menos, un porcentaje de emisoras que cotizan en la Bolsa Mexicana de Valores (BMV), sin embargo, es fundamental reconocer que el resultado obtenido se apoya principalmente en el criterio individual de la persona que realiza el análisis subjetivo.

Los resultados obtenidos en este trabajo son un punto de partida para el diseño, desarrollo e implementación de nuevas soluciones a los problemas bursátiles haciendo uso de lógica difusa, y teniendo como datos de entrada una serie de criterios evaluados y determinados subjetivamente por un analista, sirviendo como una herramienta de apoyo en vez de como una solución autónoma, adecuándose al enfoque de servir como apoyo en el proceso de toma de decisiones.

9. TRABAJOS FUTUROS

En futuros trabajos se puede experimentar con otras técnicas de inteligencia artificial para el análisis de los mercados financieros, específicamente tratando de automatizar parcial o totalmente el proceso de análisis, así como para mejorar el porcentaje de acierto. También se deben considerar los datos de entrada para definir las técnicas aplicables, pudiendo utilizarse Procesamiento de Lenguaje Natural para el análisis de reportes anuales y trimestrales, o Aprendizaje Automático para tareas de clasificación.

10. REFERENCIAS

De Marco, G., Donnini, C., Gioia, F., & Perla, F. (2018). On the measure of contagion in fuzzy financial networks. *Applied Soft Computing*, 67, 584-595. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.02.056>

Díaz Córdova, J., Coba Molina, E., & Navarrete López, P. (2017). Fuzzy logic and financial risk. A proposed classification of financial risk to the cooperative sector. *Contaduría Y Administración*, 62(5), 1687-1703. <https://doi.org/10.1016/j.cya.2017.10.001>

Gómez Bezares, F. (1997). Los problemas éticos de la especulación. Presentación, Mesa de ética del V Foro de Finanzas, Universidad de Málaga.

Hens, T., & Meier, A. (2014). Finanzas Conductuales: La Psicología de la Inversión (pp. 9-13). Credit Suisse. Recuperado de <http://sl.pulso.cl/wp-content/uploads/2014/10/2013779.pdf>

Muñoz, M., Miranda, E., & Sánchez, P. (2017). A Fuzzy System for Estimating Premium Cost of Option Exchange Using Mamdani Inference: Derivatives Market of Mexico. *International Journal Of Computational Intelligence Systems*, 10(1), 153.

Nakano, M., Takahashi, A., & Takahashi, S. (2017). Fuzzy logic-based portfolio selection with particle filtering and anomaly detection. *Knowledge-Based Systems*, 131, 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2017.06.006>

Naranjo Mota, R. (2018). Modelado de sistemas de inversión mediante lógica borrosa como soporte a la toma de decisiones en mercados bursátiles (Tesis de Doctorado). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Informática.

Nazemi, A., Fatemi Pour, F., Heidenreich, K., & Fabozzi, F. (2017). Fuzzy decision fusion approach for loss-given-default modeling. *European Journal Of Operational Research*, 262(2), 780-791.

Nguyen, L., Novák, V., & Holčapek, M. (2020). Gold Price: Trend-Cycle Analysis Using Fuzzy Techniques. *Information Processing And Management Of Uncertainty In Knowledge-Based Systems*, 254-266. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50153-2_19

Penawar, H., & Rustam, Z. (2017). A fuzzy logic model to forecast stock market momentum in Indonesia's property and real estate sector. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.4991229>

Sanchez-Roger, M., Oliver-Alfonso, M., & Sanchís-Pedregosa, C. (2019). Fuzzy Logic and Its Uses in Finance: A Systematic Review Exploring Its Potential to Deal with Banking Crises. *Mathematics*, 7(11), 1091. <https://doi.org/10.3390/math7111091>



Una Revisión Sobre Características de Alto Nivel en la Recuperación de imágenes Basadas en Contenido

K. Salvador Aguilar-Domínguez^{*,1}, Manuel Mejía-Lavalle^{*,2}
Andrea Magadán-Salazar^{*,3}, Gerardo Reyes-Salgado^{*,4}, José Ruiz-Ascencio^{*,5},
Osslan Osiris Vergara-Villegas^{**}

^{*}Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México;
e-mail: {kevin.aguilar17ca¹, mlavalle², magadan³, greyes⁴, josera⁵}@cenidet.edu.mx.

^{**}Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México;
e-mail: overgara@uacj.mx

Resumen: En este trabajo se presenta la revisión sobre las características de alto nivel en los sistemas de recuperación basados en contenido. Con la finalidad de proporcionar una revisión completa y reciente, dando a conocer los logros en los diversos enfoques encontrados. La revisión se dividió en cuatro principales categorías, en las que se mencionan los trabajos considerados más relevantes en los últimos años, para finalmente presentar una discusión sobre su ventajas, desventajas y problemas actuales. La revisión muestra la demanda actual en la obtención de características de bajo nivel para mejorar los resultados en los sistemas de recuperación basados en contenido y se sugieren algunas posibles direcciones de investigación futuras.

Palabras claves: Recuperación de imágenes basada en contenido, Características de alto nivel, Revisión, Brecha semántica, Multimedia, Descriptores.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de herramientas como, los teléfonos inteligentes y diversos dispositivos que facilitan la adquisición de imágenes, al igual que las aplicaciones multimedia y redes sociales, han promovido una amplia gama de imágenes con contenido diverso. Esto provoca un gran aumento en el tamaño de la colección de imágenes digitales, tanto en los dispositivos personales como en la web. Los usuarios de diversos dominios necesitan herramientas eficientes de búsqueda, filtrado, identificación y recuperación de imágenes. Para este último, se han desarrollado los sistemas de recuperación de imágenes. Hay dos principales formas en las que se está abordando este tema: basado en texto y basado en contenido.

Los sistemas de recuperación basados en contenido “*Content-based image retrieval*” (CBIR), surgen debido a los problemas presentados en los sistemas basados en texto, como lo es el trabajo humano que se requiere para la anotación manual de las imágenes y lo complicado que puede ser la recuperación a partir de un texto, debido a la subjetividad humana. En los sistemas CBIR, también conocido como “*Query By Image Content*” (QBIC) (Assfalg, Bimbo and Pala, 2000), la recuperación se basa en el contenido de una imagen de consulta, es decir en sus características visuales de bajo nivel como: color, textura, forma y ubicaciones espaciales. En la actualidad los sistemas CBIR se utilizan en diversos campos como: Educación (Tang and Acton, 2003); medicina (Zin *et al.*, 2018); redes sociales (Ahmad *et al.*, 2016); motores de búsqueda (Deniziak and Michno, 2016); entre otras. Un ejemplo de sistemas CBIR, lo encontramos en el buscador web, *Google images*, en su opción de “buscar por imagen”,

donde se puede seleccionar una imagen desde un archivo o URL, para realizar una búsqueda de imágenes a partir de ésta.

Actualmente se han realizado diversos sistemas CBIR, con diferentes aplicaciones e intentando dar solución a algunos problemas que se han presentado a lo largo del tiempo, a su vez se han realizado diferentes estudios sobre ellos, algunos de ellos son: (Alzu’bi, Amira and Ramzan, 2015; Gandhani and Singhal, 2015; Shrivastava and Tyagi, 2015; Nalini and Malleswari, 2016; Mohamed, 2017; Patil and Agrawal, 2017; RajaSenbagam and Shanmugalakshmi, 2017; Zhou, Li and Tian, 2017).

Tyagi menciona en (Tyagi, 2017) algunos de los problemas de investigación sobre los sistemas CBIR, que son en los que se están centrando principalmente las recientes investigaciones los cuales son: Interacción del usuario; segmentación; reducción de dimensionalidad e indexación de características de la imagen; recuperación de imágenes basada en geo etiquetas; características de imagen de alto nivel; aprendizaje profundo; recuperación de imágenes basada en contenido para preservar la privacidad; y la recuperación de video basada en contenido. Este trabajo se concentra en la parte de características de imagen de alto nivel, que surge a partir de un problema conocido como la brecha semántica que es explicado con mayor detalle en la Sección 2 de este documento. A pesar de que se encuentra una cantidad considerable de literatura que abordan las características de alto nivel, no se ha encontrado un estudio o revisión reciente de estos trabajos. Esta revisión se dividirá en cuatro enfoques donde se mencionarán los trabajos más relevantes considerando el año de publicación, procedencia y la cantidad de citas.



La organización del resto del artículo está dada de la siguiente manera. Sección 2 explica el problema de la brecha semántica, la Sección 3, aborda las características de alto nivel y los trabajos realizados sobre ello. La Sección 4 muestra los conjuntos de datos y métricas utilizados con mayor frecuencia. Finalmente, la Sección 5 plantea una discusión sobre los trabajos revisados y la sección 6 las conclusiones obtenidas.

2. LA BRECHA SEMANTICA

Los seres humanos tienden a utilizar características de alto nivel, es decir conceptos semánticos para describir las imágenes, como palabras clave, descriptores de texto, mientras que las características extraídas automáticamente mediante técnicas de visión por computadora son principalmente características de bajo nivel. Aunque se han diseñado muchos algoritmos sofisticados para describir características de color, forma y textura. Se ha observado a lo largo de las investigaciones que las características de bajo nivel difícilmente consiguen representar semántica de alto nivel. Por lo tanto, la recuperación basada en la similitud de características de bajo nivel, no obtienen los resultados requeridos por los usuarios que buscan imágenes con características semánticas similares, este problema se conoce como el problema de la brecha semántica.

A lo largo de la literatura se han mencionado tres niveles de consultas en CBIR mencionados por Eakins en (Eakins and Graham, 1999).

Nivel 1: Recuperación por características de bajo nivel como el color, la textura, la forma o la ubicación espacial de los elementos de la imagen. La consulta típica es, por ejemplo, "busca imágenes como esta".

Nivel 2: Recuperación de objetos en un tipo determinado, identificados por características derivadas, con cierto grado de inferencia lógica. Por ejemplo, "busca la imagen de una flor".

Nivel 3: Recuperación por atributos abstractos, que implica una cantidad significativa de razonamiento de alto nivel sobre el propósito de los objetos o escenas representados. Esto incluye la recuperación de eventos nombrados, de imágenes con significado emocional o religioso, etc. Por ejemplo, "encuentre imágenes de una multitud alegre".

Los niveles 2 y 3 juntos se denominan recuperación de imágenes semánticas y la brecha entre los niveles 1 y 2 se conoce como brecha semántica (Eakins and Graham, 1999). Más específicamente, la discrepancia entre el poder descriptivo limitado de las características de la imagen de bajo nivel y la riqueza de la semántica del usuario se denomina "brecha semántica" (Smeulders *et al.*, 2000; Chen, Wang and R. Krovetz, 2003).

Los usuarios en la recuperación de Nivel 1 generalmente deben enviar una imagen de ejemplo o un boceto como consulta. La recuperación de imágenes semánticas es más conveniente para los usuarios, ya que admite consultas por palabras clave o por textura. Por lo tanto, para respaldar la consulta mediante

conceptos de alto nivel, un sistema CBIR debería brindar soporte completo para salvar la "brecha semántica" entre las características numéricas de la imagen y la riqueza de la semántica humana (Smeulders *et al.*, 2000; Zhou and T.S. Huang, 2000). La recuperación en el nivel 3 es difícil y menos común. Se puede encontrar una posible recuperación de Nivel 3 en áreas específicas. Los sistemas actuales realizan principalmente la recuperación en el nivel 2 (Tyagi, 2017).

3. CARACTERISTICAS DE ALTO NIVEL

La mayoría de los sistemas CBIR utilizan características de bajo nivel que son relativamente fáciles de calcular y, en el mejor de los casos, pueden estar relacionadas con la percepción humana de bajo nivel. Las características de nivel alto son difíciles de extraer de los píxeles, representan conceptos semánticamente significativos en la imagen (por ejemplo, actividades que tienen lugar en la imagen u objetos en la imagen), que son de interés más directo para un ser humano. Extraer automáticamente características o conceptos semánticamente significativos de una imagen es un desafío difícil para el que no existen soluciones genéricas de alto rendimiento (Tyagi, 2017). Estas características de alto nivel se buscan extraer mediante la información encontrada directamente en las imágenes, es decir derivando a partir de sus características de bajo nivel una descripción de un alto nivel semántico, y de esta manera reducir la brecha semántica, ya que estas podrían ayudar a la discriminación entre imágenes en términos de semántica. Se han intentado diversas técnicas para obtener estas características de alto nivel. En (Liu *et al.*, 2007) identifican los tres siguientes enfoques:

- (1) utilizar ontologías de objetos para definir conceptos de alto nivel,
- (2) utilizar métodos de aprendizaje automático para asociar características de bajo nivel con conceptos de consulta,
- (3) utilizar plantillas semánticas para mapear conceptos de alto nivel con características visuales de bajo nivel.

Estos tres enfoques se encuentran en la literatura, sin embargo, para esta revisión se encontró que podría mencionarse un cuarto enfoque, que sería utilizar descriptores derivados a partir de sus características de bajo nivel que representen semántica de alto nivel.

3.1 Ontologías

La ontología de objetos es un vocabulario que se define a partir de diferentes intervalos obtenidos de las características de bajo nivel de la imagen, por ejemplo, del color se podrían obtener las categorías: "verde claro, verde medio, verde oscuro". Esto proporciona una definición cualitativa de conceptos de consulta de alto nivel, por ejemplo, "cielo" se puede definir como una región de "azul claro" (color), 'uniforme' (textura) y 'superior' (ubicación espacial) (Liu *et al.*, 2007). un ejemplo gráfico se muestra en la (Fig. 1).



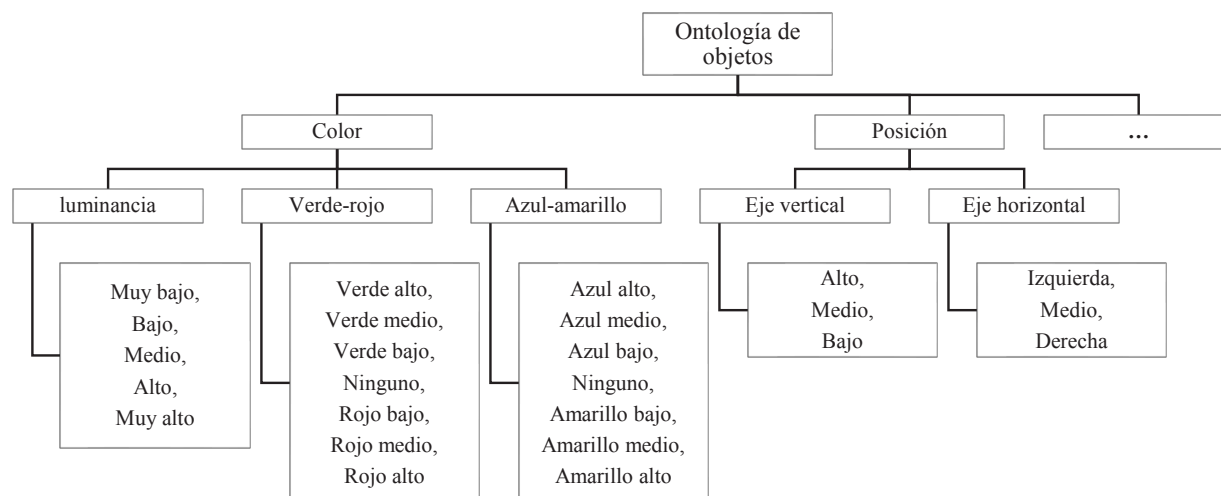


Fig. 1. Parte de la ontología de objetos usada en (Mezaris, Kompatsiaris and M.G. Strintzis, 2003).

Este enfoque se ha empleado para mejorar el desempeño de los sistemas CBIR en los últimos años, se han encontrado pocos trabajos, existen algunos como (Qin *et al.*, 2016), que propone un enfoque de recuperación semántica basado en ontología para modelos CAD 3D heterogéneos, con la ontología de características del sistema (SFO) para describir el conocimiento de un sistema de modelado CAD específico y la ontología de características comunes (CFO) que describe el conocimiento de las características en el dominio CAD, utilizando la estrategia de mapeo de ontologías multifacéticas que se utiliza para construir las relaciones de mapeo entre conceptos en la CFO y la SFO, para generar un descriptor semántico. En (Vijayarajan *et al.*, 2016) se presentan dos sistemas, uno de extracción de información objeto-atributo-valor (O-A-V) basado en ontología, y otro modelo que examina inicialmente las consultas de los usuarios en lenguaje natural utilizando un algoritmo analizador del procesamiento del lenguaje natural que identificará el sujeto-predicado-objeto (S-P-O) para la consulta. La extracción de S-P-O es una idea ampliada del modelo O-A-V. Otros trabajos que utilizan ontologías para la recuperación de imágenes son: (Liu *et al.*, 2017; Deepak and Priyadarshini, 2018; Deepak and Sheeba

Priyadarshini, 2018; Nguyen, Ly and Phung, 2018; Podder *et al.*, 2018). Liaqat presenta en (Liaqat, Khan and Majid, 2017) una metodología interesante utilizando ontologías difusas, sin embargo, se dirige a sistemas de recuperación basados en texto como la gran mayoría de los sistemas basados en ontologías que se centran en anotaciones automáticas.

3.2 Aprendizaje automático

El aprendizaje automático, tiene una gran cantidad de áreas de aplicación y en los últimos años continúa ganando terreno por sus buenos resultados. Existen dos principales ramas del aprendizaje automático, el supervisado y el no supervisado. En este apartado se incluirán sistemas supervisado, no supervisados y basados en aprendizaje profundo ya que son utilizados con frecuencia para mejorar los sistemas CBIR.

Estos sistemas principalmente se basan en la creación de relaciones de características de bajo nivel con conceptos de alto nivel, por ello su popular aplicación en diversos problemas la (Fig. 2) muestra de manera general el funcionamiento de las técnicas en este enfoque aplicado a sistemas CBIR.

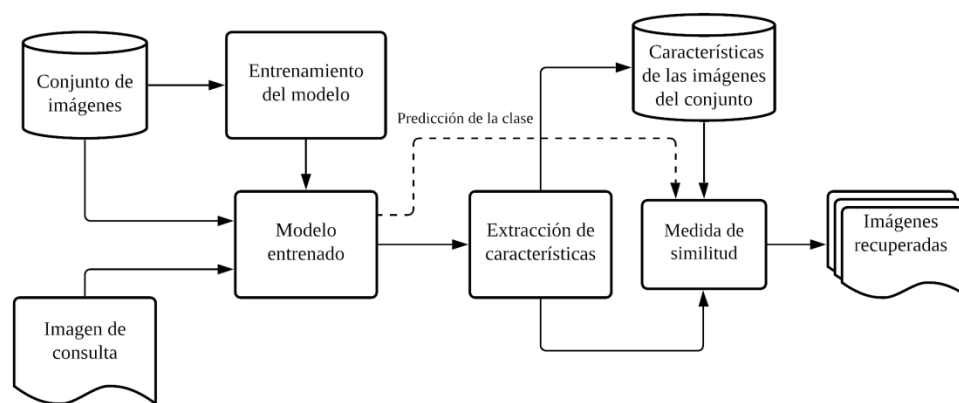


Fig. 2. Diagrama del *framework* utilizando en (Qayyum *et al.*, 2017).



En (Liu *et al.*, 2007; Alzu'bi, Amira and Ramzan, 2015; Upadhyaya and Dixit, 2016) se muestran diferentes trabajos realizados en esta área. Sin embargo, siguen surgiendo nuevos trabajos sobre el aprendizaje automático aplicado a sistemas CBIR. Bai presenta en (Bai, Chen, *et al.*, 2018) un sistema de recuperación llamado “*Saliency-based Multi-Feature Modeling*” (SMFM) donde propone un enfoque que integra el modelo de prominencia visual con bolsa de palabras visual (BOW) para la recuperación de imágenes semánticas, utilizando la prominencia visual para la segmentación de la imagen, con el descriptor SIFT junto a LBP y el histograma de color. En (Zhu *et al.*, 2017) se propone un enfoque no supervisado llamado “*Semantic-Assisted Visual Hashing*” (SAHV) donde la idea central es extraer semántica de los textos auxiliares de las imágenes. El sistema utiliza una técnica llamada “*visual hashing*” que su idea básica es mapear las características visuales en códigos binarios, en el espacio *low-dimensional Hamming*, de modo que las similitudes visuales de las imágenes se puedan medir mediante operaciones simples a nivel de bits con la finalidad de reducir el tiempo y el consumo de memoria. Así mismo existen enfoques semi supervisado como (Liang *et al.*, 2017) que presenta un nuevo *framework* para imágenes sin etiquetar y desarrollar un algoritmo semisupervisado basado en “*online multikernel similarity*” (OMKS). Los sistemas basados en técnicas de aprendizaje profundo cada vez se hacen más populares, incluso se colocan con frecuencia como otro enfoque aparte del aprendizaje automático por el gran número de trabajos y variantes propuestas. En (Tzelepi and Tefas, 2018) se presenta un método basado en Redes Neuronales Convolucionales (CNN), con un modelo de reentrenamiento utilizando “*Relevance feedback*” (RF), que se refiere a la capacidad de los usuarios para emitir su juicio sobre la relevancia de los resultados de búsqueda para el sistema y de esta manera considerarlo para ajustar el sistema y mejorar la recuperación. Existen trabajo aplicados a recuperación basadas en bocetos como (Huang *et al.*, 2018) que propone un nuevo descriptor semántico profundo que combina información visual y semántica para obtener una representación de características profunda más discriminativa, obtenidas de CNN, anexando un re ordenamiento optimizado en la recuperación, con la finalidad de mostrar en los primeros resultados las imágenes con mayor relevancia. Existen trabajos donde se utilizan diversas técnicas en conjunto como (Zhou, Wang and Chi, 2018) que utiliza máquina de soporte vectores multiclase (SVM) y el algoritmo difuso c-mean (FCM), así como una red neuronal profunda tipo CNN, que utilizan datos de seguimiento ocular obtenido de los usuarios al analizar los resultados, esto para el modelo de RF utilizado, de esta manera obtener una retroalimentación basado en el movimiento ocular de los usuarios. Existen algunos otros trabajos como (Bai, Huang, *et al.*, 2018) que optimiza AlexNet una CNN para recuperación de imágenes a gran escala, así como (Messina *et al.*, 2019) que emplean *Deep learning*, para bordar lo que llaman recuperación de imágenes basada en contenido relacional (R-CBIR), una tarea que consiste en encontrar imágenes que contengan relaciones similares inter objeto, basándose en una arquitectura llamada *Relation Netowrk* (RN), proponen una variante que nombran “*aggregated visual features relation network*” (AVF-RN). Existen algunos otros

trabajos interesantes que abordan el problema con técnicas de *Deep leranign* como lo son (Alzu'bi, Amira and Ramzan, 2017; Qayyum *et al.*, 2017; Saritha, Paul and Kumar, 2019), entre otros.

3.3 Plantillas semánticas

Las plantillas semánticas (ST) son definidas como un mapa entre el concepto de alto nivel y las características visuales de bajo nivel, se define normalmente como la característica “representativa” de un concepto calculado a partir de una colección de imágenes de muestra (Smith and Li, 1998; Zhuang, Liu and Pan, 1999). Existen algunas ideas que surgen a partir de las plantillas semánticas como las plantilla visual semántica (SVT) propuesta en (Chang, Chen and Sundaram, 1998), que vincular la característica de imagen de bajo nivel con conceptos de alto nivel, es decir, un conjunto de iconos o escenas / objetos de ejemplo que denotan una vista personalizada de conceptos como reuniones, atardeceres; la (Fig. 3) muestra un ejemplo de la generación de plantillas. A pesar de estas variantes y lo prometedor que parecen las plantillas semánticas actualmente existen pocos trabajos en este enfoque, se han realizado trabajos como (Liu *et al.*, 2017) que utiliza ontología de objetos y plantillas semánticas aplicado a la recuperación de imágenes de la Investigación de la Escena del Crimen. Así mismo se encontró el trabajo de Qi (Qi, Zhang and Li, 2016) que propone un método de plantilla semántica a través de un perceptrón multicapa. Sin embargo, no se encontraron más trabajos relacionados en los últimos cinco años.

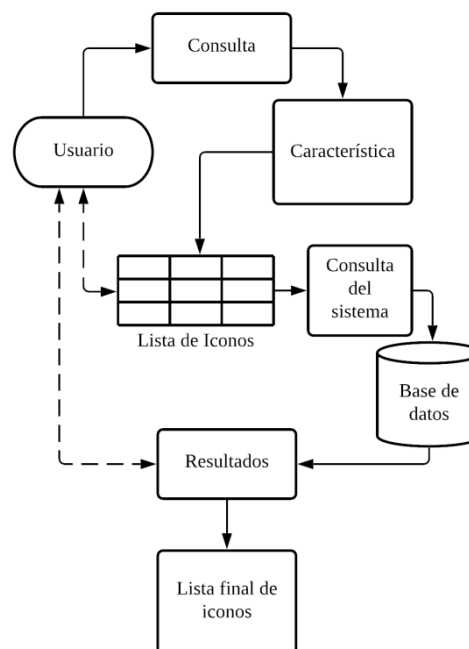


Fig. 3. Ejemplo de generación de plantillas basado en (Chang, Chen and Sundaram, 1998).



3.4 Descriptores con representación semántica de alto nivel

En los últimos años se han realizado algunos trabajos sobre este enfoque, y a pesar de que en ocasiones se utilizan algunas técnicas encontradas en otros enfoques o similares, lo que se busca en este es obtener un descriptor de alto nivel, sin la necesidad de ser directamente relacionados con un concepto semántico, a partir de la forma, textura, color, y posición

espacial, ya que estas por sí solas parecen ser insuficientes para abordar conceptos semánticos o aspectos más complejos en las imágenes. En la (Fig. 4) se muestra un ejemplo de sistemas con este tipo de enfoque donde considera la relación entre tres características de bajo nivel para obtener un descriptor de alto nivel.

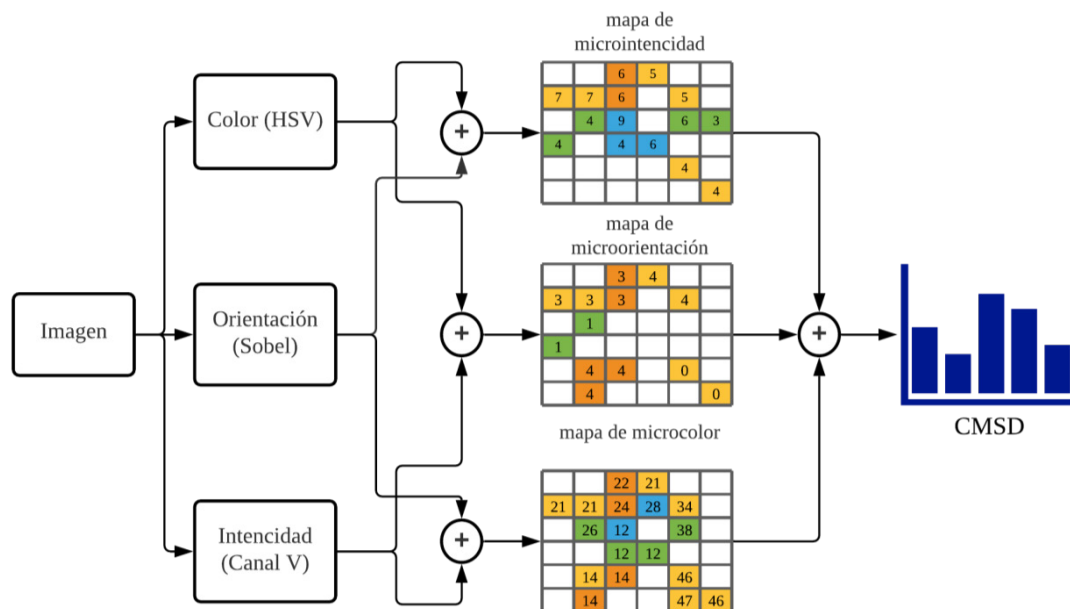


Fig. 4. Diagrama simplificado de “Co-related Microstructure Descriptor” (Dawood et al., 2019).

Entre los trabajos recientes se encuentra (Chu and Liu, 2020) que parte de la teoría de la integración de características, la cual es una teoría de la percepción y la atención, que explica cómo un individuo combina piezas de información observable sobre un objeto para formar una percepción completa. Utilizando esta información integrando características de color y borde, proponen un descriptor de histograma llamado “Multi-Integration Features Histogram” (MIFH). En (Yuan and Liu, 2020) se propone un nuevo detector de estructuras locales, para detectar estructuras locales simulando el mecanismo de selección de la orientación humana basado en un espacio de color oponente. Obtienen un descriptor basado en el detector de estructuras de gradiente, y proponen un sistema de representación discriminativo, “Gradient-Structures Histogram” (GSH), para describir el contenido de la imagen utilizando colores, orientaciones de los bordes e intensidades como restricciones, y usarlo para CBIR. (Sathiamoorthy and Natarajan, 2020), propone una nueva variante de “Multi-Trend Structure Descriptor” (MTSD), este caracteriza la imagen utilizando la correlación entre las estructuras de color, las orientaciones de los bordes y la textura a nivel local de forma independiente y luego se integran como un único vector de características. La variante que proponen llamada: “Multi-Direction and Location Distribution of Pixels in Trend Structure” (MDLDPTS), con algunas diferencias tratando de mejorar la calidad de la recuperación, como la diferencia de codificar una matriz de características de valores

cuantificados de color / orientación de borde / textura contra orientaciones de tendencias iguales, pequeñas y grandes.

Algunas de los descriptores propuestos en los últimos años se basan en la teoría del “texton”, Los *textons* se refieren a estructuras fundamentales en imágenes (y videos), que se consideran los átomos de la percepción visual humana preatenta (Julesz, 1981b). Los *textons* vienen en forma de manchas atribuidas con color, longitud y orientación (es decir, líneas, manchas alargadas y puntos) (Julesz, 1981b, 1981a; Julesz and Bergen, 1987). Un ejemplo reciente de estos trabajos es (Khaldi, Aiadi and Lamine, 2020), donde presentan un descriptor basado en “Multi Texton Histogram” (MTH), llamado: “Complete Multi-Texton Histogram” (CMTH), que incorpora información sobre el color, la orientación de los bordes y la distribución del texto dentro de la imagen, este descriptor se evalúa tanto en sistemas de recuperación como clasificación de imágenes. (Bala and Kaur, 2016; Zeng, 2016; Raza et al., 2018, 2019; Natarajan and Sathiamoorthy, 2019; Khaldi, Aiadi and Lamine, 2020), entre otros por mencionar, donde se trabajan los *textons*. Otros descriptores actuales se basan en lo que llaman microestructuras, estas microestructuras se proponen en (Liu et al., 2011), y parte de que, podemos pensar que el contenido significativo de las imágenes naturales se compone de muchas microestructuras universales, por tanto, si pudiéramos extraer estas microestructuras y describirlas de forma eficaz, podrían servir para la comparación y análisis de diferentes imágenes, en su



trabajo se inspira en la teoría de integración de características (Treisman, 1980), que se divide en dos etapas; la etapa de preatención, y la etapa de atención. Liu define las microestructuras en (Liu *et al.*, 2011), como la colección de ciertos colores subyacentes, donde los colores subyacentes son aquellos colores que tienen una orientación de borde similar o igual en un espacio de color uniforme. Lo más destacado de los colores subyacentes es que pueden combinar señales de color, textura y forma como un todo, a diferencia de la teoría del *textons* de Julesz que se centra en analizar texturas regulares, las microestructuras pueden considerarse como la extensión de los *textons* o la versión en color de *textons*, ya que las microestructuras involucran información de color, textura y forma. Uno de los nuevos descriptores basados en microestructuras es el “*correlated microstructure descriptor*” (CMSD), propuesto en (Dawood *et al.*, 2019), donde mencionan que CMSD representa semántica de alto nivel al identificar microestructuras mediante el establecimiento de correlaciones entre la orientación de la textura, el color y las características de intensidad, donde las microestructuras identificadas se asignan luego a características de color, orientación de textura e intensidad para obtener mapas de microcolor, microorientación y microintensidad, respectivamente; los tres micro-mapas concatenados, se representan a través de un histograma 2-D, incorporan información sobre el contenido de una imagen. El proceso simplificado de obtención del descriptor se muestra en (Fig. 4). Otro trabajo presentado es el “*Composite Micro Structure Descriptor*” (CMSD) (Umamaheswaran *et al.*, 2019), que a diferencia del CMSD propuesto por Dawood, este combina MTH y MSD.

4. CONJUNTOS DE IMÁGENES Y MÉTRICAS DE

4.1 Conjunto de imágenes

Los conjuntos de imágenes son un factor importante que considerar en este tipo de sistemas. En los últimos años se han utilizado una gran cantidad de conjuntos, sin embargo, en los trabajos revisado se encontraron algunos conjuntos que destacan, ya sea, por la gran cantidad de trabajos que los ocupan o por la cantidad de imágenes y clases que poseen. En la (Tabla 1) se muestran los cinco conjuntos de imágenes más relevantes en los últimos años, dando a conocer el número de imágenes, su tamaño, cantidad de clases y el enlace de obtención. En el tamaño de las imágenes se coloca N/A, en los casos donde se tienen tamaños variados. Los datos presentados son extraídos de las paginas oficiales de algunos conjuntos y de (Alzu'bi, Amira and Ramzan, 2015; Varga and Sziranyi, 2017; Cai *et al.*, 2018; Lee and Bang, 2018; Dawood *et al.*, 2019; Mahantesh and Shubha Rao, 2019; Chu and Liu, 2020).

A pesar del gran número de conjunto existentes, y la cantidad de categorías que poseen, se han encontrados algunos inconvenientes en su categorización y otros aspectos encontrados en esta revisión, que son problemas ya discutido en otros trabajos como (Liu *et al.*, 2007; Alzu'bi, Amira and Ramzan, 2015). En los que se coincide en muchas de sus observaciones a los conjuntos de imágenes, por lo que se recomienda considerar algunas de las limitaciones antes de elegir el conjunto de datos de imágenes y en ocasiones usar subconjuntos de estos dependiendo el objetivo del trabajo.

Tabla 1. Conjuntos de imagines más utilizados

NOMBRE	IMÁGENES	TAMAÑO	CLASES	ENLACE DE OBTENCIÓN
Corel-10K	10,000	192 × 128	100	http://www.ci.gxnu.edu.cn/cbir/Dataset.aspx
Corel-5K	5,000	192 × 128	50	https://github.com/watersink/Corel5K
Corel-1K	1,000	384 × 256	10	http://wang.ist.psu.edu/docs/home.shtml
Caltech-101	9,146	300 × 200	102	http://www.vision.caltech.edu/Image_Datasets/Caltech101/
Caltech-256	30,400	300 × 200	257	http://www.vision.caltech.edu/Image_Datasets/Caltech256/
CIFAR-10	60,000	32 × 32	10	http://www.cs.toronto.edu/~kriz/cifar.html
CIFAR-100	60,000	32 × 32	100	http://www.cs.toronto.edu/~kriz/cifar.html
INRIA Holidays	1,491	N/A	500	http://lear.inrialpes.fr/people/jegou/data.php
Pascal (VOC2012)	11,530	N/A	20	http://host.robots.ox.ac.uk/pascal/VOC/
ILSVRC (ImageNet)	1,200,000	N/A	1,000	http://www.image-net.org/about-stats

4.2 Métricas de evaluación

Las métricas nos ayudan a obtener una evaluación objetiva del desempeño de los sistemas, de las más utilizadas en los

trabajos revisados son: *Precision*, *Recall*, *MAP* y *ANMRR*. Que se describen a continuación basado en (Lux and Marques, 2013; Tyagi, 2017). La métrica *Precision* (*P*) de una imagen de consulta en un sistema CBIR se define como el número de imágenes relevantes recuperadas como una fracción del



número total de imágenes recuperadas como se muestra en (1). *Recall* (R) está dada por el número de imágenes relevantes recuperadas entre el número total de imágenes relevantes que están en el conjunto de imágenes (2), es decir el número total de imágenes que pertenece a la misma clase. Ambas métricas dando como resultado un valor entre cero y uno.

$$P = \frac{\text{Imágenes relevantes recuperadas}}{\text{Imágenes recuperadas}} \quad (1)$$

$$R = \frac{\text{Imágenes relevantes recuperadas}}{\text{Imágenes relevantes en el Dataset}} \quad (2)$$

Mean Average Precision (MAP) Esta medida une *Precision* y *Recall*. Esta consta de calcular primero *Precision-at-k* (P_k) que es una medida sencilla que es útil cuando se tienen muchas imágenes relevantes en la recuperación, ya que el usuario prestara atención a las primeras márgenes recuperados. Se define por dos ecuaciones en (3) Y (4), una vez obtenida se procede a obtener el *Average Precision* (AP) de cada una de las consultas realizadas (5) y (6), finalmente se obtiene *MAP* del promedio de todas las consultas (7).

$$P_k = k^{-1} \sum_{n=1}^k r(x_n) \quad (3)$$

$$r(x_n) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_n \text{ es relevante} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4)$$

$$AP_q = |R_q|^{-1} \sum_{k=1}^K P_k \times rel_k \quad (5)$$

$$rel_k = \begin{cases} 1 & \text{si la imagen en } k \text{ es relevante} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (6)$$

$$MAP = |Q|^{-1} \sum_{q=1}^T AP_q \quad (7)$$

Donde P_k es la precisión hasta la imagen en la posición k , k indica la posición de recuperación, K el total de imágenes recuperadas, x_n la imagen recuperada en la posición n , R_q es el total de imágenes en la clase para la consulta q , y Q es el total de consultas realizadas.

Average Normalized Modified Retrieval Rank (ANMRR), es una métrica propuesta por el grupo MPEG, es una de las pocas métricas que surgen específicamente para medir el desempeño de los sistemas CBIR, esta métrica se define con 6 ecuaciones que se muestran a continuación (8)-(13).

$$Rank_k = \begin{cases} Rank_k & \text{if } Rank_k \leq K_q \\ 1.25 \times K_q & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (8)$$

$$K_q = \min\{4 \times R_q, 2 \times \max[R_q, \forall q]\} \quad (9)$$

$$AVR_q = \sum_{k=1}^{R_q} \frac{Rank_k}{R_q} \quad (10)$$

$$MRR_q = AVR_q - 0.5 \times [1 + R_q] \quad (11)$$

$$NMRR_q = \frac{MRR_q}{1.25 \times k_q - 0.5 \times [1 + R_q]} \quad (12)$$

$$ANMRR = |T|^{-1} \sum_{q=1}^T NMRR_q \quad (13)$$

Donde $Rank_k$ es asignada de acuerdo con la posición en la que son recuperadas las imágenes de la clase a la que pertenece la imagen e consulta, en caso de ser menor o igual a K_q , ésta obteniéndose a partir del total de imágenes en la clase, para después obtener AVR_q , que se puede definir como el Rank promedio para la consulta, MRR_q como un ranking de recuperación modificado, que se normaliza para obtener $NMRR_q$, y finalmente, el promedio de las $NMRR_q$ de todas las consultas da como resultado la métrica $ANMRR$ con valores entre cero y uno.

5. DISCUSIÓN

Las ontologías presentan muy buenos resultados y la asociación de características de bajo nivel con conceptos semánticos parece dar buenos resultados, la ontología de objetos es relativamente sencilla y los intervalos utilizados son a menudo suficientes para una buena recuperación. Por otro lado, como se puede observar la mayoría de los trabajos de ontologías no van dirigidos a la recuperación basada en contenido, son aplicados principalmente a la anotación automática para sistemas de recuperación basados en texto y los pocos encontrados, se utilizan con otras técnicas y constantemente no utilizan únicamente el contenido de bajo nivel de la imagen lo que aumenta la cantidad de información necesaria y por ende la cantidad de recursos consumidos.

Los sistemas de aprendizaje automático se centran en máquinas de soporte vectorial y redes neuronales, utilizando bolsa de palabras visual y redes neuronales convolucionales, estos sistemas presentan evaluaciones prometedoras y avanza rápidamente ya que surgen nuevos modelos por el gran interés que se tiene actualmente. Existe una gran cantidad de trabajos que incluyen sistemas de aprendizaje automático no solo en la obtención de características de alto nivel en imágenes sino en muchas otras áreas de los sistemas de recuperación. El principal inconveniente que presentan es en la cantidad de datos que se requiere para el entrenamiento y el tiempo que tarda este, así mismo que los sistemas se ven limitados a las categorías presentes en el conjunto de imágenes utilizado.

El enfoque de las plantillas semánticas pareciera ser un enfoque prometedor, sin embargo, parece ir disminuyendo el interés presentado por los investigadores, por lo que valdría la pena profundizar en estos trabajos para encontrar los motivos, uno de estos problemas es mencionado por Tyagi en (Tyagi, 2017) donde menciona que un posible problema con este tipo de enfoque es que se requiere un trabajo manual extenso para que el sistema aprenda nuevos conceptos, otro posible acontecimiento que podría afectar es el terrenos que han ido ganando los otros enfoques como las ontologías, o el aprendizaje automático en los últimos años, por sus buenos resultados.

El cuarto enfoque presenta ventajas en algunos métodos que no utilizan técnicas de aprendizaje ya que esto reduce la cantidad de recursos necesarios. Parece un enfoque interesante



ya que los sistemas de recuperación requieren de velocidad, y medir la similitud entre imágenes es un proceso más rápido que procesar toda una imagen para poder otorgar una anotación o concepto semántico que se compara con las de las otras. Aunado a eso la ventaja que presentan algunos de estos descriptores es la de no requerir de una cantidad limitada de categorías o conceptos semánticos asociados, como ocurriría en cualquiera de los otros enfoques, donde por ejemplo los sistemas de aprendizaje automático cuentan con la cantidad de categorías suministradas en su aprendizaje y a pesar de que se han hecho esfuerzos para mantener reentrenando los sistemas con la posibilidad de aumentar la cantidad de categorías los sistemas requieren de más procesos lo que ralentiza la recuperación. Sin embargo, es complicado verificar que el descriptor presenta alto nivel semántico como se menciona en algunos de ello, ya que no se ha encontrado forma de verificar esto y al no estar asociado directamente a un concepto semántico queda en duda el hecho de ser un descriptor de alto nivel semántico.

6. CONCLUSIONES

Las ontologías presentan buenos resultados y son un enfoque interesante principalmente en la anotación automática de imágenes, lo que igual es interesante en la recuperación basada en texto ya que una de las desventajas que presentan estos sistemas, es el trabajo humano que se requiere para la anotación. El aprendizaje automático es un enfoque prometedor y con resultados interesantes que se ve beneficiado con los avances tecnológicos actuales con el computo paralelo, sin embargo, actualmente el entrenamiento de los sistemas requiere de una cantidad considerable de datos y en el caso del aprendizaje profundo aun mayor, y se ve limitado al tipo de imágenes utilizadas en el entrenamiento, estos podrían ser caminos interesantes de investigación para mejorar los resultados. Las plantillas semánticas han tenido muy poco interés en los últimos años por lo que no se tiene suficiente investigación para competir con los resultados de otros enfoques. Finalmente, los descriptores que presentan alto nivel semántico parecen ser un enfoque interesante ya que podrían presentar ventajas no solo en los sistemas que se basan solo en los descriptores utilizando medidas de distancia para la recuperación, sino que, podrían aplicarse incluso en los otros enfoques mejorando considerablemente los resultados obtenidos. Sin embargo, surge la necesidad de estudiar y mejorar las diferentes medidas de similitud y descriptores de bajo nivel utilizados ya que son un factor importante que considerar en la recuperación. En este último enfoque queda la duda referente al hecho de poder clasificarlos como descriptores de alto nivel semántico ya que no están relacionados directamente con algún concepto, a pesar de ello, al ser descriptores derivado de relaciones de los descriptores de bajo nivel, podrían considerarse descriptores de más alto nivel. Por lo general los sistemas que entregan mejores resultados con los que utilizan más de un enfoque en la obtención de descripciones de alto nivel aprovechando las ventajas de cada uno de ellos. En lo que respecta a la evaluación se requiere de trabajo en el área, entre ellos el hecho de poder validar la reducción de la brecha semántica ya que las métricas y los conjuntos de datos actuales no parecen estar

logrando una correcta evaluación de la reducción de la brecha semántica por lo difícil que es este problema, debido a la subjetividad humana, se podría proponer mejores métricas y conjuntos de datos que estén clasificados en términos semánticos de una mejor manera que los actuales, ésta es una tarea complicada y que requiere de mucho trabajo. Como trabajo futuro este trabajo podría complementarse con tablas de comparación de los diferentes trabajos encontrados para tener una comparación objetiva sobre los resultados de cada uno de los enfoques con las métricas y conjuntos de imágenes mencionados.

7. AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- Ahmad, J. et al. (2016) 'Multi-scale local structure patterns histogram for describing visual contents in social image retrieval systems', *Multimedia Tools and Applications*, 75(20), pp. 12669–12692.
- Alzu'bi, A., Amira, A. and Ramzan, N. (2015) 'Semantic content-based image retrieval: A comprehensive study', *Journal of Visual Communication and Image Representation*. Elsevier Inc., 32(July), pp. 20–54. doi: 10.1016/j.jvcir.2015.07.012.
- Alzu'bi, A., Amira, A. and Ramzan, N. (2017) 'Content-based image retrieval with compact deep convolutional features', *Neurocomputing*. Elsevier B.V., 249, pp. 95–105. doi: 10.1016/j.neucom.2017.03.072.
- Assfalg, J., Bimbo, A. D. and Pala, P. (2000) 'Using Multiple examples for content-based retrieval', in *International Conference Multimedia and Expo*.
- Bai, C., Huang, L., et al. (2018) 'Optimization of deep convolutional neural network for large scale image retrieval', *Neurocomputing*. Elsevier B.V., 303, pp. 60–67. doi: 10.1016/j.neucom.2018.04.034.
- Bai, C., Chen, J. nan, et al. (2018) 'Saliency-based multi-feature modeling for semantic image retrieval', *Journal of Visual Communication and Image Representation*. Elsevier, pp. 199–204. doi: 10.1016/j.jvcir.2017.11.021.
- Bala, A. and Kaur, T. (2016) 'Local *texton* XOR patterns: A new feature descriptor for content-based image retrieval', *Engineering Science and Technology, an International Journal*. Elsevier B.V., 19(1), pp. 101–112. doi: 10.1016/j.jestch.2015.06.008.
- Cai, Zhiyin et al. (2018) 'Feature extraction with triplet convolutional neural network for content-based image retrieval', *Proceedings of the 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2017, 2018-February*, pp. 337–342. doi: 10.1109/ICIEA.2017.8282867.
- Chang, S. F., Chen, W. and Sundaram, H. (1998) 'Semantic visual templates: linking visual features to semantics', *IEEE International Conference on Image Processing*, 3, pp. 531–535. doi: 10.1109/icip.1998.727321.



- Chen, Y., Wang, J. Z., and R. Krovetz (2003) 'An unsupervised learning approach to content-based image retrieval', in *IEEE Proceedings of the International Symposium on Signal Processing and its Applications*, pp. 197–200.
- Chu, K. and Liu, G. H. (2020) 'Image Retrieval Based on a Multi-Integration Features Model', *Mathematical Problems in Engineering*, 2020. doi: 10.1155/2020/1461459.
- Dawood, Hussain et al. (2019) 'Correlated microstructure descriptor for image retrieval', *IEEE Access*. IEEE, 7, pp. 55206–55228. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2911954.
- Deepak, G. and Priyadarshini, J. S. (2018) 'Personalized and Enhanced Hybridized Semantic Algorithm for web image retrieval incorporating ontology classification, strategic query expansion, and content-based analysis', *Computers and Electrical Engineering*. Elsevier Ltd, 72, pp. 14–25. doi: 10.1016/j.compeleceng.2018.08.020.
- Deepak, G. and Sheeba Priyadarshini, J. (2018) A hybrid semantic algorithm for web image retrieval incorporating ontology classification and user-driven query expansion, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer Singapore. doi: 10.1007/978-981-10-7200-0_4.
- Deniziak, S. and Michno, T. (2016) 'Content based image retrieval using query by approximate shape', in *Proc. Federated Conf. Comput. Sci. Inf. Syst. (FedCSIS)*, pp. 807–816.
- Eakins, J. and Graham, M. (1999) 'Content-based image retrieval', Technical Report, University of Northumbria at Newcastle.
- Gandhani, S. and Singhal, N. (2015) 'Content Based Image Retrieval: Survey and Comparison of CBIR System based on Combined Features', *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 8(11), pp. 417–422. doi: 10.14257/ijsp.2015.8.11.37.
- Huang, F. et al. (2018) 'Sketch-based image retrieval with deep visual semantic descriptor', *Pattern Recognition*. Elsevier Ltd, 76, pp. 537–548. doi: 10.1016/j.patcog.2017.11.032.
- Julesz, B. (1981a) 'A theory of preattentive texture discrimination based on first-order statistics of textons.', *Biological Cybern*, 41(2), pp. 131–138.
- Julesz, B. (1981b) 'Textons, the elements of texture perception, and their interactions.', *Nature*, 290(5802).
- Julesz, B. and Bergen, J. (1987) 'Human factors and behavioral science: Textons, the fundamental elements in preattentive vision and perception of textures', *Readings in computer vision*, Elsevier, pp. 243–256.
- Khalidi, B., Aiadi, O. and Lamine, K. M. (2020) 'Image representation using complete multi-texton histogram', *Multimedia Tools and Applications*. Multimedia Tools and Applications, 79(11–12), pp. 8267–8285. doi: 10.1007/s11042-019-08350-1.
- Lee, Y. H. and Bang, S. Il (2018) 'Improved image retrieval and classification with combined invariant features and color descriptor', *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. Springer Berlin Heidelberg, 10(6), pp. 2255–2264. doi: 10.1007/s12652-018-0817-0.
- Liang, J. et al. (2017) 'Semisupervised online multikernel similarity learning for image retrieval', *IEEE Transactions on Multimedia*. IEEE, 19(5), pp. 1077–1089. doi: 10.1109/TMM.2016.2644862.
- Liaqat, M., Khan, S. and Majid, M. (2017) 'Image retrieval based on fuzzy ontology', *Multimedia Tools and Applications*. Multimedia Tools and Applications, 76(21), pp. 22623–22645. doi: 10.1007/s11042-017-4812-9.
- Liu, G. H. et al. (2011) 'Image retrieval based on micro-structure descriptor', *Pattern Recognition*. Elsevier, 44(9), pp. 2123–2133. doi: 10.1016/j.patcog.2011.02.003.
- Liu, Y. et al. (2007) 'A survey of content-based image retrieval with high-level semantics', *Pattern Recognition*, 40(1), pp. 262–282. doi: 10.1016/j.patcog.2006.04.045.
- Liu, Y. et al. (2017) 'Integrating object ontology and region semantic template for crime scene investigation image retrieval', *12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, ICIEA 2017, 2018-Febru, pp. 149–153. doi: 10.1109/ICIEA.2017.8282831.
- Lux, M. and Marques, O. (2013) Visual information retrieval using java and lire.
- Mahantesh, K. and Shubha Rao, A. (2019) 'Content Based Image Retrieval - Inspired by Computer Vision Deep Learning Techniques', *4th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques*, ICEECOT 2019, pp. 371–377. doi: 10.1109/ICEECOT46775.2019.9114610.
- Messina, N. et al. (2019) 'Learning visual features for relational CBIR', *International Journal of Multimedia Information Retrieval*. Springer London, 9(2), pp. 113–124. doi: 10.1007/s13735-019-00178-7.
- Mezaris, V., Kompatsiaris, I. and M.G. Strintzis (2003) 'An ontology approach to object-based image retrieval', in *ICIP*, pp. 511–514.
- Mohamed, M. B. I. (2017) 'A Survey on Content-based Image Retrieval', *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 22(4), pp. 569–578. doi: 10.3724/SP.J.1089.2010.10502.
- Nalini, M. and Malleswari, B. (2016) 'Review on Content Based Image Retrieval: From Its Origin to the New Age', *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*, 3(2), pp. 18–41.
- Natarajan, M. and Sathiamoorthy, S. (2019) 'Wavelet Based Multi-Trend Structure Descriptor for Effective Image Retrieval', *Proceedings of the 4th International Conference on Communication and Electronics Systems*, ICCES 2019, (Icces), pp. 2116–2122. doi: 10.1109/ICCES45898.2019.9002388.
- Nguyen, H. M., Ly, N. Q. and Phung, T. T. T. (2018) 'Large-Scale Face Image Retrieval System at Attribute Level Based on Facial Attribute Ontology and Deep Neuron Network', *ACIIDS 2018*, pp. 539–549. doi: 10.1007/978-3-319-75420-8_51.
- Patil, R. S. and Agrawal, A. J. (2017) 'Content-based Image Retrieval Systems: A Survey', *Advances in Computational Sciences and Technology*, 10(9), pp. 2773–2788. doi: 10.1109/2.410145.
- Podder, D. et al. (2018) Ontology-Driven Content-Based Retrieval of Heritage Images, *Heritage Preservation: A Computational Approach*. doi: 10.1007/978-981-10-7221-5.



- Qayyum, A. et al. (2017) 'Medical image retrieval using deep convolutional neural network', *Neurocomputing*. Elsevier B.V., 266, pp. 8–20. doi: 10.1016/j.neucom.2017.05.025.
- Qi, Y. L., Zhang, G. S. and Li, Y. L. (2016) 'A new method to generate semantic templates based on multilayer perceptron', *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 382, pp. 35–41. doi: 10.1007/978-981-10-0740-8_5.
- Qin, F. et al. (2016) 'An ontology-based semantic retrieval approach for heterogeneous 3D CAD models', *Advanced Engineering Informatics*. Elsevier Ltd, 30(4), pp. 751–768. doi: 10.1016/j.aei.2016.10.001.
- RajaSenbagam, T. and Shanmugalakshmi, R. (2017) 'A Survey on Content Based Image Retrieval for Reducing Semantic Gap', *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(12).
- Raza, A. et al. (2018) 'Correlated primary visual texton histogram features for content base image retrieval', *IEEE Access*. IEEE, 6, pp. 46595–46616. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2866091.
- Raza, A. et al. (2019) 'Square texton histogram features for image retrieval', *Multimedia Tools and Applications*. Multimedia Tools and Applications, 78(3), pp. 2719–2746. doi: 10.1007/s11042-018-5795-x.
- Saritha, R. R., Paul, V. and Kumar, P. G. (2019) 'Content based image retrieval using deep learning process', *Cluster Computing*. Springer US, 22, pp. 4187–4200. doi: 10.1007/s10586-018-1731-0.
- Sathiamoorthy, S. and Natarajan, M. (2020) 'An efficient content based image retrieval using enhanced multi-trend structure descriptor', *SN Applied Sciences*. Springer International Publishing, 2(2). doi: 10.1007/s42452-020-1941-y.
- Shrivastava, N. and Tyagi, V. (2015) 'A Review of ROI Image Retrieval Techniques', In *Proceedings of the 3rd International Conference on Frontiers of Intelligent Computing: Theory and Applications (FICTA)*, 328, pp. 509–520. doi: 10.1007/978-3-319-12012-6.
- Smeulders, M. W. et al. (2000) 'Content-based image retrieval at the end of the early years.', *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 22(12), pp. 1349–1380.
- Smith, J. R. and Li, C. S. (1998) 'Decoding image semantics using composite region templates', *Proceedings - IEEE Workshop on Content-Based Access of Image and Video Libraries, CBAIVL 1998*, pp. 9–13. doi: 10.1109/IVL.1998.694467.
- Tang, J. and Acton, S. T. (2003) 'A decentralized image retrieval system for education', in *Syst. Inf. Eng. Design Symp.*, pp. 7–12.
- Treisman, A. (1980) 'A feature in integration theory of attention', *Cognitive Psychology*, 12(1), pp. 97–136.
- Tyagi, V. (2017) *Content- Based Image Retrieval*. Springer, Singapore.
- Tzelepi, M. and Tefas, A. (2018) 'Deep convolutional learning for Content Based Image Retrieval', *Neurocomputing*. Elsevier B.V., 275, pp. 2467–2478. doi: 10.1016/j.neucom.2017.11.022.
- Umamaheswaran, S. et al. (2019) 'New and robust composite micro structure descriptor (CMSD) for CBIR', *International Journal of Speech Technology*. Springer US, 23(2), pp. 243–249. doi: 10.1007/s10772-019-09663-0.
- Upadhyaya, N. and Dixit, M. (2016) 'A Review: Relating Low Level Features to High Level Semantics in CBIR', *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 9(3), pp. 433–444. doi: 10.14257/ijsp.2016.9.3.37.
- Varga, D. and Sziranyi, T. (2017) 'Fast content-based image retrieval using convolutional neural network and hash function', 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2016 - Conference Proceedings, pp. 2636–2640. doi: 10.1109/SMC.2016.7844637.
- Vijayarajan, V. et al. (2016) 'A generic framework for ontology-based information retrieval and image retrieval in web data', *Human-centric Computing and Information Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, 6(1), pp. 1–30. doi: 10.1186/s13673-016-0074-1.
- Yuan, B. H. and Liu, G. H. (2020) 'Image retrieval based on gradient-structures histogram', *Neural Computing and Applications*. Springer London, 32(15), pp. 11717–11727. doi: 10.1007/s00521-019-04657-0.
- Zeng, Z. (2016) 'A novel local structure descriptor for color image retrieval', *Information*, 7(9). doi: 10.3390/info7010009.
- Zhou, W., Li, H. and Tian, Q. (2017) 'Recent Advance in Content-based Image Retrieval: A Literature Survey', *arXiv preprint arXiv:1706.06064*, p. 1. Available at: <http://arxiv.org/abs/1706.06064>.
- Zhou, X. S. and T.S. Huang (2000) 'CBIR: from low-level features to high- level semantics', *Proceedings of the SPIE, Image and Video Communication and Processing*, 3974, pp. 426–431.
- Zhou, Y., Wang, J. and Chi, Z. (2018) 'Content-based Image Retrieval Based On Eye-tracking', in *Proceedings of the Workshop on Communication by Gaze Interaction*, pp. 1–7.
- Zhu, L. et al. (2017) 'Unsupervised Visual Hashing with Semantic Assistant for Content-Based Image Retrieval', *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. IEEE, 29(2), pp. 472–486. doi: 10.1109/TKDE.2016.2562624.
- Zhuang, Y., Liu, X. and Pan, Y. (1999) 'Apply Semantic Template to Support Content-based Image Retrieval', *Storage and Retrieval for Media Databases 2000*, 3972, pp. 442–449. doi: 10.1117/12.373576.
- Zin, N. A. M. et al. (2018) 'Content-Based Image Retrieval in Medical Domain: A Review', *journal of physics: conference series*, 1019(1). doi: 10.1088/1742-6596/1019/1/012044.



Algoritmo genético multiobjetivo para optimización topológica de una red neuronal

Victor Manuel Gloria Vázquez* Said Polanco Martagon.*
Miguel Ibarra Sanchez* Marco Aurelio Nuño Maganda*
Yahir Hernández Mier*

* Universidad Politécnica de Victoria, Av. Nuevas Tecnologías 5902,
Parque Científico y Tecnológico de Tamaulipas, 87138 Cd Victoria,
Tamps. Email: 1430258@upv.edu.mx, spolancm@upv.edu.mx,
mibarras@upv.edu.mx, mnunom@upv.edu.mx,
yhernandezm@upv.edu.mx.

Resumen: El objetivo de este artículo es la implementación del algoritmo NSGA-II para la optimización multiobjetivo de la complejidad topológica y la precisión de redes neuronales feedforward con el fin de que pueda ser implementado en dispositivos de bajos recursos computacionales como un raspberry pi. Se utilizó el algoritmo genético NSGA-II con múltiples configuraciones para expandir los espacios de búsqueda de la topología para una RNA y se comparó con una búsqueda de fuerza bruta mediante GridSearchCV. Se encontró que mediante una búsqueda multiobjetivo se obtienen topologías con una menor complejidad y mayor precisión, además de que los resultados no dependen de topologías complejas.

Keywords: Redes Neuronales Artificiales, Algoritmo Genético, NSGA-II, Optimización multiobjetivo, Óptimo de pareto, Complejidad, Topología

1. INTRODUCCIÓN

El uso de redes neuronales artificiales (RNA) es la base de las investigaciones de aprendizaje automático, debido a que es una herramienta potente que permite la búsqueda de patrones y coincidencias para trabajos de clasificación y reconocimiento. Sin embargo, distintos estudios han demostrado que muchas de las redes neuronales que se proponen están sobre parametrizadas [Han et al., 2015; Dai et al., 2019; Cai et al., 2019], pues al añadir capas de neuronas en exceso, aumenta considerablemente el número de operaciones a realizar mediante las conexiones entre neuronas, lo que puede dificultar su implementación en dispositivos con menor capacidad de cómputo, limitando el uso de modelos complejos para equipos con mayores capacidades de procesamiento. Además, el uso excesivo de neuronas provocaría que los datos de entrenamiento no sean generalizados correctamente causando un sobreajuste durante el entrenamiento [Oymak and Soltanolkotabi, 2020; Ko et al., 2019].

De esta forma, un punto importante es definir una topología que permita a la red tener una buena precisión, pero sin una cantidad excesiva de neuronas, con el objetivo de que dispositivos con menor potencia de cómputo, como

una tarjeta raspberry, puedan implementar eficientemente la red [Chen et al., 2020]. Para prevenir la exigencia de recursos computacionales causados por el abuso de neuronas, existen distintos tipos de algoritmos de optimización que permiten la reducción y aceleración del modelo creado, como lo son: poda de conexiones [Alencar et al., 2016]; reducción del peso de las operaciones [Cheng et al., 2017]; uso de matrices estructuradas [Tung and Mori, 2018].

El presente artículo plantea la implementación del algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II [Deb et al., 2002] para encontrar la convergencia entre el total de conexiones, conservando la precisión obtenida por el entrenamiento del modelo [Zhang et al., 2020]. El algoritmo NSGA-II permite la identificación del frente de pareto que es donde se identifican las soluciones que están estrechamente relacionadas, tomando en cuenta el total de conexiones y la precisión dada [Zhang et al., 2020].

Motivado por la medida del uso obligatorio de cubrebocas debido a la pandemia de Covid-19 [Chamola et al., 2020], se presenta una aplicación del algoritmo implementado a la clasificación de personas que cuenten con cubrebocas y de personas que no lo tengan, para evaluar los modelos generados por el algoritmo NSGA-II.

★



El presente artículo se divide en las siguientes secciones: Marco teórico, donde se presentan los conceptos utilizados en este trabajo. En el Estado del arte, se presentan trabajos relacionados con la optimización de redes neuronales. En Materiales y métodos, se ofrece un detalle de los recursos utilizados. En Desarrollo experimental, se explican los pasos llevados a cabo para la creación de modelos de redes neuronales. Finalmente, se presenta la sección de resultados y discusión, donde se analizan los resultados obtenidos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Optimización Multiobjetivo

La optimización multiobjetivo se encarga de encontrar soluciones para problemas en donde se tiene dos o más objetivos. La dificultad en los algoritmos para problemas multiobjetivo consiste en que durante la búsqueda de las soluciones, se tiene el inconveniente de que en la mayoría de los casos no es posible encontrar una única solución que satisfaga ambos objetivos, ya que aumentar la eficiencia de un objetivo generalmente degrada al segundo Mirjalili et al. [2018]. El conflicto de los objetivos obliga a encontrar un conjunto de soluciones de no dominancia conocida como óptimo de pareto [Mirjalili et al., 2018; Asrari et al., 2015].

2.2 Óptimo de pareto

Para la resolución de problemas multiobjetivo, en donde no se tiene una solución única para los objetivos dados, es necesario encontrar el conjunto de soluciones no dominadas que satisfagan cada uno de los objetivos establecidos. Por consiguiente, se adoptó el concepto del óptimo de pareto o eficiencia de pareto [Asrari et al., 2015]. El óptimo de pareto establece que no es posible beneficiar a uno de los objetivos sin que otro objetivo se vea perjudicado directamente. De esta forma, se realiza la búsqueda del frente de pareto, en donde se tiene una dominancia de un objetivo con el otro, y al aumentar la eficiencia de un objetivo el otro se degrada [Asrari et al., 2015]. Entre los algoritmos de optimización multiobjetivo propuestos para la búsqueda de las soluciones con mayor viabilidad se encuentra el algoritmo genético NSGA-II [Zhang et al., 2020]. El algoritmo NSGA-II permite mediante cómputo evolutivo permite encontrar el óptimo de pareto de los objetivos dados [Zhang et al., 2020].

2.3 Redes Neuronales Sobreparametrizadas

Debido a la inmensa cantidad de neuronas y conexiones que contiene una red neuronal es común que se sobreparametrice y exceda la cantidad neuronas necesarias para el correcto funcionamiento del modelo, lo que conlleva a una sobrecarga de operaciones que ralentiza el flujo de información y hace que la red consuma más recursos computacionales del equipo donde se esté implementando,

lo que a su vez hace difícil su implementación en dispositivos de menor potencia cómputo [Han et al., 2015; Dai et al., 2019; Cai et al., 2019]. Para prevenir la sobreparametrización de RNA's es importante la búsqueda de una topología que se adecue a las necesidades del problema que se esté tratando. Abusar de número de capas y de neuronas causará que se incremente el total de conexiones lo que aumenta considerablemente el cómputo necesario para el procesamiento, además de que provoca a una mala generalización en los datos y un sobreajuste en la red [Oymak and Soltanolkotabi, 2020; Ko et al., 2019].

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 Poda de conexiones

Una de las técnicas utilizadas para la reducción de tamaños y complejidad en las RNA es la poda de conexiones que consiste en ir eliminando las conexiones que aporten poco o nulo valor al modelo, ya sea con información sin relevancia o conexiones redundantes, dichas conexiones pueden ser eliminadas libremente del modelo afectando de manera insignificante la eficiencia de la red, logrando una optimización ideal, pues al no afectar la eficiencia de gran manera se permite el ahorro de recursos [Sakshi and Kumar, 2019].

3.2 Poda mediante algoritmo genético

La poda es una técnica en la que se van evaluando las conexiones y neuronas e identifican las que tengan una menor importancia para el modelo, por lo cual se eliminan logrando una reducción significativa de la redundancia de información y por consiguiente una mejora en el resultado final [Sakshi and Kumar, 2019; Alencar et al., 2016].

En [Alencar et al., 2016] se utiliza un algoritmo genético multiobjetivo para la poda de neuronas. El autor menciona que inicialmente selecciona un subconjunto de neuronas en las capas ocultas. Posteriormente se establece una función multiobjetivo que define una relación entre la precisión obtenida y el número de neuronas podadas, donde evalúa qué tanto afecta la poda de ciertas neuronas a la precisión de la red y con un margen de pérdida aceptable. Finalmente con el uso de un algoritmo genético se evalúan diferentes topologías en donde se desactivan ciertas neuronas, para posteriormente obtener su precisión. Finalmente se determina, con la combinación de neuronas apagadas, cuales pueden ser eliminadas sin mermar la precisión, dando una optimización considerable para la red manteniendo una precisión similar o mejor a la obtenida con una red sin optimizar.

Para la correcta implementación de un algoritmo genético, es importante encontrar una función con la que se obtenga el nivel de adaptación del individuo, el calcular la adaptación es un paso importante, ya que es el valor que indicará la calidad de la solución, debido a que se busca la minimización de los pesos de una RNA. [Janjic et al., 2019] toma en consideración dos puntos importantes: 1)



qué tan bien se clasifica la entrada y; 2) cuántos pesos son necesarios para obtener su grado de precisión, lo que determina los dos objetivos a evaluar en el algoritmo. Una vez implementado el algoritmo genético, presentan como resultados que del 72.4% y el 89.6% de las conexiones entre las capas pueden ser removidas sin afectar negativamente la precisión del modelo e incluso lograron mejorar dicha precisión entre 1.1% y 0.17% [Janjic et al., 2019]. Finalmente se concluye que con el manejo correcto de los parámetros es posible mejorar las implementaciones de las RNA, logrando una reducción significativa manteniendo la eficiencia [Janjic et al., 2019].

4. MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente sección se detallan los materiales y métodos utilizados para el desarrollo de los experimentos.

4.1 Bibliotecas

- **Sklearn:** Es una biblioteca de funciones que ofrece múltiples herramientas de aprendizaje automático. También ofrece lo necesario para el preprocesamiento de la información que será analizada y cuenta con métricas de evaluación para comparar los resultados obtenidos. Para fines de este proyecto, mediante Sklearn se hace uso de la herramienta MLPClassifier [Learn, 2020b], la cual es la implementación de una red perceptrón multicapa. Entre los hiperparámetros se encuentra la cantidad de neuronas a utilizar, las cuales se pueden agrupar en capas a voluntad del usuario. Por otro lado, también se cuenta con la herramienta GridSearchCV, la cual permite obtener todas las combinaciones posibles de los hiperparámetros [Learn, 2020a] y como resultado se obtiene la combinación con mejor resultado según la métrica elegida. Esto es de gran utilidad, ya que permite comparar los resultados con el algoritmo genético implementado.
- **DEAP:** Es un framework que brinda herramientas necesarias para la implementación de algoritmos de cómputo evolutivo, entre los que se encuentra el algoritmo NSGA-II, facilitando el uso de las distintas técnicas de mutación, cruza, selección e implementación. Lo anterior permite probar el proceso de evolución de distintas formas y obtener distintos resultados [DEAP, 2020].
- **OpenCV:** Es una biblioteca de funciones de visión por computadora que permite el manejo de imagen y vídeo. Además, ofrece implementaciones de algoritmos más complejos para el procesamiento de imágenes [OPENCV, 2020].

4.2 Hardware

- Para la implementación de NSGA-II se utilizó un equipo de cómputo con las siguientes características: Sistema operativo Ubuntu 20.04 64 bits, Procesador i7-8550U 3.0GHz8, memoria Ram de 20GB, disco duro SSD.

- Se utilizó un dispositivo raspberry 4 con las siguientes características: Sistema operativo Raspberry Pi OS 64 bits, 1.40GHz4, memoria Ram de 1GB.

4.3 Datasets

Para obtener resultados variados, se usaron dos datasets. Cada uno de ellos cuenta con diferentes cantidades de imágenes para el entrenamiento. La principal diferencia entre ambos datasets es que el primer dataset está compuesto por imágenes reales de personas utilizando cubrebocas [Deb, 2020], mientras que en el segundo, las imágenes de personas con cubrebocas contienen cubrebocas generados por computadora [Koyomi, 2020]. En la Tabla 1 se muestra el total de datos de entrenamiento por clase para ambos datasets. En las Figuras 1 y 2 se observan ejemplos de imágenes extraídas de ambos datasets.



Figura 1. Ejemplo de imágenes del dataset uno.



Figura 2. Ejemplo de imágenes del dataset dos.

	Con Máscara	Sin Máscara
Dataset uno	1898	1930
Dataset dos	690	686

Tabla 1. Total de datos de entrenamiento de los datasets uno y dos.

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1 Preprocesamiento de datos de entrenamiento

Para la clasificación de imágenes, dos formas de procesamiento son generalmente utilizadas. La primera hace



uso de la información de todos los píxeles, los cuales son organizados en forma matricial, lo que implica el uso de una gran cantidad de memoria y poder de cálculo para procesar esta información. La segunda forma hace uso de puntos clave (*feature points*), lo que reduce en gran medida la cantidad de información a procesar, debido a que solo se utilizan los puntos de la imagen que contienen la información más relevante. En este trabajo se clasificaron las imágenes mediante puntos claves usando el modelo de bolsa de palabras (*Bag of Words*). Inicialmente, se obtuvieron los puntos clave con el algoritmo *SIFT* [Lowe, 1999], y se agruparon en 500 clusters mediante el método de agrupamiento *KMeans*. Finalmente, por cada imagen se genera un histograma de 500 posiciones, donde cada posición representa la probabilidad de cada cluster. Con el modelo de *KMeans* que fue generado con anterioridad, nuevamente se extrajeron los puntos claves de cada una de las imágenes, donde cada punto se predijo a qué cluster pertenecía, con lo que la probabilidad de que el punto clave perteneciera a ese cluster se sumaba a la misma posición del histograma, es decir, si el punto clave se determinaba en el cluster diez, en la posición diez del histograma se sumaba $1/TotalPuntosClaveIMG$. Los histogramas generados sirvieron como datos de entrenamiento para los modelos de RNA.

5.2 Algoritmo NSGA-II para hiperparámetros

La biblioteca DEAP provee diferentes técnicas de mutación, cruza, selección, así como diferentes implementaciones del algoritmo NSGA-II. Estas técnicas pueden ser combinadas para obtener diferentes resultados. El encontrar una combinación correcta puede ayudar a mejorar el rendimiento y rapidez de la implementación. Es importante mencionar que para el correcto funcionamiento de DEAP es necesario establecer una función de evaluación adecuada. En la implementación usada en este trabajo se utilizaron dos objetivos: la precisión de la red y el total de conexiones, que se obtienen al multiplicar cada una de las capas ocultas de la red. En la Tabla 2 se pueden observar las distintas combinaciones de mutación, cruza, selección y algoritmo NSGA-II que se combinan aleatoriamente.

Mutación	Cruza
mutShuffleIndexes	cxOnePoint
mutFlipBit	cxTwoPoint
mutUniformInt	cxUniform
mutPolynomialBounded	cxSimulatedBinaryBounded

Selección	Algoritmo NSGA-II
selNSGA2	eaSimple
selRoulette	eaMuPlusLambda
selTournament	eaMuCommaLambda

Tabla 2. Técnicas para NSGA-II en DEAP.

Entre los resultados que la implementación de NSGA-II en DEAP arroja se encuentran la población final y el frente de Pareto. Éste último indica cuáles son los mejores resultados obtenidos con base en los objetivos

plantados. Además, DEAP permite realizar procesos múltiples que únicamente se ven limitados por equipo de cómputo, lo que permite acelerar la implementación y obtener resultados con mayor rapidez.

5.3 Comparación de resultados de la ejecución de NSGA-II

El algoritmo NSGA-II fue implementado con cinco diferentes configuraciones de cruza, mutación, selección y tipo de algoritmo. Estas combinaciones se muestran en la Tabla 2. Al mismo tiempo, se tomaron diferentes tasas de mutación y selección con el objetivo de observar cuál de las implementaciones arrojaba mejores resultados en cuanto a precisión, total de conexiones y tiempo de ejecución. Para cada dataset se realizó una prueba de control donde se utilizó *GridSearchCV*, el cual utiliza fuerza bruta para evaluar todo el espacio de posibles soluciones. Esto se hizo con la finalidad de tener una referencia contra la cual comparar las implementaciones de NSGA-II. En la Tabla 5 se presenta una comparación de los resultados de cinco pruebas realizadas con NSGA-II, contra los resultados de *GridSearchCV*, cuando se utilizó el dataset uno. En la prueba con mejor precisión obtenida con NSGA-II, los individuos de la población se fueron acercando al óptimo global, por lo que la mayoría de la población se fue agrupando en un solo punto, lo cual se puede observar en la Figura 3. En la Tabla 6 se presentan los resultados de las cinco pruebas realizadas con NSGA-II, comparadas contra el resultado de *GridSearchCV*, cuando se usó el dataset dos. La Figura 4 muestra el total de la población de la prueba en la que se obtuvo la mayor precisión. El frente de Pareto para cada prueba se marcó en color rojo, y se compara con el mejor resultado de la prueba sobre el dataset uno.

6. RESULTADOS

Una vez que las topologías fueron optimizadas, se implementó el modelo en una tarjeta raspberry pi 4. Esto permitió evaluar y validar el desempeño de los modelos en un dispositivo con recursos computacionales limitados. Para las pruebas realizadas, se utilizaron los dos mejores modelos obtenidos de los ambos datasets. En la Tabla 3 se muestran el tiempo de respuesta y el total de imágenes clasificadas por los mejores dos modelos encontrados para el dataset uno. En la Tabla 4 se muestran el tiempo de respuesta y el total de imágenes clasificadas por los mejores dos modelos encontrados para el dataset dos. La Figura 5 presenta una muestra de las imágenes clasificadas.

Modelo	Imágenes Clasificadas	Tiempo
1	163	0.9156 Segundos
2		0.7831 Segundos
3		0.9036 Segundos
4		0.9277 Segundos

Tabla 3. Tiempo de respuesta de los cuatro mejores modelos del dataset uno.



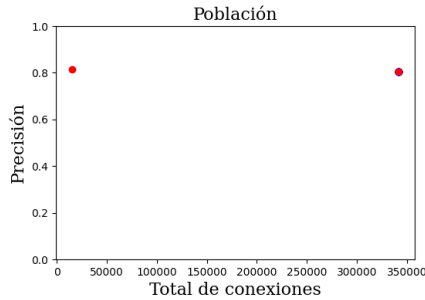


Figura 3. Población de la mejor prueba del dataset uno.

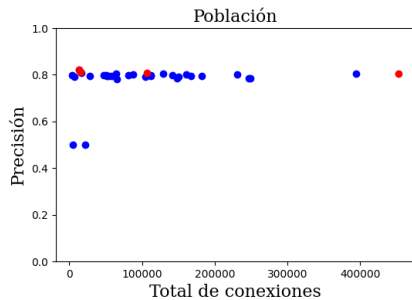


Figura 4. Población de la mejor prueba del dataset dos.

Modelo	Imágenes Clasificadas	Tiempo
1	163	0.0139 Segundos
2		0.0157 Segundos
3		0.0151 Segundos
4		0.0231 Segundos

Tabla 4. Tiempo de respuesta de los cuatro mejores modelos del dataset dos.



Figura 5. Ejemplos de imágenes ya clasificadas.

6.1 Discusión de resultados

Para la función de evaluación se establecieron dos objetivos: precisión y total de conexiones. La precisión se obtuvo al predecir datos de prueba y comparar los resultados obtenidos con los esperados, este se realizó gracias al método `accuracy_score` de `sklearn`. El total de con-

exiones se estableció al multiplicar las neuronas de cada capa. Para las implementaciones de NSGA-II se utilizaron cuatro capas con un mínimo de cinco y un máximo de 30 neuronas para cada una de las capas, lo que dio en totalidad un espacio de búsqueda de más de 390,625 posibles soluciones. Por otro lado, para las implementaciones utilizando GridSearchCV se utilizaron cuatro capas con un mínimo de diez y un máximo de 17 neuronas por cada capa, lo que da como espacio de búsqueda de 2401 soluciones posibles. En la Tabla 5 se puede comparar el tiempo de ejecución de las implementaciones NSGA-II con el método GridSearchCV donde se puede observar que con NSGA-II se tomó un máximo de 32 minutos, mientras que la implementación mediante GridSearchCV tomó más de siete horas. El tiempo de ejecución de GridSearchCV tomó mucho más tiempo que las implementaciones de NSGA-II, además se debe considerar que el espacio de soluciones para GridSearchCV es mucho menor que el espacio para NSGA-II.

Por otro lado, al observar topología y la precisión de los resultados, en la Tabla 5 para la fila uno se puede observar que se utilizó un topología con un total de 15,428 conexiones dando como resultado una precisión de 0.8159, mientras en la fila dos se obtuvo un total de 29 conexiones con una precisión de 0.8132, lo que demuestra únicamente una degradación de 0.0027 en la precisión. Para la Tabla 6 se da un caso similar para la fila dos donde se tienen 156 conexiones en sus capas ocultas con una precisión del 0.8188, mientras en la fila tres se tienen 35,574 conexiones con la misma precisión de 0.8188. Se puede deducir que no es necesaria una gran cantidad de neuronas para tener buenos resultados. Como se observa en algunos casos utilizar una menor cantidad de capas puede dar una mejor precisión comparado con topologías más extensas. Esto último se demuestra en la Figura 4, en donde el óptimo de pareto se muestra en rojo y se observa que conforme disminuyen las conexiones, aumenta la precisión.

6.2 Conclusión y trabajo futuro

Se observó que el éxito de las redes neuronales no depende de la cantidad de neuronas, sino más bien del uso de una topología correcta, pues en los resultados obtenidos se encontró que algunas de las topologías con menor complejidad dieron mejores resultados que las topologías más extensas, lo que permitiría su implementación en un dispositivo de recursos computacionales limitados, como la tarjeta raspberry. Asimismo, NSGA-II es una gran herramienta que permite explorar un extenso espacio de soluciones para encontrar los objetivos deseados sin invertir una gran cantidad de tiempo, con lo que se pudieron encontrar topologías de redes neuronales eficientes para la optimización de las mismas. Debido al éxito de NSGA-II en la búsqueda topológica, se abre la posibilidad de optimizar aún más la red, al realizar una poda directamente de las conexiones de las neuronas, pues muchas de las dichas conexiones suelen ser de información redundante o de poca importancia.



Tabla 5. Resultados de implementación con el dataset uno utilizando los datos de entrenamiento.

Configuración								Mejor Resultados Por Precisión			
	Algoritmo	Mutación	Selección	Cruza	Taza de Cruza	Tasa de mutación	Máximo y mínimo de Neuronas	Neuronas Resultantes	Total Conexiones	Precisión	Tiempo de ejecución (hh:mm:ss)
1	eaMuPlus-Lambda	mutFlipBit	sel-Tournament	cxSimulated-BinaryBounded	0.0732	0.781	(5,5,5,5), (30,30,30,30)	(28,19,29)	15428	0.8159	00:32:26
2	eaMuComma-Lambda	mutFlipBit	selRoulette	cxSimulated-BinaryBounded	0.2407	0.5976	(5,5,5,5), (30,30,30,30)	(29)	29	0.8132	00:21:57
3	eaSimple	mutUniform-Int	selRoulette	cxTwoPoint	0.2313	0.7616	(5,5,5,5), (30,30,30,30)	(25,29,5,9,)	32625	0.8094	00:23:56
4	eaMuPlus-Lambda	mutUniform-Int	selNSGA2	cxOnePoint	0.1119	0.6105	(5,5,5,5), (30,30,30,30)	(23,13,6,16)	28704	0.8068	00:25:43
5	eaMuPlus-Lambda	mutUniform-Int	sel-Tournament	cxTwoPoint	0.4743	0.285	(5,5,5,5), (30,30,30,30)	(19,11,18,6)	22572	0.8042	00:21:37
6	GridSearchCV	NA	NA	NA	NA	NA	(10,10,10,10), (17,17,17,17)	(14,16,15,14)	47040	0.7949	07:15:22

Tabla 6. Resultados de implementación con el dataset dos utilizando los datos de entrenamiento.

Configuración								Mejor Resultados Por Precisión			
	Algoritmo	Mutación	Selección	Cruza	Taza de Cruza	Tasa de mutación	Máximo y mínimo de Neuronas	Neuronas Resultantes	Total Conexiones	Precisión	Tiempo de ejecución (hh:mm:ss)
1	eaSimple	mut-Polynomial-Bounded	selNSGA2	cxSimulated-Binary-Bounded	0.5524	0.1712	(5,5,5,5), (30,30,30,30)	(6,14,20,8)	13440	0.8225	00:09:17
2	eaMuComma-Lambda	mutFlipBit	selRoulette	cxTwoPoint	0.5187	0.2888	(5,5,5,5), (30,30,30,30)	(13,12)	156	0.8188	00:10:54
2	eaMuPlus-Lambda	mutPolynomial-Bounded	selNSGA2	cxOnePoint	0.221	0.159	(5,5,5,5), (30,30,30,30)	(7,21,22,11)	35574	0.8188	00:06:36
4	eaSimple	mutPolynomial-Bounded	sel-Tournament	cxTwoPoint	0.4092	0.4856	(5,5,5,5), (30,30,30,30)	(27,22,24,28)	399168	0.8188	00:11:14
5	eaSimple	mutShuffle-Indexes	sel-Tournament	cxUniform	0.3117	0.1662	(5,5,5,5), (30,30,30,30)	(24,20,30,22)	316800	0.8152	00:07:59
6	GridSearchCV	NA	NA	NA	NA	NA	(10,10,10,10), (17,17,17,17)	(10,14,15,14)	47040	0.8081	03:58:49



REFERENCIAS

- Alencar, A.S., Neto, A.R.R., and Gomes, J.P.P. (2016). A new pruning method for extreme learning machines via genetic algorithms. *Applied Soft Computing*, 44, 101–107.
- Asrari, A., Lotfifard, S., and Payam, M.S. (2015). Pareto dominance-based multiobjective optimization method for distribution network reconfiguration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(3), 1401–1410.
- Cai, X., Yi, J., Zhang, F., and Rajasekaran, S. (2019). Adversarial structured neural network pruning. In *Proceedings of the 28th ACM International Conference on Information and Knowledge Management*, 2433–2436.
- Chamola, V., Hassija, V., Gupta, V., and Guizani, M. (2020). A comprehensive review of the covid-19 pandemic and the role of iot, drones, ai, blockchain, and 5g in managing its impact. *IEEE Access*, 8, 90225–90265.
- Chen, Y., Li, C., Gong, L., Wen, X., Zhang, Y., and Shi, W. (2020). A deep neural network compression algorithm based on knowledge transfer for edge end device. *Computer Communications*.
- Cheng, Y., Wang, D., Zhou, P., and Zhang, T. (2017). A survey of model compression and acceleration for deep neural networks. *arXiv preprint arXiv:1710.09282*.
- Dai, X., Yin, H., and Jha, N.K. (2019). Nest: A neural network synthesis tool based on a grow-and-prune paradigm. *IEEE Transactions on Computers*, 68(10), 1487–1497.
- DEAP (2020). DEAP documentation. URL <https://deap.readthedocs.io/en/master/>.
- Deb, C. (2020). Face Mask Detection. URL <https://github.com/chandrikadeb7/Face-Mask-Detection>.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182–197.
- Han, S., Mao, H., and Dally, W.J. (2015). Deep compression: Compressing deep neural networks with pruning, trained quantization and huffman coding. *arXiv preprint arXiv:1510.00149*.
- Janjic, S., Thulasiraman, P., and Bruce, N. (2019). In-depth evaluation and experimental analysis of a weight pruning genetic algorithm. In *2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 1814–1821. IEEE.
- Ko, V., Oehmcke, S., and Gieseke, F. (2019). Magnitude and uncertainty pruning criterion for neural networks. In *2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 2317–2326. IEEE.
- Koyomi (2020). Mask dataset. URL <https://www.kaggle.com/koyomi455/mask-dataset>.
- Learn, S.K. (2020a). GridSearchCV. URL https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.model_selection.GridSearchCV.html?highlight=grid%20search#sklearn.model_selection.GridSearchCV.
- Learn, S.K. (2020b). MLPClassifier. URL https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.neural_network.MLPClassifier.html?highlight=mlp#sklearn.neural_network.MLPClassifier.
- Lowe, D.G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. In *Proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision*, volume 2, 1150–1157. Ieee.
- Mirjalili, S.Z., Mirjalili, S., Saremi, S., Faris, H., and Aljarah, I. (2018). Grasshopper optimization algorithm for multi-objective optimization problems. *Applied Intelligence*, 48(4), 805–820.
- OPENCV (2020). OPENCV. URL <https://opencv.org/>.
- Oymak, S. and Soltanolkotabi, M. (2020). Towards moderate overparameterization: global convergence guarantees for training shallow neural networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*.
- Sakshi, S. and Kumar, R. (2019). A neuro-genetic technique for pruning and optimization of ann weights. *Applied Artificial Intelligence*, 33(1), 1–26.
- Tung, F. and Mori, G. (2018). Deep neural network compression by in-parallel pruning-quantization. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*.
- Zhang, L., Ge, H., Ma, Y., Xue, J., Li, H., and Pecht, M. (2020). Multi-objective optimization design of a notch filter based on improved nsga-ii for conducted emissions. *IEEE Access*, 8, 83213–83223.



Características mecánicas del texto para medir la legibilidad de los recursos de aprendizaje contenidos en Servicios Web

*Felipe de Jesús Pérez Rodríguez, **Olivia Graciela Frago Diaz, ***René Santaolaya Salgado, ****Mario Guillen Rodríguez

Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, CP 62490

*{*fperez19ce}@cenidet.edu.mx*

*{**olivia.fd, ***rene.ss, ****mario.gr}@cenidet.tecnm.mx*

Abstract: The use of TIC's has led to an increase in the amount of learning resources available on the Internet, however, although there is a high amount of available resources, not all of them meet quality standards or characteristics that aim to transmit knowledge. Legibility is an important attribute because it is the first instance of the reader, so giving a guideline for the selection of the resource is important. The purpose of the tool is to provide a set of calculations related to the readability of learning resources. The interface of the developed product shows 9 attributes of the text, where the user can select one or more, also has control over the weighting of each selected attribute. Therefore, this work presents the development of a software tool based on web services that aims to facilitate the evaluation of the mechanical characteristics of learning resources in Word and PDF formats.

Keywords: e-Learning, quality metrics, Web Service, learning resource.

1. INTRODUCCIÓN

Las instituciones, organizaciones y empresas han optado por implementar capacitaciones a distancia utilizando las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC's). La comisión de las comunidades europeas propuso en 2001 un plan de acción para la implementación del e-Learning con el objetivo de mejorar la calidad del aprendizaje facilitando el acceso a recursos digitales y servicios (Comisión de las Comunidades Europeas, 2001). Esto ha ido en crecimiento, desde el 2011 al 2020; el e-Learning ha tenido un crecimiento del 7.6 al 9.6% anual (OBS, 2020). A través de las TIC's se transmiten **los cuatro principales recursos de aprendizaje**, que son: **audio, video, texto e imagen** (Sicilia, 2016).

A la fecha, se han realizado trabajos de análisis de recursos de aprendizaje textuales (Islam and Mehler, 2013), diversos autores identificaron que **el recurso texto posee 3 características que son: mecánicas, sintácticas y semánticas** (Burststein, Marcu and Knight, 2003)(Martínez, Cosentino and Cabot, 2017).

La oración es la estructura base de cualquier texto. (Huang, 2019). Se a evaluado la forma de escritura de los autores con base en la estructura de las oraciones. Se documenta en (Cantalejo and Lorda, 2003) una investigación de otro autor que se desarrolla un índice de legibilidad para los textos. **Las características identificadas tienen como finalidad garantizar la transmisión del conocimiento.** Organizaciones

como The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), tienen guías o herramientas de autor que tienen como objetivo mejorar la legibilidad de los textos(IEEE, 2015). Se han desarrollado herramientas de software como :TAALES, SCA, TAACO que tienen como objetivo analizar mediante PNL (Procesamiento de Lenguaje Natural) el texto y así obtener características léxicas, sintácticas y semánticas (Kim and Crossley, 2018). Herramientas como AES (Automated Essay Scoring) extraen las características físicas del texto como el uso de comas, signos y puntuación del texto (Deane, 2013). **En este trabajo se expone el desarrollo de una herramienta de software CSW (Calidad en Servicios Web) que extrae las características físicas del texto y con base en un conjunto de atributos de calidad propuestos, se asigna una calificación a la legibilidad del recurso de aprendizaje tipo texto.**

2. TRABAJOS RELACIONADOS

En esta sección se da un panorama del impacto visual del texto en los lectores, (Vera, 2018) analiza estilo del contenido y presentación del texto. (Yang, Gu and Yang, 2016) identifican la longitud de oración promedio. (Huang, Wu and Shi, 2018) muestran como la presentación del texto en dispositivos móviles mejora la legibilidad. A continuación, se describen los trabajos relacionados.

2.1 The use of language in medical scientific writing (Vera, 2018)



En este trabajo, el autor establece y describe las cualidades fundamentales del estilo: claridad, concisión, sencillez, naturalidad y originalidad. **Se aborda el estilo desde dos perspectivas: 1) El estilo de contenido:** el aspecto sintáctico y ortográfico del texto. **2) El estilo de presentación:** refiriendo a la legibilidad y armonía visual del texto con el lector, destacando como punto principal la longitud de las oraciones.

El autor describe que mientras más larga sea la oración, mayor será la probabilidad de que el sujeto y el verbo se aparten, o que la oración contenga tanta información que el lector olvide el material importante. **El autor propone que los párrafos, tengan menos de 4 o 5 oraciones y alrededor de 130 palabras.**

2.2 Long-Range Correlations in Sentence Series from "A Story of the Stone" (Yang, Gu and Yang, 2016)

Tomando a la oración como la unidad del lenguaje, en este artículo los autores hacen un análisis de fluctuación sin tendencia para detectar correlaciones de largo alcance en series de oraciones. Los autores concluyen que los patrones no triviales en series de longitud de oración, pueden proporcionar información sobre los comportamientos de la estructura de un texto. Esto, a su vez refleja características como el estilo y la lógica del autor. **A partir de la estadística de las oraciones, se observa que la longitud característica es de 17 palabras por oración.**

2.3 Effects of font size and font style of Traditional Chinese characters on readability on smartphones (Huang, 2019)

El autor de este trabajo investigó los efectos del tamaño y tipo de letra de los caracteres del chino tradicional para conocer el impacto en el tiempo de lectura y la preferencia subjetiva de los participantes. Con el uso de teléfonos inteligentes de 5.5 pulgadas sin limitar su distancia de visualización. Los resultados sugirieron que el tamaño de caracteres más pequeños era mejor que el tamaño más grande para las tareas de lectura. Estos hallazgos podrían contribuir para establecer un diseño tipográfico específico en teléfonos inteligentes.

2.4 The impact of font choice on web pages: Relationship with willingness to pay and tourism motivation (Huang, Wu and Shi, 2018)

A través de experimentos, los autores muestran que la facilidad metacognitiva inducida por la fuente que engloba elementos tales como: cursiva o no cursiva, tipo de letra y color gris o negro, afecta las percepciones de las personas, por ejemplo, en un texto sobre un recorrido turístico, La dirección que causa el efecto visual se aprecia en el sentido de como el turista realiza el recorrido. Los resultados indican que cuando un recorrido visual propuesto ofrece relajación o descanso, aumenta la

preferencia por el recorrido visual fácil opuesto al difícil de leer.

Podemos observar que estos trabajos se enfocan mas a la parte semántica y sintáctica del texto por lo que el área de oportunidad para evaluar la parte mecánica del texto a través de una herramienta de software es la principal diferencia del trabajo aquí presentado.

3. MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se explican las tres características o estándares que componen al texto.

3.1 El estándar sintáctico

La concepción de los autores (Yang, Gu and Yang, 2016), quienes resaltan la importancia de la oración, como la unidad del lenguaje. **La longitud característica es de 17 palabras por oración.** En un sentido interno del texto, las oraciones son lo más esencial para completar el significado y no podía pasarse de largo el aspecto sintáctico, ya que si son muy largas es probable que el lector no tenga una noción tan clara del material importante.

En este trabajo, **el "estándar sintáctico" se define como el encargado de evaluar el orden correcto de las oraciones** (Sujeto, Verbo, Objeto) y su distancia, ya que, según (Vera, 2018), al encontrarse sujeto y verbo cada vez más lejos y separados por otro tipo de elementos de la oración, es muy probable que el texto no tenga la comprensión esperada

3.2 El estándar semántico

Se refiere al contexto en que se encuentra cada oración y palabra del texto. Partiendo de la unidad mínima de la oración, que es la palabra, **el "estándar semántico" se define como la distinción del significado de cada palabra en su contexto discursivo** (Yang, Gu and Yang, 2016). Por ejemplo, el uso de determinados conceptos y sistemas de citación en un artículo científico, distinguido de uno literario.

3.3 El estándar mecánico

Con base en las aportaciones de (Huang, Wu and Shi, 2018) se analizaron los efectos del tamaño de fuente, tipo de fuente, orientación del texto, longitud de la oración, tamaño del párrafo y tamaño de sangrías en la definición de las métricas. Dicho análisis resultó en la necesidad de implementar criterios puramente visuales que permitieran una mejor comprensión de los textos.

Estos estándares fueron una vertiente definitoria en la implementación de estándares más superficiales que no implicaban un significado en el texto en sí, sino más allá de él. Por esta razón **se definió al estándar mecánico como el**



conjunto de características visuales y ergonómicas que permitirán o impedirán al lector tener un contacto armonioso y provechoso con el texto. Para este trabajo se consideran las 15 características contenidas del estándar mecánico, las cuales se describen a continuación:

4. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

La implementación de la solución se desarrolló en tres partes: identificación del tipo de recurso a evaluar, identificación de atributos en los recursos de aprendizaje y la programación de la herramienta.

4.1 Identificación del tipo de recurso a evaluar

Se pueden encontrar diferentes tipos de recursos (Texto, Audio, Video, Presentaciones) la herramienta se enfocó en recursos tipo texto con formatos WORD y PDF.

4.2 Identificación de métricas o atributos

Con base en el estándar mecánico del texto se identificaron 15 atributos del texto en los formatos seleccionados, a continuación, se enumeran y se describen:

4.2.1 Orientación del texto

En la orientación del texto revisa la alineación que tiene cada renglón en el texto.

4.2.2 Tipo de fuente

El tipo de fuente es el segundo criterio tomado en cuenta para evaluar el contenido de los Servicios Web, donde se revisa el tipo de fuente que se utiliza en cada palabra en el texto.

4.2.3 Color de la fuente

El color de la fuente es el tercer criterio para evaluar el contenido, donde se revisa el color de la fuente utilizado en cada palabra del texto.

4.2.4 Tamaño de la fuente

En este criterio se revisa el tamaño de fuente utilizada en cada palabra en el texto.

4.2.5 Color de fondo

El color de fondo se estandarizó en blanco, sin embargo, se establecieron variaciones de este y otros colores más.

4.2.6 Longitud media de la palabra

Pretende medir la facilidad con la que se puede leer un documento con base en la longitud promedio de las palabras

4.2.7 Facilidad de lectura de Flesch

La facilidad de lectura de Flesch es una prueba que busca conocer la facilidad de comprensión de un documento en inglés. La fórmula de Inflesz es una adaptación para medir la legibilidad en el idioma español. La prueba otorga al texto un valor dentro de una escala de puntos. Cuanto más grande el número resultado, más fácil será comprender el documento.

4.2.8 Margen

Un margen es el área entre el contenido principal de una página y los bordes de la misma. El margen ayuda a definir dónde comienza y termina una línea de texto. A su vez, influye seriamente en la distribución del texto en una página.

4.2.9 Interlineado

El espacio vertical entre las líneas de texto se denomina interlineado. La línea de base es la línea sobre la que descansa la mayor parte de las letras. El interlineado se mide desde la base de una línea de texto, hasta la base de la línea anterior.

4.2.10 Número de columnas

Una columna es uno o más bloques verticales de contenidos posicionados en una página, separados por espacios en blanco verticales.

4.2.11 Sangría

La sangría es la introducción de varios caracteres en blanco al comenzar un párrafo.

4.2.12 Longitud de oración promedio

La longitud de la oración promedio debe ser de aproximadamente 15 palabras.

4.2.13 Idioma

El idioma es un sistema de comunicación lingüístico oral o escrito y se caracteriza por regirse según una serie de



convenciones sociales y normas gramaticales que garantizan la comunicación entre las personas.

4.2.14 Numeración, imágenes y tablas

La relación entre el texto y las figuras tienen una relación directa con la comprensión lectora. Esto se puede observar cuando el lector está leyendo y se encuentra con una referencia clara y numerada hacia la imagen, tabla o ecuación.

4.2.15 Puntuación (inicio y fin de párrafo)

De acuerdo a las reglas ortográficas, está establecido que cada inicio de párrafo debe comenzar con una letra mayúscula y finalizar con un punto final.

4.3 Diseño y programación de la herramienta

La figura 1 muestra la interfaz principal de la herramienta, en donde un usuario puede seleccionar los atributos que desea medir, para cada atributo se tiene una casilla para asignar una ponderación específica por parte del usuario. La interfaz desglosa de manera independiente los parámetros obtenidos del documento y los valores calculados para cada atributo.

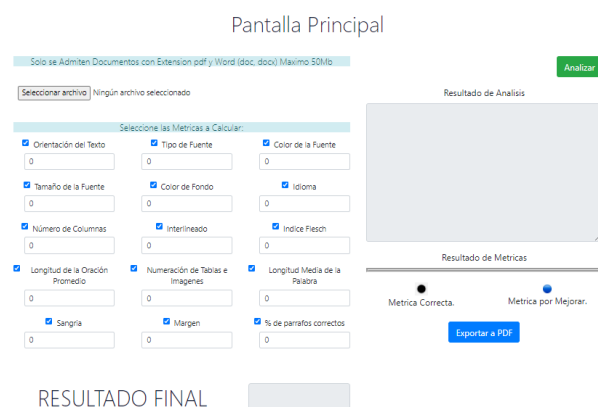


Fig. 1. Pantalla principal del sistema.

Los cálculos por cada atributo se implementaron de manera que son independientes entre sí con el propósito de facilitar los cambios.

La herramienta se desarrolló con base en Servicios Web en JAVA. La interfaz de usuario se desarrolló en .Net.

La Figura 2 muestra el proceso general que realiza la herramienta, el cual consiste en ingresar a la interfaz principal, después el usuario debe seleccionar los atributos a medir y el documento a analizar, el sistema hace una distinción del formato del archivo ingresado para poder

solicitar los Servicios Web correspondientes al formato. Un Servicio Web extraerá todas las características físicas del documento como lo son: tamaño de letra, color de fondo, etc. Una vez recuperados estos datos, el servicio regresa una lista.

El sistema toma los valores correspondientes para cada métrica y envía dichos valores a cada Servicio Web, esto es debido a que cada SW contiene una métrica. Finalmente se almacenan todos resultados de la métrica y se realiza una ponderación, para así mostrar en la interfaz de usuario la calificación correspondiente al archivo analizado.

Es posible ingresar archivos en formatos doc, docx y PDF. Posteriormente la descarga del análisis puede realizarse en formato doc y/o PDF.

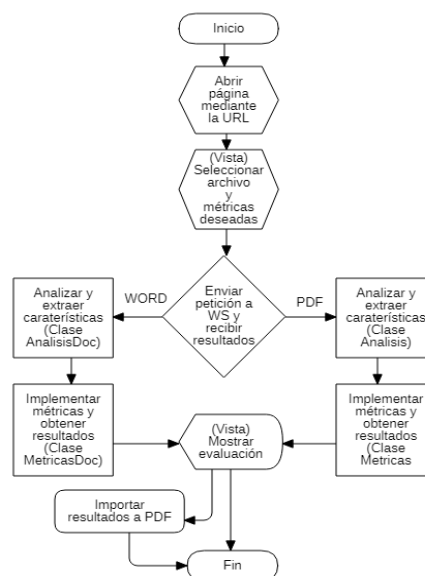


Fig. 2. Proceso general de la herramienta.

4.4 Resultados

Se analizaron un conjunto de recursos contenidos en servicios Web de aprendizaje, posteriormente se realizó un cotejo de las características de los recursos con respecto a las características que puede reconocer la herramienta.

La Figura 3 muestra un fragmento de las características del texto recuperadas al realizar el análisis de un recurso de aprendizaje como ejemplo de prueba. Para todos los casos de prueba, se obtuvieron los resultados esperados, es decir, la herramienta identificó y calificó correctamente todos los recursos utilizados en las pruebas.



1.- Orientación :
LEFT (1) = 1
CENTER (0) = 1
RIGHT (0) = 1
JUSTIFY (1) = 2
Parrafos = 5
2.- Tipo Fuente :
Arial o Calibri (1) = 165
Times New Roman (0.9) = 90
Fuentes definidas (0.2) = 30
Palabras = 285

Fig. 3. Fragmento de características recuperadas.

La Figura 4 muestra los resultados que regresan los Servicios Web al realizar la evaluación de las características del texto enviadas.

Resultado de Métricas
1.- Orientacion del Texto: 1 (0.6000)
2.- Tipo de Fuente: 0.9 (0.8842)
3.- Color de la Fuente: 0.8 (0.7895)
4.- Tamaño de la Fuente: 0.3 (0.2632)
5.- Color de Fondo: 1.0 (1.0000)
6.- Longitud de la Palabra Media: 0.8 (5.0Caracteres)
7.- Idioma: 1 (Español)
8.- Porcentaje párrafos Correctos: 0.8 (0.8000)
9.- Longitud de Oración Promedio: 0.6 (0.6111)

Fig. 4. Área de resultado de métricas.

La herramienta logró extraer de forma consistente las características físicas del documento.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En un esfuerzo por mejorar la calidad de los recursos de aprendizaje de tipo texto, este trabajo tuvo como objetivo desarrollar una herramienta para evaluar la calidad de estos recursos. La evaluación está basada en estándares mecánicos del texto que se enfocan más en la ergonomía y aspectos externos al contenido del texto, sosteniendo parte de la afirmación de que un texto pierde la mayor parte de su significado cuando no es legible.

Es importante mencionar que la herramienta tiene atributos de interoperabilidad y reusabilidad generados por el empleo de Servicios Web usados en la construcción de la herramienta. Como trabajo futuro se pretende implementar las herramientas que ofrece el lenguaje de PYTHON de procesamiento de lenguaje natural para abarcar la sintaxis y la semántica del texto.

REFERENCIAS

Bursteir, Marcu and Knight (2003) 'Finding the WRITE Stuff: Automatic Identification of Discourse Structure in Student Essays', *IEEE Intelligent Systems*. IEEE, 18(1), pp. 32–39. doi: 10.1109/MIS.2003.1179191.

- Cantalejo and Lorda (2003) 'Medición de la legibilidad de textos escritos. Correlación entre método manual de flesch y métodos informáticos', *Atencion Primaria*. Elsevier, 31(2), pp. 104–108. doi: 10.1016/s0212-6567(03)79146-x.
- Comisión de las Comunidades Europeas (2001) 'Plan de acción eLearning. Concebir la educación del futuro'.
- Cordoba, U. de (2020) 'ACADÉMICO UNIVERSITARIO DE CALIDAD Aprendiendo a comunicar por escrito'.
- Deane (2013) 'On the relation between automated essay scoring and modern views of the writing construct', *Assessing Writing*. Elsevier Inc., 18(1), pp. 7–24. doi: 10.1016/j.asw.2012.10.002.
- Huang (2019) 'Ergonomics Effects of font size and font style of Traditional Chinese characters on readability on smartphones', *International Journal of Industrial Ergonomics*. Elsevier, 69(October 2018), pp. 66–72. doi: 10.1016/j.ergon.2018.10.002.
- Huang, Wu and Shi (2018) 'The impact of font choice on web pages: Relationship with willingness to pay and tourism motivation', *Tourism Management*. Elsevier Ltd, 66, pp. 191–199. doi: 10.1016/j.tourman.2017.12.010.
- IEEE (2015) 'Formato IEEE para presentar artículos', p. 3.
- Islam, Z. and Mehler, A. (2013) 'Automatic readability classification of crowd-sourced data based on linguistic and information-theoretic features', *Computacion y Sistemas*, 17(2), pp. 113–123. doi: 10.13053/cys-17-2-1516.
- Kim and Crossley (2018) 'Modeling second language writing quality: A structural equation investigation of lexical, syntactic, and cohesive features in source-based and independent writing', *Assessing Writing*. Elsevier, 37(July 2017), pp. 39–56. doi: 10.1016/j.asw.2018.03.002.
- Martínez, Cosentino and Cabot (2017) 'Model-based analysis of Java EE web security misconfigurations', *Computer Languages, Systems and Structures*. Elsevier Ltd, 49, pp. 36–61. doi: 10.1016/j.cl.2017.02.001.
- OBS (2020) *El mercado del e-learning crecerá cada año un 7.6% hasta 2020 | OBS Business School*. Available at: <https://obsbusiness.school/int/blog-investigacion/e-learning/el-mercado-del-e-learning-crecera-cada-ano-un-76-hasta-2020> (Accessed: 15 October 2020).
- Riazi (2016) 'Comparing writing performance in TOEFL-iBT and academic assignments: An exploration of textual features', *Assessing Writing*. Elsevier Inc., 28, pp. 15–27. doi: 10.1016/j.asw.2016.02.001.
- Sada (2019) 'Manual de ortografía, redacción y estilo', pp. 1–153.
- Sicilia, M.-A. (2016) 'Reusabilidad y reutilización de objetos didácticos: Mitos, realidades y posibilidades', *Revista de Educación a Distancia (RED)*, (50). doi: 10.6018/red/50/6.
- Vera (2018) 'El uso del lenguaje en la redacción científica médica', (1), pp. 51–57.
- Yang, Gu and Yang (2016) 'Long-Range Correlations in Sentence Series from A Story of the Stone', pp. 1–11. doi: 10.6084/m9.figshare.3759300.



Sintonización automática de controladores clásicos usando el método de optimización por enjambre de partículas.

Christopher Morales* Francisco-David Hernández*
Diego Martínez* Domingo Cortés*

* Instituto Politécnico Nacional, ESIME Culhuacán, CDMX, México.
(e-mail: <chrismormtz@gmail.com>, <fcd.hdez@gmail.com>,
<diegomtzg@hotmail.com>, <domingo.cortes@gmail.com>)

Resumen. Se desarrolla el software y procedimientos necesarios para sintonizar automáticamente controladores clásicos, a través de algoritmos de búsqueda basados en la inteligencia de partículas y el método de optimización por enjambre de partículas. Con ello se busca encontrar los valores K_P , K_I de un controlador, tal que el comportamiento de un sistema dinámico descrito, presente una solución mínima en función de su respuesta bajo una función de costo. Para ello se desarrollan las bibliotecas que describen fácilmente el algoritmo de optimización por partículas, el sistema dinámico, su controlador y la función de costo del tipo Norma-2.

Keywords: Aplicaciones de control, Inteligencia de Partículas, Swarm Particle Optimization, PSO, Sistemas Dinámicos, Sintonización de Controladores.

1. INTRODUCCIÓN

La optimización por enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés) se basa en el desplazamiento de un enjambre en búsqueda de alimento. Donde cada individuo se mueve independiente en el espacio de búsqueda y cuando alguno encuentra alimento, se lo comunica a las demás y luego entonces la búsqueda se dirige en ese nuevo sentido, re-direccionando así a todo el enjambre a la fuente de alimento mas cercano. Si dos o mas fuentes son encontradas, la búsqueda se dirige a la más cercana (Kennedy and Eberhart, 1995).

Esta idea de inteligencia colectiva, basada en la observación de los hábitos de parvadas, cardúmenes, enjambres, etc. Aterrizada en el campo de la computación evolutiva, fue originalmente propuesta por el Dr. Kennedy y el Dr. Eberhart en la década de los 90 (Wu et al., 2020).

La optimización por enjambre de partículas consiste en generar un conjunto de partículas con posiciones aleatorias en principio e ir desplazándolas iterativamente en una dirección para que se vayan aproximando a un objetivo o solución óptima (Yu et al., 2020).

Donde se puede definir que:

1. Una partícula, es la representación de una solución potencial a un problema en específico.
2. La posición de la partícula representa los parámetros que influyen a la solución del problema.

3. El movimiento de cada partícula, es la búsqueda de una mejor solución.
4. Un conjunto de partículas conforman un enjambre.

En un principio solo se conoce la posición inicial de la partícula y es necesario determinar la dirección de movimiento. La cual es influenciada por las coordenadas, de la mejor posición que ha logrado ella misma a lo largo de todo su recorrido (factor cognitivo), la mejor posición que ha tenido una partícula dentro del enjambre (factor social) y el factor que preserva el movimiento anterior (factor inercial). La suma de esas tres coordenadas resulta la dirección del movimiento de la partícula. La representación se puede observar en la Figura 1.

Luego entonces cada partícula tiene asociada una posición y una velocidad (Song and Hua, 2020).

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \\ \hat{v} &= \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \end{aligned}$$

El efecto de inercia y velocidad es mas significativo cuando se presentan dos o más partículas. En la Figura 2, se representa la dirección que toman las partículas rumbo a la posición objetivo. Las posiciones resultantes son evaluada bajo una función de costo, la cual determina el desempeño que tiene cada nueva posición. El desempeño es utilizado para evaluar y comparar cuantitativamente las partículas entre sí a lo largo de las iteraciones. (Alatas et al., 2009).

Canónicamente el algoritmo PSO define para la i -ésima partícula de un enjambre:



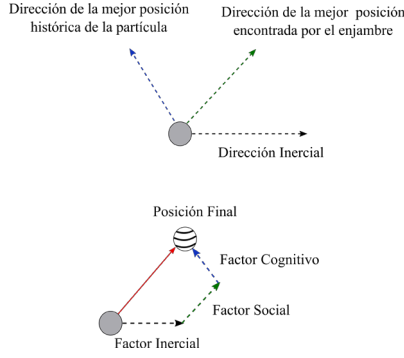


Figura 1. Dirección resultante de una partícula bajo los factores cognitivo, social e inercial

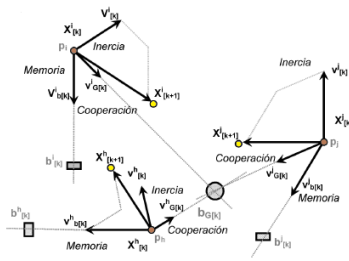


Figura 2. Movimiento de las partículas rumbo a la posición objetivo.

- $x_i(k)$: Posición actual.
- $x_i(k-1)$: Posición previa.
- $x_{ib}(k)$: Mejor posición histórica de la partícula.
- $s_b(k)$: Mejor posición histórica del enjambre.

Donde la definición de velocidad inercial, social y cognitiva están dadas como:

- $v_{i_{inr}}(k) = w(x_i(k) - x_i(k-1))$
- $v_{i_{cgn}}(k) = k_{cgn}(x_{ib}(k) - x_i(k))$
- $v_{i_{scl}}(k) = k_{scl}(s_b(k) - x_i(k))$

Donde: w , k_{cgn} y k_{scl} son los factores de: inercial, cognitivo y social respectivamente.

La velocidad de la partícula i se obtiene de (1):

$$v_i(k) = v_{i_{inr}}(k) + v_{i_{cgn}}(k) + v_{i_{scl}}(k) \quad (1)$$

Finalmente, la posición de la partícula i en el instante $k+1$ está dado por (2):

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k) \quad (2)$$

A través de realizar iterativamente el movimiento de las partículas, estas tienden a seguir la ruta o trayectoria de la partícula cuyo desempeño ha sido mejor, por lo que tienden a converger en un mínimo, pudiendo este ser local o global.

El trabajo desarrollado, implementa el algoritmo descrito en herramientas open-source y con licencia libre

a solicitud, para ser fácilmente adecuado a necesidades particulares. Consta de tres bloques principales, los cuales se describen a continuación.

2. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

La biblioteca de funciones creada permite describir un sistema dinámico, una función de costo y la optimización de un controlador clásico tipo PI en cascada con el sistema dinámico. La optimización se realiza con el método de enjambres de partículas, lo que permite encontrar un mínimo rápidamente, debido al bajo costo computacional que representa en comparación con otros algoritmos de optimización, ya que es muy eficiente en la búsqueda global y provee buenas soluciones al problema de controladores clásicos.

Para evaluar cada partícula es necesario que se simule el sistema en conjunto con cada controlador, el software desarrollado contiene un bloque llamado simulador el cual permite que se realice la simulación de manera independiente para cada partícula, cuyo resultado es utilizado posteriormente para ser evaluado bajo la función de costo definida.

Es por ello que la biblioteca para sintonizar automáticamente controladores clásicos se ha desarrollado en lenguaje 'Python', ya que es una herramienta de licencia libre que permite ejecución multiplataforma, además ofrece un estilo flexible para el manejo de diferentes tipos de datos, lo cual permite obtener un código mas limpio y ordenado, así también cuenta con gran soporte gracias a la amplia comunidad que presenta. Lo que lo hace ideal para que otros usuarios modifiquen y/o realicen aportaciones al desarrollo, para así crecer la biblioteca de sintonización o implementarla en un caso particular.

El programa consta de tres bloques principales:

1. El algoritmo PSO
2. El simulador (Declaración del Sistema Dinámico y el controlador)
3. Función de costo (Norma del Error: Norma-2).

2.1 Algoritmo PSO

En este bloque se implementa el algoritmo PSO, el cual tiene como objetivo generar partículas que representen controladores del tipo PI. Cada partícula vive en un espacio bi-dimensional, ya que contiene una posición representada por el par de valores correspondiente a la parte proporcional (K_p) e integral (K_I) del controlador.

Con lo que la posición de cada partícula es representada por el par ordenado mostrado en (3).

$$\hat{x}_i = \{K_{Pi}, K_{Ii}\} \quad (3)$$

El programa se desarrolló para que se puedan describir de forma aislada los problemas de optimización, es decir que el algoritmo PSO no depende de la representación del problema a optimizar, lo que deja listo para que el



algoritmo pueda aceptar otra familia o diferentes tipos de controladores para trabajos futuros.

Al ser descrito de manera general, existen dos requisitos que son necesarios generar para cada problema de optimización:

1. La creación de partículas..
2. El valor de desempeño o fitness de una posición.

Luego entonces, los siguientes conceptos presentan las siguientes facultades:

- 'Problema de Optimización': Crear posiciones y devuelve el desempeño de una posición.
- 'Partícula': Debe conocer de su posición actual, la anterior, la mejor que ha tenido históricamente y la mejor de todo el enjambre. Así como actualizar sus propios valores.
- 'Enjambre': Contiene a todas las partículas y guarda la información de la mejor partícula que ha tenido hasta el momento. Además de desplazar a las partículas y actualizar la mejor posición si hubo un cambio.
- 'Algoritmo SPO': Crea un enjambre y se mantiene en movimiento hasta que una condición de paro se cumpla.

La condición de paro, también es general y se tiene que especificar en la inicialización.

En términos generales, la estructura del algoritmo PSO para optimizar los parámetros de un controlador clásico es la siguiente:

1. Crear un enjambre inicial de n partículas aleatorias, donde cada partícula es un controlador.
2. Evaluar cada partícula con la función objetivo. En este paso cada partícula es conectada con el sistema dinámico, se realiza la simulación y se evalúa la salida con la obtención de la norma-2.
3. Actualización de la posición y velocidad de cada partícula.
4. Actualización de la mejor posición histórica de cada partícula.
5. Actualización de la mejor partícula del enjambre
6. Repetir y volver al punto 2 si la mejor global no ha llegado a un valor de costo específico. O si no se ha alcanzado el máximo de iteraciones.

2.2 Simulador

Para realizar la simulación de sistemas dinámicos en 'Python', se utilizó la biblioteca 'scipy.integrate', y los modelos son creados bajo la función 'odeint', lo cual permite simular al sistema tanto en lazo abierto como en lazo cerrado, según se requiera.

Para definir el sistema con la función 'odeint', se especifican tres aspectos:

- Las ecuaciones de estados.
- Las condiciones iniciales.
- Secuencia de tiempos en donde se desea la solución.

A partir de estos tres argumentos, 'odeint' devuelve una secuencia de valores de los estados, en el intervalo de tiempo especificado. La respuesta de esta función se utiliza para para mostrar y visualizar cada una de las simulaciones, y para calcular el desempeño del controlador.

La forma de definir un sistema dinámico o un controlador es la mostrada en el Código 1.

```
x = odeint(modelo, x0, t)
```

Código 1. Declaración de un sistema dinámico.

Donde:

- 'modelo' es la ecuación de estados.
- 'x0' es el vector de condiciones iniciales.
- 't' es una secuencia de valores de tiempo donde se desea conocer la solución.
- 'x' es el vector de estado para cada valor de 't'.

Para la simulación en lazo cerrado (Sistema Dinámico-Controlador) es necesario que la función de la ecuación del sistema se especifique en función del control.

La implementación de un modelo, se ilustra en el ejemplo de la Sección 4.

2.3 Función de Costo [Norma del Error: norma-2]

Para determinar, si un controlador se desempeña mejor que otro, hay que definir de manera precisa, lo que significa obtener un mejor desempeño. Por ello se asocia una calificación cuantitativa a cada controlador. Las ideas más comunes para definir el costo en lo que a controladores se refiere son:

- Una norma del error.
- El máximo sobre impulso.
- El tiempo de establecimiento.

Con cada uno de estos criterios, se obtiene una cantidad y eso permite comparar equitativamente a los controladores.

Para usar estos criterios hay que programarlos. Dentro de la biblioteca desarrollada, se implementó el método de norma-2 de una función, la cual está definida por (4).

$$\|f\| = \left[\int |f(x)|^2 dx \right]^{1/2} \quad (4)$$

Para calcular numéricamente la norma de una función es necesario representarla en forma discreta. La cual está formada como una secuencia de pares ordenados $\{(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_t, y_t)\}$.

El objetivo es representar una función a partir de sus datos numéricos, para así aislar el resto del programa de la representación de las funciones. Es por ello que la definición del procedimiento utiliza constructores y selectores. Brindando la posibilidad de extender la función para problemas mas complejos.



3. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

El programa se ha desarrollado para que con simples instrucciones, se pueda:

- Definir el sistema dinámico y una estructura de controlador.
- Ejecutar el algoritmo PSO que funciona como optimizador de controladores bajo la función de costo norma-2.
- Modificar fácilmente los parámetros del algoritmo para realizar trabajos de investigación.

3.1 Algoritmo PSO

El programa completo cuenta con 4 clases:

- Particle()
- Swarm()
- Optimization_problem()
- Spo_data()

La clase 'Spo_data()' no presenta métodos y solo almacena los datos de forma encapsulada. Los parámetros que puede recibir son:

- Tamaño del enjambre (Número de Partículas)
- Máximo valor de generaciones
- El factor de inercia del enjambre
- El factor de inercia social
- El factor de inercia cognitiva

La clase 'Optimization_problem()' no almacena datos, provee de dos funciones una para entregar nuevas soluciones y otra para calcular el fitness.

La clase 'Particle()' almacena 6 datos, y provee de dos funciones una es para mover a la partícula y la otra para imprimir posición actual, posición previa y el fitness.

SPO El método SPO es el encargado de crear un enjambre y moverlo hasta que se cumpla la condición de paro como se muestra en el Código 2.

```
def spo(data, problem):
    swarm = Swarm(data, problem)
    swarm.prints() # print the initial swarm
    generation_num = 0
    _while(not stop_condition(swarm, data,
        generation_num)):
        swarm.move(data, problem)
        generation_num += 1
    swarm.prints() # print the final swarm
    _return swarm.best_particle
```

Código 2. Definición de la función SPO

3.2 Función de costo

Como se especificó en la sección 2.3 Para el cálculo de norma, el programa realiza la conversión de una señal a una función discreta. La función *int_dfnc()* calcula la integral discreta por el método del trapecio.

Los procedimientos *abs_dfnc()* y *sqr_dfnc()* obtienen el valor absoluto y el cuadrado de una función discretizada respectivamente.

En conjunto, los procedimientos anteriores, calculan la norma dos de una función como se especifica en (4). Esta forma de programarlo hace que el procedimiento sea directo, escalable y fácil de expresar la norma-2. La definición de la función se muestra en el Código 3.

```
def norm2_dfnc(dfnc):
    Return math.sqrt(int_dfnc( sqr_dfnc( abs_dfnc(
        dfnc))))
```

Código 3. Definición de la función que calcula la norma-2 de una función.

4. EJEMPLO

En este ejemplo se ilustra la metodología para la sintonización de un controlador tipo P, en conjunto con el sistema de primer orden mostrado en (5).

$$\dot{x} = a * x + u(x, t) \quad (5)$$

Con: $a = 50$ para hacer un sistema inestable, $u(x, t) = ref(t) - c(x, t)$. Y $ref(t)$ una señal tipo escalón unitario.

Como primer paso, se define el modelo de la referencia del sistema, el controlador y el sistema dinámico

```
def ref(t):
    valor = 1
    return valor

def c(x, t):
    control = kp
    return control

def modelo(x, t):
    x1 = x
    a = -50
    x1p = (a*x1) + (ref(t)-c(x,t))
    xp = x1p
    return xp
```

Código 4. Definición de la señal de referencia, el controlador tipo P y el sistema dinámico.

Despues se define el modelo del sistema dinámico.

A continuación, se define la función *problem_make_sol()*, la cual representa las soluciones iniciales del problema.

```
def problem_make_sol():
    a, b = [-10, 10]
    kp = uniform(a, b)
    return np.array([kp])
```

Código 5. Definición aleatoria de las ganancias proporcionales iniciales, en un rango de (-10, 10).



Posteriormente, se define la función para el cálculo del desempeño de las partículas, la cual incluye las definiciones de las funciones de entrada del sistema, modelo, controlador y la simulación. Código 4.

```
def problem_calc_fitness(pos):
    k = pos
    ...Codigo de Modelo...
    ...Codigo de Control...
    ...Codigo de la Entrada...
    #Condicion inicial
    x_0 = 0
    #Arreglo de tiempo
    t_ini = 0
    t_fin = 10
    t_step = 0.01
    n_m = (t_fin - t_ini) / t_step + 1
    t = np.linspace(t_ini, t_fin, n_m)
    #Simulacion del modelo
    x = odeint(modelo, x_0, t)
    x_c = np.concatenate(x)
    #Calculo del fitness
    fitness = norm2_dfnc([ddom, x_c])
    return fitness
```

Código 6. Definición de la función para calcular el fitness de cada partícula

Finalmente se llama a la función 'make_spo_data()' con los parámetros para este ejemplo: *swarm_size* = 3 y *max_iter* = 15, para comenzar con la sintonización. La variable data, contiene toda la información del enjambre.

```
data = make_spo_data(swarm_size, max_iter)
print_spo_data(data)
posible_minimo = spo(data)
print(posible_minimo)
```

Código 7. Ejemplo de ejecución de la sintonización

En la Tabla 1. Se muestran los resultados del enjambre después de 15 generaciones, donde se presenta el valor Kp encontrado por cada partícula, el desempeño y el costo del controlador. A mayor costo de la función presenta un menor desempeño. La mejor partícula presenta un costo mucho mayor que cero, lo que implica que el sistema no ha alcanzado la referencia unitaria. Analíticamente se obtuvo que para el sistema en particular, el valor Kp que estabiliza al sistema es $kp > 50$ y el valor para alcanzar la referencia es $kp = 50.10$. Además se obtuvo que entre mayor sea el valor de kp, el valor en estado estacionario disminuye. Lo que es verificado por el algoritmo, ya que ha encontrado que la mejor partícula a lo largo de 15 generaciones, es la que presenta el valor $kp = 63.066$ y no alcanza la referencia, como se observa en la Figura 3. Este valor podría acercarse mas a 50.10 si, se sigue iterando el enjambre.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se desarrolló una biblioteca en lenguaje 'Python' para la búsqueda de la sintonización óptima de un controlador clásico. Se desarrolló una herramienta de simulación de múltiples controladores de una misma

Tabla 1. Última iteración del enjambre

Partícula No.	Valor Kp	Desempeño	Costo
1	63.571	0.2197	0.7803
2	67.103	0.1765	0.8235
3	63.066	0.2277	0.7723
Mejor Partícula	63.066	0.2277	0.7723

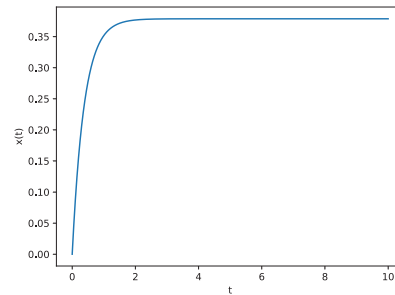


Figura 3. Simulación del sistema usando la constante obtenida de la mejor partícula.

estructura, cuya importancia radica en la aplicación para algoritmos genéticos, iterativos y evolutivos. Este bloque al estar programado aislado, fácilmente se puede cambiar el algoritmo de búsqueda, implementar un algoritmo genético, programación evolutiva etc. o extender a un conjunto de problemas particulares. Además se puede concluir que esta herramienta para sintonizar controladores nos permite ahorrar tiempo en el diseño del controlador, sin embargo esta herramienta meta-heurística no sustituye a la búsqueda analítica de un óptimo, pero si brindar una buena aproximación o un punto de partida. Finalmente como valor agregado en la biblioteca es que la escritura del programa en forma modular y aislada, brinda la oportunidad de implementar el algoritmo PSO para cualquier otro tipo de problema aún siendo este, alejado de la sintonización de controladores.

REFERENCIAS

- Alatas, B., Akin, E., and Ozer, A.B. (2009). Chaos embedded particle swarm optimization algorithms. *Chaos, Solitons & Fractals*, 40(4), 1715–1734.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *International Conference on Neural Networks*. IEEE.
- Song, W. and Hua, Z. (2020). Multi-exemplar particle swarm optimization. *IEEE Access*, 8, 176363–176374.
- Wu, T., Zhou, C., Yan, Z., Peng, H., and Wu, L. (2020). Application of pid optimization control strategy based on particle swarm optimization pso for battery charging system. *International Journal of Low-Carbon Technologies*.
- Yu, Y., Xu, Y., Wang, F., Li, W., Mai, X., and Wu, H. (2020). Adsorption control of a pipeline robot based on improved pso algorithm. *Complex & Intelligent Systems*.



SuperMarket: Videojuego Serio para personas con Síndrome de Down

Edson Homar Gómez Arvizu, Humberto Pérez Cruz,
Wendy Sánchez, Alberto Arturo Flores-Hernández

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Matamoros

H. Matamoros, Tamaulipas, México;

{L15260636, L16260648, wendy.sg, alberto.fh}@matamoros.tecnm.mx

Resumen: El desarrollo de software se enfoca no solo en diseñar si no también en crear herramientas digitales con diversas finalidades como puede ser la automatización de tareas, manipular o compartir información de manera rápida y eficaz, además de crear instrumentos de estudio. La sociedad actual aprovecha las ventajas que ofrece el software de manera habitual, a tal punto de ser imprescindible. Esto ha incrementado la brecha digital entre personas con discapacidad intelectual y el resto de la población. Este artículo presenta el desarrollo de un videojuego serio que tiene como objetivo entrenar a personas con síndrome de Down a realizar una de las tareas más comunes en la vida cotidiana: Ir de compras. El videojuego serio se diseñó de forma progresiva, es decir, muestra al usuario diversos retos que van aumentando en complejidad y afirmando el contexto social del comercio.

Palabras Clave: Videojuego Serio, Síndrome de Down, Discapacidad Intelectual, Desarrollo de Software.

1. INTRODUCTION

La tecnología está presente en diferentes ámbitos y su uso se está convirtiendo en una condición indispensable para desenvolverse en la sociedad actual. Este hecho ha provocado que surja una división entre las personas que son capaces de aprovechar las ventajas tecnológicas y las que no, produciéndose así el fenómeno de la brecha digital [Valverde, 2005].

La tecnología aplicada a la educación es una gran fuente de información que motiva y despierta el interés de los estudiantes, debido a sus fuertes connotaciones lúdicas [Ortega, 2005]. Proporciona entornos interesantes donde investigar, experimentar y, por tanto, donde aprender [Morilla, 2012].

Las personas con Síndrome de Down (SD) se han visto privadas de las mismas oportunidades de acceso a los medios que el resto de la población, siendo sufridores de la denominada brecha digital [Ruiz, 2014].

El SD es una anomalía congénita debida a la aparición de un cromosoma de más en el par 21 de cada célula [Martín, 2012], cuyo exceso de material genético provoca un conjunto de síntomas y signos diversos que se manifiestan en su desarrollo global. La incidencia del SD en la población es variable en función de las referencias consultadas. Por ejemplo, en España durante el periodo 1980-1997 se diagnosticó SD a aproximadamente 13 de cada 10.000 niños nacidos vivos [FEISD, 2002]. En cambio, datos preliminares de la Dirección

General de Información en Salud en México, indican que la incidencia es de 1 de cada mil recién nacidos.

Las características genéticas del SD provocan una alteración diferente en cada persona. Sin embargo, muchas personas con SD tienen patologías asociadas como complicaciones de salud relacionadas con su alteración genética. En el área motora no desarrollan las destrezas motoras del mismo modo que lo hacen los niños con desarrollo típico y en lo que respecta a capacidad intelectual suelen tener un coeficiente intelectual por debajo de la media.

No obstante, el aprendizaje visomotor de las personas con SD se desarrolla adecuadamente, ya que los núcleos y las áreas cerebrales de la conducta motriz están bien conservados y pueden llegar a desempeñar trabajos motóricos en la edad adulta con suficiente habilidad [Flórez, 1999].

A fin de garantizar la igualdad de oportunidades en el empleo y aplicación de la tecnología en todos los sectores de la población, existen experiencias y estudios que demuestran que estas personas son capaces de utilizar la computadora y que el acceso a la tecnología favorece el desarrollo de la persona con discapacidad intelectual a nivel educativo, personal, social y laboral [Fundación Vodafone, 2003].

El acceso a la tecnología enriquece el proceso de enseñanza y facilita el aprendizaje de diferentes contenidos curriculares [Parette y Vanbiervliet, 1992] como el lenguaje, lectura y escritura, cálculo y matemáticas [Black y Wood, 2003]. Los



beneficios a nivel personal repercuten en un aumento de la autoestima, autonomía e independencia y autodeterminación [Davies, Stock y Wehmeyer, 2001; Imbernón, 1991].

Todo esto es posible si se implementan metodologías y estrategias acordes a sus peculiaridades, adecuadas a su forma de aprender y bajo las cuales se les faciliten todas aquellas herramientas o recursos que favorezcan su aprendizaje [González, 2000].

En este artículo se presenta el videojuego serio SuperMarket, el cual plantea de forma progresiva diversos retos para el desarrollo del usuario entre los que se encuentran la asignación de significado a un objeto mediante el lenguaje, la fomentación de la lectura, y el principal objetivo, tratar de enseñar el constructo social del comercio, o, dicho de otra forma, instruir al alumno para un intercambio de dinero por víveres.

Esta aplicación se desarrolló bajo una interfaz adecuada al usuario y tomando como base las investigaciones enfocadas en métodos y estrategias de aprendizaje para quienes padecen SD, para así reducir el impacto negativo que causa el denominado fenómeno de la brecha digital e impulsar el desarrollo para una futura inclusión social. Una interfaz adecuada para el usuario, es una interfaz que incluye elementos gráficos como menús, imágenes, botones y sonidos. Mediante estos elementos gráficos, el usuario puede interactuar más fácilmente por todo el videojuego, sin que esto perjudique el aprendizaje. Además, el usuario tiene una fácil interacción con el dispositivo al que está manipulando.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Existen dos grandes grupos de aplicaciones educativas: el grupo de aplicaciones dirigidas específicamente a alcanzar objetivos didácticos y el grupo de aplicaciones como un medio indirecto del aprendizaje curricular [Alcantud, 1999].

El primer grupo de aplicaciones están encaminadas directamente a la consecución de un aprendizaje curricular específico, como la adquisición de conocimientos y destrezas básicas o el desarrollo de habilidades intelectuales; y es delimitada en el campo educativo bajo el término de “enseñanza asistida por ordenador” (E.A.O.). Dentro de este grupo existen diferentes tipos de aplicaciones entre los que caben destacar los programas tutoriales, los programas de entrenamiento y práctica y los de simulación [Fuchs y Allinder, 1993].

El segundo grupo de aplicaciones educativas se constituye como un medio indirecto del aprendizaje curricular, en la medida que no persigue alcanzar directamente objetivos didácticos. De entre el software que puede ser considerado como medio indirecto de aprendizaje destacan los procesadores de textos, bases de datos, hojas de cálculo... [Alcantud, 1999]. En ambos grupos la computadora posibilita al alumno la adquisición y el dominio de conocimientos mediante una actividad práctica.

En [Hidayatun, 2013] proponen la adaptación dos conceptos dentro de las teorías del aprendizaje enfocadas a aquellos que padecen SD: el concepto constructivo y el concepto cognitivo. El concepto constructivo tiene como base provocar una reacción al momento que el usuario interactúa con la aplicación. En el concepto cognitivo, el usuario empieza a relacionar lo que ve en pantalla con sus experiencias diarias. Utiliza métodos gráficos y sonoros para presentar los números a niños que padecen SD con la finalidad de que comiencen a familiarizarse con este concepto.

De la misma manera, el autor Hatzigiannakoglou, presenta un videojuego serio, Junk-Food Destroyer: Helping adolescents with Down syndrome to understand healthy eating through serious game, pero con un enfoque totalmente diferente. Trata de generar conciencia sobre el consumo de comida chatarra y a su vez, les enseña a los adolescentes con SD que mejorar sus hábitos alimenticios puede traer beneficios para su salud. Se basa en una investigación sobre la obesidad y el sobrepeso, la cual cuenta con una muestra de 50 adolescentes que padecen SD [Fujiura, 1997]. Los resultados arrojan que un 32.1% de los hombres y un 66.7% de mujeres exceden su peso ideal, mientras que un 25% de hombres y el 42.9% de mujeres presentan obesidad.

3. DESARROLLO DEL VIDEOJUEGO SERIO SUPERMARKET

La aplicación está dirigida a personas que padecen SD. Sin embargo, durante el aprendizaje, un instructor o profesor juega un papel fundamental para desarrollar los principios del aprendizaje [Beltrán y Pérez, 2003]. El objetivo principal del videojuego es que las personas con SD aprendan a hacer compras en un supermercado, a elegir los productos necesarios y hagan cálculos del dinero requerido para la compra. De esta manera, las personas con SD se entrenan para una futura inclusión en la sociedad.

Para que se produzca el aprendizaje es necesario que el organismo esté preparado para captar la información. Gracias a diferentes sistemas cerebrales, los objetos y acontecimientos externos evocan la atención haciendo que se oriente hacia un estímulo concreto. La motivación y las emociones influyen considerablemente en el mecanismo atencional [Flórez, 2001].

En esta situación, al igual que en los videojuegos previamente mencionados, el usuario deja de ser un sujeto pasivo y dependiente, tal y como ocurría en la educación especial tradicional [Feuerstein, 1986], y se convierte en un agente activo en el proceso de aprendizaje.

Evidentemente, no puede mantenerse pasivo escuchando a su instructor debido a que la interacción lo convierte en un protagonista [Pérez, 2001].

3.1 Fundamentación



Existen diferentes teorías sobre el aprendizaje que han ido adquiriendo mayor o menor importancia a lo largo del tiempo, de forma que el aprendizaje ha sido considerado como adquisición de respuestas, como adquisición de conocimiento y actualmente se considera como construcción de significado [Beltrán, 1996]. Esta interpretación del aprendizaje se centra en la persona que aprende, que no se limita a adquirir conocimiento, sino que lo construye usando la experiencia previa para comprender y moldear el nuevo aprendizaje.

Todo sistema formativo posee una base sobre la que asentar su metodología y contenidos. En este sentido el videojuego serio SuperMarket, parte de un modelo de enseñanza-aprendizaje específico sobre el que se asientan sus principios metodológicos.

El modelo de aprendizaje denominado CAIT contiene cuatro rasgos fundamentales: aprendizaje Constructivo, aprendizaje Autorregulado, aprendizaje Interactivo y contexto Tecnológico. Es Constructivo por que las actividades realizadas tienen como finalidad construir conocimiento. Es Autorregulado porque es dirigido por el alumno, aunque en un principio el aprendizaje es dirigido por el instructor. Es Interactivo porque interactuar con los demás para construir conocimiento va a permitir pasar la construcción personal a la construcción social. Este aprendizaje se produce en un contexto Tecnológico, ya que hace uso de la tecnología como instrumento cognitivo que amplía, estructura y potencia la mente humana. [Beltrán y Pérez 2003].

3.2 Arquitectura del Videojuego

El proceso de desarrollo del videojuego se llevó a cabo en el motor gráfico de Unity 2D, en donde se estuvo programando en el lenguaje C#. El desarrollo fue llevado a cabo bajo la asesoría de expertos que laboran en la Fundación Down de H. Matamoros, Tamaulipas. Se definieron cinco niveles como se muestra en la Figura 3.1. Un nivel en un videojuego es una escena en donde el usuario puede completar lo que se le especifique para completar un objetivo específico. Los niveles de un videojuego tienen varios niveles de dificultad que aumentan progresivamente [McGuire & Jenkins, 2009].



Figura 3.1 Pantalla de selección de niveles.

Cada uno de los niveles tiene un grado de complejidad propio, esto con la finalidad de que cada uno de los usuarios pueda mostrar un progreso de manera individual y, en consecuencia, aquellos que demuestren un desarrollo cognitivo más avanzado puedan trabajar en un nuevo nivel.

A continuación, se mostrarán ejemplos de cada nivel del videojuego.

3.2.1 Nivel 1

El nivel uno no presenta ningún reto mayor para el usuario, si no que está diseñado con la intención de familiarizar al individuo con el entorno de la aplicación. Simula los distintos departamentos que hay en un supermercado (Figura 3.2) y, al acceder a uno de ellos se muestra una estantería con los artículos más esenciales de cada departamento (Figura 3.3), en este caso se hace la demostración de los artículos de limpieza.

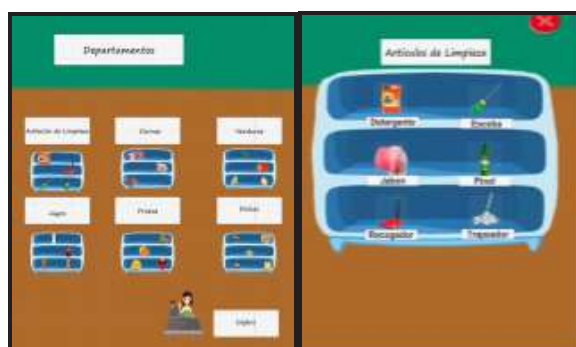


Figura 3.2 Selección de Departamento

Figura 3.3 Departamento De Limpieza

En este punto, será posible visualizar tanto la imagen como la palabra escrita de cada uno de los artículos, además cada vez que el usuario seleccione un objeto, este emitirá un sonido que corresponde al nombre de dicho objeto, permitiendo empezar a crear relaciones cognitivas.

3.2.1. Nivel 2

El nivel dos contiene los mismos elementos que el nivel uno, con la diferencia de que ahora es posible que los artículos puedan ser arrastrados hacia el carrito de compras del supermercado. En la Figura 3.4 se muestran artículos que están en el estante y otros que están en el carrito. Los artículos pueden moverse del estante al carrito y viceversa. La introducción de esta nueva mecánica permite al usuario experimentar la sensación de interacción motriz con el videojuego, a la vez que de manera subliminal se lleva a cabo la acción de elegir entre uno u otro artículo para agregar al carrito.



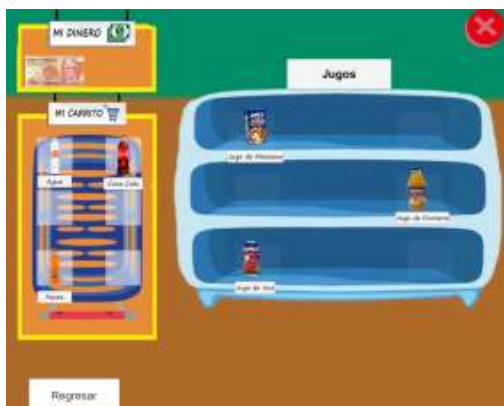


Figura 3.4 Demostración Nivel 2

3.2.3 Nivel 3

En el nivel tres, el grado de complejidad aumenta. En este nivel, se otorga al usuario una cantidad fija de dinero y los productos aparecen con un precio en cantidades pequeñas. Mediante un sistema de cobro, los productos agregados al carrito se van descontando del dinero del usuario. El objetivo es que el niño agregue tantos artículos como desee y observe que el dinero disminuye a medida que elige los artículos.

3.2.4 Nivel 4

El nivel cuatro contiene todos los elementos de los primeros 3 niveles, pero agregando un nuevo reto. Aparece una lista de compras. El objetivo es comprar únicamente lo que se indica y no deberá exceder el límite de dinero. Con este reto, el niño prueba sus habilidades matemáticas.

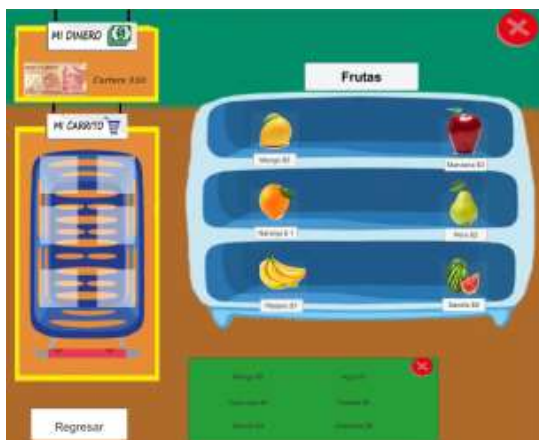


Figura 3.5 Demostración Nivel 4

3.2.5 Nivel 5

El nivel cinco tiene la mayor dificultad. Se pone en práctica todas las habilidades que se han adquirido hasta el momento, además los precios de cada artículo ahora son en decenas, como se muestra en la Figura 3.6.

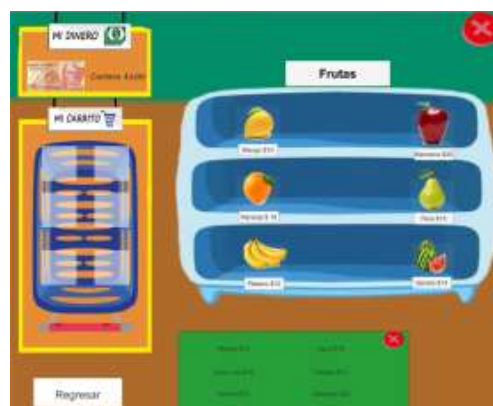


Figura 3.6 Demostración Nivel 5

En la Figura 3.7 se muestra la escena final de cada nivel. El niño debe presionar el botón de compra para finalizar el juego. Se muestra un mensaje de felicitación por completar el nivel con lo cual se genera una sensación satisfactoria en el niño que lo motiva a seguir jugando y aprendiendo.



Figura 3.7 Escena Final Cajero

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se presentó el desarrollo de un videojuego serio el cual es una herramienta capaz de ayudar a mejorar las estrategias de aprendizaje para personas con síndrome de Down. El desarrollo fue llevado a cabo bajo la asesoría de expertos que laboran en la Fundación Down de H. Matamoros, Tamaulipas.

Cada nivel se diseñó para trabajar de manera individual con distintos usuarios, de tal manera que cada uno avance a su propio ritmo. Al mismo tiempo, el aumento en el grado de complejidad permite mantener un continuo desarrollo de habilidades que tienen como finalidad ser aplicadas fuera de la simulación.



En el futuro, se pretenden realizar pruebas del videojuego con una muestra de personas con síndrome de Down en distintos periodos de tiempo y evaluar su efectividad como herramienta didáctica.

El desarrollo tecnológico debe ser un beneficio para todos. Desarrollar más tecnologías con este enfoque puede lograr que personas discapacitadas puedan mejorar no solo su aprendizaje, sino también su calidad de vida. El fin es ayudar al desarrollo de personas de manera que sean independientes y que logren la integración satisfactoria a la sociedad.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Down de H. Matamoros por todo el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

- Alcantud, F. (1999). *Algunos apuntes sobre el desarrollo de las TIC y su aplicación en la formación*. Valencia: Universitat de Valencia Estudi General.
- Beltrán, J. y Pérez, L. (2003). *Experiencias pedagógicas con el modelo CAIT*. Madrid: Fundación Encuentro.
- Beltrán, J. (1996). *Procesos, estrategias y técnicas de aprendizaje*. Madrid.
- Black, B. y Wood, A. (2003). *Utilising information communication technology to assist the education of individuals with Down syndrome*. Hampshire: The Down Syndrome Educational Trust.
- Davies, D.K., Stock, S.E. y Wehmeyer, M.L. (2001). *Enhancing Independent Internet Acces for Individuals with Mental Retardation through Use of a Specialized Web Browser. A Pilot Study*. Education and Training in Mental Retardation and Developmental Disabilities, pp. 107-113.
- F.E.I.S.D. (2002). *Plan de Acción para las personas con síndrome de Down en España*. Madrid: Federación Española del Síndrome de Down.
- Feuerstein, R. (1980). *Instrumental Enrichment*. Baltimore: University Park Press.
- Flórez, J. (1999). *Patología cerebral y sus repercusiones cognitivas en el Síndrome de Down*. Siglo Cero, pp. 29-46.
- Flórez, J. (2001). *Las bases del aprendizaje*. Descargado el 1 de octubre de 2020 de <https://www.downciclopedia.org/areas/neurobiologia>
- Fuchs, L.S. y Allinder, R.M. (1993). *Computer Applications in the schools for students with mild disabilities: Computer-Assisted Instruction and Computer-Managed Instruction*. London. Jessica Kingsley Publishers.
- Fujiura, G. T. (1997). *Predictors of BMI among adults with Down syndrome: the social context of health promotion*. Research in Developmental Disabilities, pp. 261-274.
- Fundación Vodafone. (2003). *Tecnologías de la Información y Comunicaciones y Discapacidad*. Propuestas del Futuro. Madrid: Fundación Auna.
- González, C. S. (2000). *Sistema tutorial inteligente para la enseñanza en niños con dificultades intelectuales y cognitivas*. Tenerife: Universidad de la Laguna.
- Hidayatun Nafisah Binti Isa Muddin (2013). *Number Skills Mobile Application for Down Syndrome Children*. Universiti Teknologi PETRONAS.
- Margalit, M. y Weisel, A. (1990). *Computer-Assisted Social Skills Learning for Adolescents with Mild Retardation and Social Difficulties*. Educational Psychology, pp. 343-355.
- Martín, N. (2012). *Los bits de inteligencia como herramienta didáctica para niños con síndrome de Down*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- McGuire, Morgan; Jenkins, Odest Chadwicke (2009). *Creating Games: Mechanics, Content, and Technology*. Wellesley, Massachusetts: A K Peters.
- Morilla, R. (2012). *Las Tics en alumnos y alumnas con syndrome de Down*. Tecno-Educalem 2, pp. 20-26.
- Ortega, J.M. (2005) *Bondades y limitaciones del Material Multimedia para personas con syndrome de Down*. Revista Síndrome de Down, pp. 84-92.
- Parette, H.P. y Vanbiervliet, A. (1992). *Tentative findings of a study of the technology needs and use patterns of persons with mental retardation*. Journal of Intellectual Disability Research, pp. 7-27.
- Pérez, L. (2001). *Alternativas y experiencias después de la escolaridad obligatoria*. Atención educativa a las personas con discapacidad, pp-355-382. Almería: Aspapros.
- Ruiz, S.A. (2014). *Las tecnologías de la información y la comunicación en los procesos de inclusion digital en niñas con syndrome de Down*. Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Valverde, S. (2005). *El aprendizaje de las tecnologías de la información y la comunicación en personas con síndrome de Down*. Madrid: Universid Complutense de Madrid.



Modelo de Learning Analytics para Predecir el Rendimiento de los Alumnos Basado en un LMS

José Roberto Paz Mejía*, Leonardo Nevárez Chávez**,
Gregorio Ronquillo Máñez***, Marisela Ivette Caldera Franco****

Tecnológico Nacional de México campus Chihuahua II
Chihuahua, Chih., México.

e-Mails: joserobertopazmejia@hotmail.com

leonardo.nc@chihuahua2.tecnm.mx

gregorio.rm@chihuahua2.tecnm.mx

marisela.cf@chihuahua2.tecnm.mx

Resumen: Este proyecto tiene como objetivo crear una aplicación que usa un modelo de predicción mediante herramientas de Learning Analytics, que permita visualizar el rendimiento de los alumnos. Será un trabajo interdisciplinario de la Maestría en Sistemas Computacionales con apoyo del CONACyT, impartida en el Tecnológico Nacional de México campus Chihuahua II. Esta aplicación será usada para atender de manera oportuna a los alumnos que están en alguna situación de riesgo académico. La entrada de la información para esta aplicación será proporcionada por los datos escolares del semestre anterior y los datos disponibles actuales, los cuales serán obtenidos a través de las bitácoras del Learning Management Systems, Moodle. En la aplicación se buscará catalogar los resultados mediante un *semáforo*, en el cual se puedan identificar fácilmente de manera visual 3 categorías: *Verde* para alumnos en situación regular, *Amarillo* para alumnos con algún tipo de retraso en al menos una actividad y *Rojo*, para alumnos que presentan un porcentaje alto de riesgo debido a que han sido varias las actividades en las que presentan algún tipo de retraso.

Palabras Clave: Learning Analytics, modelo de predicción del aprendizaje, LMS Moodle, bitácora de Moodle.

1. INTRODUCCIÓN

Este es un proyecto que se encuentra en desarrollo, y tiene como objetivo la propuesta inicial para la obtención de un modelo de predicción para el desarrollo de una aplicación que muestre de manera visual en *banderas* o *grupos* la situación de estudiantes del Tecnológico Nacional de México (TecNM) campus Chihuahua II. La entrada de información será proporcionada por los datos escolares del semestre anterior, y los datos disponibles del semestre actual obtenidos a través de las bitácoras de la plataforma LMS, Moodle.

2. ANTECEDENTES

Cada vez es mayor el número de universidades que usan técnicas de Learning Analytics (LA) usando como fuentes de información los Learning Management Systems (LMS) con el fin de mejorar aspectos como el rendimiento de los alumnos y la atención a ellos cuando se es detectado algún problema o situación de riesgo académico. (Long y Siemens, 2011, p. 34), y también poder visualizar con *banderas*, aquellos alumnos con tendencia a disminuir su desempeño escolar, obteniendo resultados positivos (Sclater et al, 2016).

2.1 Definición de Learning Analytics

“Learning Analytics (Análítica de aprendizaje) es la medición, colección, análisis y reporte de datos sobre los alumnos y sus contextos, con fines de comprender y optimizar el aprendizaje y los entornos en los que se produce” (Siemens y Gasević, 2012) citado por (Sclater et al, 2016).

“Learning Analytics combina conocimiento de diferentes disciplinas académicas como *educational data mining* (minería de datos educativa) y *predictive modelling* (modelado predictivo). En 2007, Campbell et al discutieron las oportunidades de las *analíticas académicas* para abordar algunos de los crecientes retos en la US higher education (Educación Superior de Estados Unidos), tales como bajas tasas de retención. La analítica de aprendizaje empezó a incorporarse como una disciplina por derecho propio alrededor de 2010” (Ferguson, 2012) citado por (Sclater et al, 2016).

Como lo menciona Falcão et al. (2020), algunos de los entornos educativos que han empleado este tipo de técnicas (LA y LMS) son las universidades de Europa, Australia y Brasil, siendo esta última una de las primeras universidades en desarrollar el proyecto LALA (Latin American Learning Analytics) desarrollado como parte del proyecto Europeo SHEILA (Supporting Higher Education to Integrate Learning Analytics)



para los principales interesados: alumnos, profesores, tutores y directores de carrera (Cardona y Arbelaez, 2020).

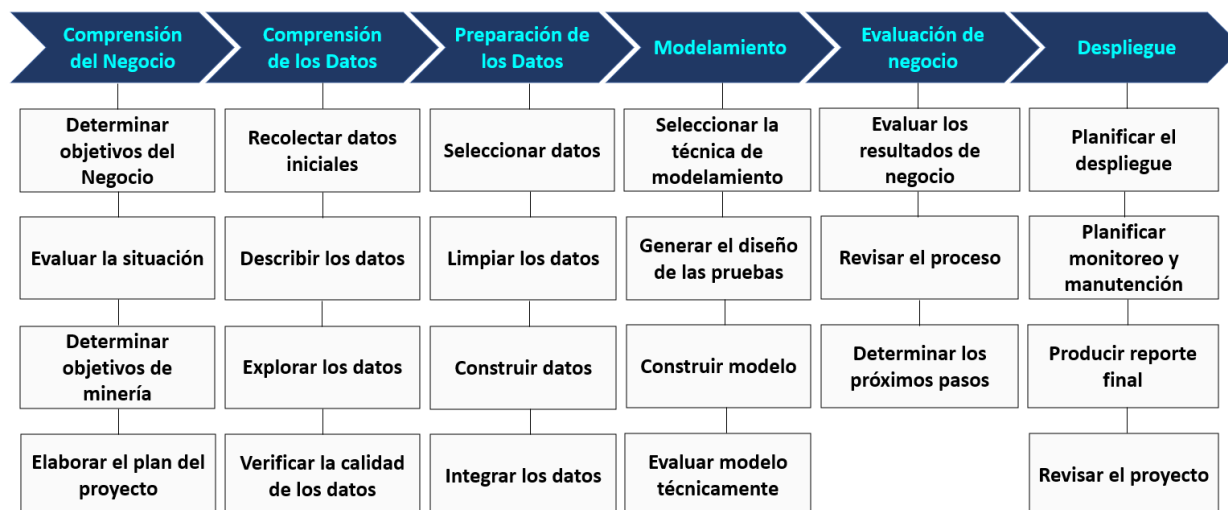


Fig. 1. Etapas de la Metodología CRISP-DM. Tomado de Chapman et al, (2000).

2.2 Modelo CRISP-DM

Para el desarrollo de este proyecto se utilizará la metodología CRISP-DM (Cross-Industry Standard Process for Data Mining), la cual ha sido utilizada mucho en las áreas de ciencia de datos como lo indica Chapman et al, (2000), obteniendo muy buenos resultados. La metodología CRISP-DM cuenta con 6 etapas en su ciclo de vida (Fig. 1).

2.3 Descripción de las 6 Etapas del Modelo CRISP-DM

- *Comprensión del Negocio*: Se determinan los objetivos del negocio, se evalúa la situación, se determinan objetivos de minado y se realiza un plan de procedimientos.
- *Comprensión de los Datos*: Se colectan datos iniciales, se describen datos, se exploran datos y se verifica la calidad de los datos.
- *Preparación de los Datos*: Inclusión/Exclusión, limpieza de datos, integración de datos y reformato de datos.
- *Modelamiento*: Selección de técnica de modelado, generar y probar diseño, construir modelo, evaluación del modelo.
- *Evaluación de negocio*: Evaluación de los resultados, revisión del proceso y determinar los siguientes pasos.
- *Despliegue*: Plan de despliegue, plan de mantenimiento y monitoreo, reporte final revisión el proyecto.

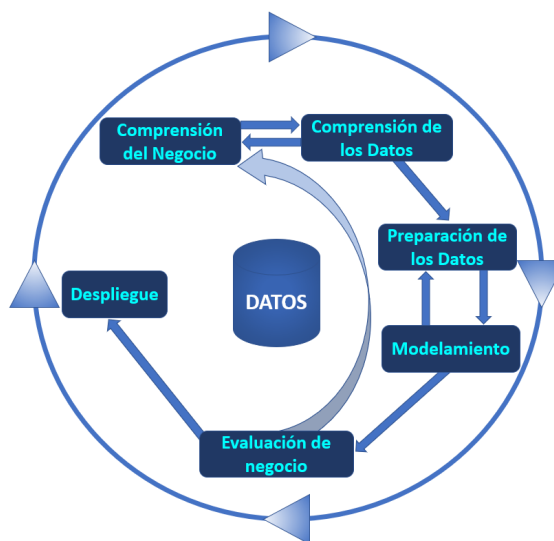


Fig. 2. Ciclo de vida de CRISP-DM. Tomado de Chapman et al, (2000).



2.4 Aportaciones.

Aunque este tipo de aplicaciones existan actualmente en diversas universidades del mundo, en el TecNM campus Chihuahua II no hay ninguna aplicación hasta el momento de este tipo que esté siendo utilizada para predecir el rendimiento escolar de los alumnos, por lo que generar esta aplicación será una valiosa aportación. Se buscará *adaptar* la aplicación de acuerdo a los requerimientos y recursos de la institución. Los resultados obtenidos por dicha aplicación se buscarán clasificar y visualizar en forma de un *semáforo*, para que los datos puedan ser visualizados rápidamente por quien esté utilizando la aplicación. Para esto se realizará esta investigación aplicando las técnicas conocidas para elegir la que tenga mejor desempeño. Entre estas se técnicas se mencionan las siguientes: *regresiones, agrupamientos, árbol de decisión, redes neuronales*.

“Se conoce término de *regresión* el método estadístico desarrollado para investigar las relaciones entre las variables” (Pérez, 2010).

Se denomina *agrupamiento* (clustering) al “proceso de agrupar un conjunto de objetos físicos o abstractos en clases de objetos similares (Kaufmann et al, 2000). Un clúster es una colección de objetos de datos que son similares a otros dentro del mismo clúster y son distintos a los objetos de otros clústeres”, citado por (Fariás et al, 2008).

“Los *árboles de decisión* se definen como un procedimiento recursivo, en el cual un número N de instancias se dividen progresivamente en grupos, de acuerdo a una regla de división que permita maximizar la homogeneidad o pureza de la variable de respuesta o variable clase “(Giudici & Figni, 2009), citado por (Morales et al, 2017).

“Una *red neuronal* es un modelo que se compone de un número determinado de elementos llamados *neuronas*, las cuales a su vez están organizadas en grupos denominados *capas*. Las neuronas son el elemento más básico de una red neuronal y su finalidad es la de aplicar una transformación a los datos recibidos en χ con tal de predecir un valor continuo o categórico $\hat{y}$ en la última capa” (Fuentes, 2020).

2.5 Riesgos y limitaciones del proyecto

Un riesgo es el bajo uso de Moodle, ya que en general no todos los profesores o alumnos la utilizan, por lo que muchos posibles datos quedarán fuera de la medición de este modelo de predicción. Otra limitación importante para este proyecto es el tiempo restante para realizar este proyecto, el cuál es menor de un año.

Actualmente se está trabajando en las etapas de *comprensión de datos y preparación de datos*, bajo un plan de contingencia

debido al problema global causada por la pandemia COVID-19 que está afectando en este año 2020 a todo el mundo.

2.6 Definición de riesgo académico, y actividades de Moodle

Se considera como *riesgo académico* a aquellas actividades (variables medibles) que los alumnos pueden estar fallando en realizar o entregar, por ejemplo: inasistencias o faltas, exámenes con calificación baja o reprobatoria, pocos accesos a la plataforma Moodle, retrasos en entrega de trabajos, actividades asignadas no entregadas

Dentro de las principales *actividades de Moodle* más usadas típicamente por esta institución se pueden mencionar: tareas, cuestionarios, exámenes, participación en chats o foros, lecciones, elecciones.

2.7 Ventajas del uso de la aplicación

El uso de esta aplicación puede generar tendencia a usar cada vez más este tipo de recursos digitales, tanto en alumnos, como en profesores o personal administrativo, pero la ventaja principal, es que se puede realizar una atención oportuna a aquellos estudiantes que tengan algún tipo de riesgo académico.

3. DESARROLLO

Para desarrollar este modelo de predicción se usó como guía las 6 etapas del modelo CRISP-DM, junto con un plan de desarrollo de procedimientos del proyecto.

3.1 Descripción de la implementación de este proyecto en las 6 etapas del modelo CRISP-DM

Comprensión del Negocio: Se buscó la misión, visión y valores del TecNM campus Chihuahua II, así también como el perfil de egresado de un Ingeniero en Sistemas Computacionales. También se realizó un plan de trabajo para el desarrollo de este proyecto.

Comprensión de los Datos: Se analiza la información de datos escolares obtenida de Moodle para clasificarla, ordenarla, analizarla y seleccionarla, además de descartar aquella información que pueda ser irrelevante para este proyecto (Véase Fig. 3 y Fig. 4).

Los datos obtenidos de Moodle provienen de un archivo de respaldo de extensión .csv, con un tamaño de 815MB (Fig. 5). También se obtuvieron otros archivos de bitácora con extensión .dat, pero se decidió trabajar mejor con el archivo .csv porque contenía toda la información anterior del .dat, más la información más reciente de la bitácora LMS.



Para las pruebas iniciales de comprensión, se usaron aplicaciones básicas de Windows para ver el contenido de estos archivos. Estas aplicaciones fueron: WordPad, Bloc de Notas y Excel en versiones Excel 365, Excel Professional 2016 y Excel Professional 2019. También se trabajó en Open Calc. Todas estas aplicaciones están limitadas, y sólo permitieron abrir un máximo de 1048576 filas. Los resultados fueron los mismos, sin importar la versión de software ofimático, Sistema Operativo o diferencia de recursos en hardware.

	A	B	C	D	E
1	Hora	Nombre completo del usuario	Usuario afectado	Contexto del evento	Componente
2	20/08/20, 13:45			Curso: ANALISIS CRIT Sistema	
3	20/08/20, 13:45			Curso: Taller Inv I Agc Sistema	
4	20/08/20, 13:45			Archivo: Reglas del c. Sistema	
5	20/08/20, 13:45			Curso: ANALISIS CRIT Sistema	
6	20/08/20, 13:45			Curso: 20-2 Investiga Sistema	
7	20/08/20, 13:45			Sistema Sistema	
8	20/08/20, 13:45			Curso: PENSAMIENT(Sistema	
9	20/08/20, 13:45			Curso: PENSAMIENT(Sistema	
10	20/08/20, 13:45			Sistema Sistema	
11	20/08/20, 13:44			Curso: Taller Inv I Agc Sistema	
12	20/08/20, 13:44			Portada Sistema	
13	20/08/20, 13:44			URL: Temarios URL	
14	20/08/20, 13:44			Curso: 20-2 Investiga Sistema	

Fig. 3. Bitácora de LMS, parte 1.

D	E	F	G	H	I
Contexto del evento	Componente	Nombre del evento	Descripción	Origen	Dirección IP
Curso: ANALISIS CRIT Sistema	Curso visto	The user with id	web	177.236.40.24	
Curso: Taller Inv I Agc Sistema	Curso visto	The user with id	web	189.237.216.7	
Archivo: Reglas del c. Sistema	Módulo de curso ac	The user with id	web	189.237.216.7	
Curso: ANALISIS CRIT Sistema	Curso visto	The user with id	web	177.236.40.24	
Curso: 20-2 Investiga Sistema	Perfil de usuario vist	The user with id	web	177.236.37.119	
Sistema Sistema	El usuario ha ingresa	The user with id	web	177.236.37.119	
Curso: PENSAMIENT(Sistema	Curso visto	The user with id	web	177.236.40.24	
Curso: PENSAMIENT(Sistema	Curso actualizado	The user with id	web	177.236.40.24	
Sistema Sistema	Usuario ha salido	The user with id	web	189.237.69.24	
Curso: Taller Inv I Agc Sistema	Curso visto	The user with id	web	189.237.216.7	
Portada Sistema	Curso visto	The user with id	web	177.236.15.147	
URL: Temarios	URL	Módulo de curso vis	The user with id	web	189.237.22.43

Fig. 4. Bitácora de LMS, parte 2.

Preparación de los Datos: Con estos datos iniciales obtenidos, se realizó un estimado de la cantidad de filas que contiene la bitácora del LMS. En primera instancia se buscó importar el archivo completo de bitácora a MySQL, pero se generó un error al estarlo importando y el software se cerraba. Se buscó dividir el archivo en 8 partes, con el software Large File Splitter. Este software se utiliza en el *command prompt* (símbolo del sistema) de Microsoft Windows. Para hacer más fácil su uso al escribir el comando, se renombró el archivo a *LFSplit.exe* (Fig. 5). La línea de comando que se usó para partir el archivo *logs_20200820-1343.csv* es la siguiente:

LFSplit “logs_20200820-1343.csv” 420
(Aplicación) + (Nombre del archivo) + (Cantidad de divisiones)

Este comando generó 420 archivos .csv, que son más fáciles de manipular en cualquier manejador de Base de datos.

Se creó una base de datos con los campos similares a los de la bitácora para que coincidieran en la importación. Al estar importando la parte número 4 de 8, ocurrió un error

nuevamente, pero los demás archivos fueron importados correctamente. Se obtuvo poco más de 3,400,000 filas, pero se observó que, si se dividía el archivo en partes más pequeñas, se podrían obtener muchas más filas. Esto debido a que el archivo que contiene el error es más pequeño, y por ende tiene menos líneas, lo que afecta en menor cantidad a la base de datos.

Se realizó otra prueba generando una nueva base de datos y dividiendo el archivo en 20 secciones, luego en 50, después en 100 partes. Como se esperaba, los resultados fueron que cada vez se obtuvieron más líneas. Se estuvo realizando varias pruebas para dividir el archivo original de la bitácora, hasta que finalmente se dividió el archivo en 420 partes de aproximadamente 2MB cada una, con cerca de 9000 líneas por cada archivo (Fig. 6). Esto permitió obtener un total de 3754401 líneas (Fig. 7).

Esto fue un proceso muy tardado y repetitivo, y para poder realizarlo correctamente se creó un pequeño registro en Excel para llevar el control de los archivos ya importados, archivos faltantes y archivos que están dañados para analizarlos posteriormente. (Fig. 8).

De momento se está trabajando en las 3 primeras etapas de esta metodología (*Comprensión del negocio, Comprensión de los Datos y Preparación de los Datos*) y esta es la información con la que se cuenta hasta el momento.

En este proceso de desarrollo se está buscando entre los datos obtenidos de las bitácoras de Moodle, cuáles pueden ser variables independientes y dependientes, y ver si se relacionan entre sí, para obtener la información necesaria para usar en la aplicación predictiva. Entre los datos que se desean obtener de las bitácoras de Moodle están: la frecuencia de accesos a Moodle, la cantidad de asignaturas cursadas con y sin Moodle, la cantidad de actividades sin realizar, cantidad de actividades realizadas o con algún retraso y cuánto es el tiempo que llevan de retraso.

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
LFSplit	27/10/2020 01:41 p. m.	Aplicación	11 KB
logs_20200820-1343	21/08/2020 08:21 a. m.	Archivo de valores...	834,796 KB

Tipo: Archivo de valores separados por comas de Microsoft Excel
Tamaño: 815 MB
Fecha de modificación: 21/08/2020 08:21 a. m.

Fig. 5. Archivo de respaldo de bitácora LMS.

1-logs_20200820-1343	24-logs_20200820-1343	41-logs_20200820-1343	78-logs_20200820-1343	115-logs_20200820-1343	152-logs_20200820-1343
2-logs_20200820-1343	25-logs_20200820-1343	42-logs_20200820-1343	79-logs_20200820-1343	116-logs_20200820-1343	153-logs_20200820-1343
3-logs_20200820-1343	26-logs_20200820-1343	43-logs_20200820-1343	80-logs_20200820-1343	117-logs_20200820-1343	154-logs_20200820-1343
4-logs_20200820-1343	27-logs_20200820-1343	44-logs_20200820-1343	81-logs_20200820-1343	118-logs_20200820-1343	155-logs_20200820-1343
5-logs_20200820-1343	28-logs_20200820-1343	45-logs_20200820-1343	82-logs_20200820-1343	119-logs_20200820-1343	156-logs_20200820-1343
6-logs_20200820-1343	29-logs_20200820-1343	46-logs_20200820-1343	83-logs_20200820-1343	120-logs_20200820-1343	157-logs_20200820-1343
7-logs_20200820-1343	30-logs_20200820-1343	47-logs_20200820-1343	84-logs_20200820-1343	121-logs_20200820-1343	158-logs_20200820-1343
8-logs_20200820-1343	31-logs_20200820-1343	48-logs_20200820-1343	85-logs_20200820-1343	122-logs_20200820-1343	159-logs_20200820-1343
9-logs_20200820-1343	32-logs_20200820-1343	49-logs_20200820-1343	86-logs_20200820-1343	123-logs_20200820-1343	160-logs_20200820-1343
10-logs_20200820-1343	33-logs_20200820-1343	50-logs_20200820-1343	87-logs_20200820-1343	124-logs_20200820-1343	161-logs_20200820-1343
11-logs_20200820-1343	34-logs_20200820-1343	51-logs_20200820-1343	88-logs_20200820-1343	125-logs_20200820-1343	162-logs_20200820-1343
12-logs_20200820-1343	35-logs_20200820-1343	52-logs_20200820-1343	89-logs_20200820-1343	126-logs_20200820-1343	163-logs_20200820-1343
13-logs_20200820-1343	36-logs_20200820-1343	53-logs_20200820-1343	90-logs_20200820-1343	127-logs_20200820-1343	164-logs_20200820-1343
14-logs_20200820-1343	37-logs_20200820-1343	54-logs_20200820-1343	91-logs_20200820-1343	128-logs_20200820-1343	165-logs_20200820-1343
15-logs_20200820-1343	38-logs_20200820-1343	55-logs_20200820-1343	92-logs_20200820-1343	129-logs_20200820-1343	166-logs_20200820-1343
16-logs_20200820-1343	39-logs_20200820-1343	56-logs_20200820-1343	93-logs_20200820-1343	130-logs_20200820-1343	167-logs_20200820-1343
17-logs_20200820-1343	40-logs_20200820-1343	57-logs_20200820-1343	94-logs_20200820-1343	131-logs_20200820-1343	168-logs_20200820-1343
18-logs_20200820-1343	41-logs_20200820-1343	58-logs_20200820-1343	95-logs_20200820-1343	132-logs_20200820-1343	169-logs_20200820-1343
19-logs_20200820-1343	42-logs_20200820-1343	59-logs_20200820-1343	96-logs_20200820-1343	133-logs_20200820-1343	170-logs_20200820-1343
20-logs_20200820-1343	43-logs_20200820-1343	60-logs_20200820-1343	97-logs_20200820-1343	134-logs_20200820-1343	171-logs_20200820-1343
21-logs_20200820-1343	44-logs_20200820-1343	61-logs_20200820-1343	98-logs_20200820-1343	135-logs_20200820-1343	172-logs_20200820-1343
22-logs_20200820-1343	45-logs_20200820-1343	62-logs_20200820-1343	99-logs_20200820-1343	136-logs_20200820-1343	173-logs_20200820-1343
23-logs_20200820-1343	46-logs_20200820-1343	63-logs_20200820-1343	100-logs_20200820-1343	137-logs_20200820-1343	174-logs_20200820-1343
	47-logs_20200820-1343	64-logs_20200820-1343	101-logs_20200820-1343	138-logs_20200820-1343	175-logs_20200820-1343
	48-logs_20200820-1343	65-logs_20200820-1343	102-logs_20200820-1343	139-logs_20200820-1343	176-logs_20200820-1343
	49-logs_20200820-1343	66-logs_20200820-1343	103-logs_20200820-1343	140-logs_20200820-1343	177-logs_20200820-1343
	50-logs_20200820-1343	67-logs_20200820-1343	104-logs_20200820-1343	141-logs_20200820-1343	178-logs_20200820-1343
	51-logs_20200820-1343	68-logs_20200820-1343	105-logs_20200820-1343	142-logs_20200820-1343	179-logs_20200820-1343
	52-logs_20200820-1343	69-logs_20200820-1343	106-logs_20200820-1343	143-logs_20200820-1343	180-logs_20200820-1343
	53-logs_20200820-1343	70-logs_20200820-1343	107-logs_20200820-1343	144-logs_20200820-1343	181-logs_20200820-1343
	54-logs_20200820-1343	71-logs_20200820-1343	108-logs_20200820-1343	145-logs_20200820-1343	182-logs_20200820-1343
	55-logs_20200820-1343	72-logs_20200820-1343	109-logs_20200820-1343	146-logs_20200820-1343	183-logs_20200820-1343
	56-logs_20200820-1343	73-logs_20200820-1343	110-logs_20200820-1343	147-logs_20200820-1343	184-logs_20200820-1343
	57-logs_20200820-1343	74-logs_20200820-1343	111-logs_20200820-1343	148-logs_20200820-1343	185-logs_20200820-1343
	58-logs_20200820-1343	75-logs_20200820-1343	112-logs_20200820-1343	149-logs_20200820-1343	186-logs_20200820-1343
	59-logs_20200820-1343	76-logs_20200820-1343	113-logs_20200820-1343	150-logs_20200820-1343	187-logs_20200820-1343
	60-logs_20200820-1343	77-logs_20200820-1343	114-logs_20200820-1343	151-logs_20200820-1343	188-logs_20200820-1343
	61-logs_20200820-1343	78-logs_20200820-1343	115-logs_20200820-1343	152-logs_20200820-1343	189-logs_20200820-1343
	62-logs_20200820-1343	79-logs_20200820-1343	116-logs_20200820-1343	153-logs_20200820-1343	190-logs_20200820-1343
	63-logs_20200820-1343	80-logs_20200820-1343	117-logs_20200820-1343	154-logs_20200820-1343	191-logs_20200820-1343
	64-logs_20200820-1343	81-logs_20200820-1343	118-logs_20200820-1343	155-logs_20200820-1343	192-logs_20200820-1343
	65-logs_20200820-1343	82-logs_20200820-1343	119-logs_20200820-1343	156-logs_20200820-1343	193-logs_20200820-1343
	66-logs_20200820-1343	83-logs_20200820-1343	120-logs_20200820-1343	157-logs_20200820-1343	194-logs_20200820-1343
	67-logs_20200820-1343	84-logs_20200820-1343	121-logs_20200820-1343	158-logs_20200820-1343	195-logs_20200820-1343
	68-logs_20200820-1343	85-logs_20200820-1343	122-logs_20200820-1343	159-logs_20200820-1343	196-logs_20200820-1343
	69-logs_20200820-1343	86-logs_20200820-1343	123-logs_20200820-1343	160-logs_20200820-1343	197-logs_20200820-1343
	70-logs_20200820-1343	87-logs_20200820-1343	124-logs_20200820-1343	161-logs_20200820-1343	198-logs_20200820-1343
	71-logs_20200820-1343	88-logs_20200820-1343	125-logs_20200820-1343	162-logs_20200820-1343	199-logs_20200820-1343
	72-logs_20200820-1343	89-logs_20200820-1343	126-logs_20200820-1343	163-logs_20200820-1343	200-logs_20200820-1343
	73-logs_20200820-1343	90-logs_20200820-1343	127-logs_20200820-1343	164-logs_20200820-1343	201-logs_20200820-1343
	74-logs_20200820-1343	91-logs_20200820-1343	128-logs_20200820-1343	165-logs_20200820-1343	202-logs_20200820-1343
	75-logs_20200820-1343	92-logs_20200820-1343	129-logs_20200820-1343	166-logs_20200820-1343	203-logs_20200820-1343
	76-logs_20200820-1343	93-logs_20200820-1343	130-logs_20200820-1343	167-logs_20200820-1343	204-logs_20200820-1343
	77-logs_20200820-1343	94-logs_20200820-1343	131-logs_20200820-1343	168-logs_20200820-1343	205-logs_20200820-1343
	78-logs_20200820-1343	95-logs_20200820-1343	132-logs_20200820-1343	169-logs_20200820-1343	206-logs_20200820-1343
	79-logs_20200820-1343	96-logs_20200820-1343	133-logs_20200820-1343	170-logs_20200820-1343	207-logs_20200820-1343
	80-logs_20200820-1343	97-logs_20200820-1343	134-logs_20200820-1343	171-logs_20200820-1343	208-logs_20200820-1343
	81-logs_20200820-1343	98-logs_20200820-1343	135-logs_20200820-1343	172-logs_20200820-1343	209-logs_20200820-1343
	82-logs_20200820-1343	99-logs_20200820-1343	136-logs_20200820-1343	173-logs_20200820-1343	210-logs_20200820-1343
	83-logs_20200820-1343	100-logs_20200820-1343	137-logs_20200820-1343	174-logs_20200820-1343	211-logs_20200820-1343
	84-logs_20200820-1343		138-logs_20200820-1343	175-logs_20200820-1343	212-logs_20200820-1343

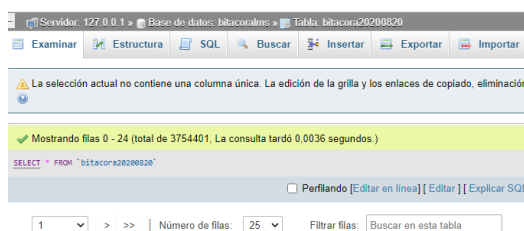


Fig. 7. Consulta de tabla de bitacora LMS en MySQL.

	A	B
1	# Archivo	
197	196	
198	197	
199	198	
200	199	
201	200	
202	201	
203	202	
204	203	
205	204	
206	205	

Fig. 8. Muestra archivo auxiliar para apoyo de importación de los 420 archivos de bitacora del LMS.

Para generar una buena predicción, es necesario tener buena calidad de los datos, pues de esto depende la confiabilidad o certeza del modelo.

3.2 Modelo Conceptual del proyecto

En Fig. 9 se puede visualizar de manera global y muy resumida, el modelo conceptual de este proyecto.



Fig. 9. Diagrama de Modelo Conceptual del Proyecto.

3.3 Lenguajes y técnicas

Para llevar a cabo esta aplicación, se necesitarán de varios lenguajes de apoyo, entre ellos: *Python*, *R* y *Julia*.

Se requiere aplicar ciencia de datos con temas como estadística descriptiva, estadística predictiva, regresiones, agrupamientos, probabilidad, teorema de Bayes, redes neuronales, entre otros.

Además de esto, se requieren técnicas o herramientas especializadas para manejar grandes volúmenes de datos y

especializarse en la gestión de ellos. Para poder catalogar y organizar la información para su uso correcto.

Aquí una breve descripción de estas herramientas:

- Manejadores de bases de datos.
 - MySQL
 - MariaDB
 - PostgreSQL
- Hojas de cálculo.
- Markdown de R.
- Paquetes internos y externos de R, especializados para leer bases de datos:
 - read.csv: paquete nativo de R para leer bases de datos en formato “.csv”.
 - read_xls y read_xlsx: para leer hojas de cálculo.
 - datatable: para trabajar en bases de datos masivas.
 - readr: similar a read.csv, pero con más eficiencia en el núcleo de R.
 - str(): para ver la estructura de la base de datos.
 - head(): para leer encabezados de la base de datos.
 - Psych: para realizar análisis estadísticos básicos (resumen de media, desviaciones estándar, valor mínimo, valor máximo, rango, sesgo, curtosis, errores estándar, valores atípicos, etc.)

3.4 Aplicación de implementación del modelo final

Una vez finalizado el modelo (véase Fig. 9), se desarrollará una aplicación que permita a los usuarios finales hacer uso de este. Esta aplicación tendrá una interfaz gráfica de usuario fácil e intuitiva que permita ubicar a cada estudiante en un grupo según su nivel de riesgo (Fig. 10).

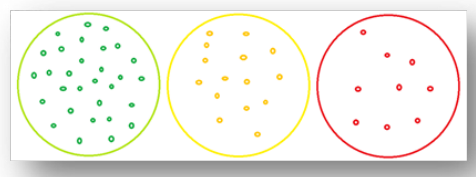


Fig. 10. Interfaz de salida deseada de agrupamiento de alumnos.

3.5 Descripción de la salida de datos o interfaz final de la aplicación de este proyecto

La idea general de lo que se desea que muestre este modelo de predicción, sería un tablero tipo semáforo con los siguientes grupos según su nivel de riesgo académico detectado por la aplicación:

- Grupo verde: alumnos con situación regular.
- Grupo amarillo: alumnos con situación baja de riesgo.
- Grupo rojo: alumnos con alto riesgo.



La meta final de este proyecto es obtener una salida de datos con interfaz gráfica o visual muy sencilla, intuitiva, y fácil de usar. Los alumnos dentro de estas 3 figuras pueden ser representados por algún tipo de ícono o por puntos como se muestran en Fig. 4. Se desea también que la información de los alumnos pueda ser desplegada de varias maneras, por ejemplo: al pasar el cursor por cada punto que esté dentro de su figura que lo contiene, se muestre información básica del alumno señalado por el cursor.

Otra manera de mostrar la información sería agregar a la interfaz de salida 3 botones, uno para cada figura del semáforo, con la función de *desplegar* la lista de los alumnos que son contenidos por cada figura (un botón para la figura verde, que desplegará la lista de los alumnos que estén en esta delimitación o clasificación, y así sucesivamente con cada una de las otras figuras restantes del semáforo).

Otra forma más de realizar el despliegue de información puede ser simplemente dando un clic sobre la figura deseada, y de esta manera se mostrará una lista de aquellos alumnos que pertenezcan a esta figura seleccionada, dando al usuario final (maestros o tutores) una vista global de aquellos alumnos que se encuentren en la figura seleccionada.

Una buena idea para esta decisión de interfaz final de la aplicación, puede ser aplicando una encuesta a los usuarios finales para hacer un sondeo que permita elegir qué tipo de interfaz les es más útil o amigable. También se puede aplicar para estimar el nivel de uso de la aplicación Moodle por parte de alumnos, profesores y tutores, y de esta manera, obtener algún otro tipo de dato a considerar que refuerce a la aplicación o simplemente tener una estimación de los resultados que se obtendrán.

Conclusiones y trabajo futuro.

Con la aplicación de este proyecto se puede generar un modelo predictivo acerca del rendimiento de los alumnos, con lo cual es posible detectar su comportamiento y tendencia. Aquellos alumnos que necesiten un poco de más apoyo para aumentar o mejorar su rendimiento escolar, podrán ser más fácilmente identificados por la aplicación y atendidos por sus correspondientes profesores o tutores

En mejoras a futuro, se puede tratar de incluir otro tipo de datos de los alumnos, entre ellos se pueden mencionar: redes sociales, tipo de metodología de enseñanza para el alumno (presencial, remota o virtual), condiciones sociales y económicas, entre otras. Es decir, investigar y determinar ¿cuáles son los factores adicionales necesarios que puedan mejorar el modelo de predicción? Estos datos adicionales son de una gran amplitud y pueden ser analizadas más a fondo por investigaciones posteriores a este proyecto para poder darles su correspondiente nivel de importancia y de impacto en este modelo predictivo de rendimiento de alumnos.

BIBLIOGRAFÍA

- Cardona, J. A. S., y Arbelaez, J. I. T. (2020). *Aplicación de Learning Analytics y Educational Data Mining en una institución de educación superior en Colombia*. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 19(36), 71-89.
- Chapman, P., Clinton, J., Kerber, R., Khabaza, T., Reinartz, T., Shearer, C., y Wirth, R. (2000). *CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide*. SPSS inc, 9, 13.
- Falcão, T. P., Mello, R. F., Rodrigues, R. L., Diniz, J. R. B., Tsai, Y. S., y Gašević, D. (2020, March). *Perceptions and expectations about learning analytics from a brazilian higher education institution*. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Learning Analytics & Knowledge* (pp. 240-249).
- Fariás, R., Durán, E. B., y Figueroa, S. G. (2008). *Las Técnicas de Clustering en la Personalización de Sistemas de e-Learning*. In *XIV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*.
- Fuentes, E. J. V. (2020) *Introducción a los métodos Deep Learning basados en Redes Neuronales*.
- Hernández, C. L., y Dueñas, M. X. (2009). *Hacia una metodología de gestión del conocimiento basada en minería de datos*.
- Morales, E. F. C., Correa, F. M. F., y Valle, M. A. (2017). *Diseño de un modelo predictivo de fuga de clientes utilizando árboles de decisión*. *Revista Ingeniería Industrial*, 16(1), 7-23.
- Perez, R. (2010). *Nociones básicas de estadística*. Rigoberto Perez.
- Slater, N., Peasgood, A., y Mullan, J. (2016). *Learning analytics in higher education: A review of UK and international practice Full report*. Educause, (April), 39.
- West, D., Luzeckyj, A., Toohey, D., Vanderlelie, J., y Searle, B. (2020). *Do academics and university administrators really know better? The ethics of positioning student perspectives in learning analytics*. *Australasian Journal of Educational Technology*, 36(2), 60-70.



Aplicación De Geoposicionamiento Para Fumigar Áreas De Un Vehículo Aéreo No Tripulado En Rutas Específicas

Chavez-Gamiño, Efren * Morales-Nava, Renato **
Sosa, Alejandro ***

* Tecnológico Nacional de México, Campus Morelia, Avenida Tecnológico 1500, CP. 58120 Morelia, Michoacán, México (e-mail: isc.efrenchavez@gmail.com)).

** Tecnológico Nacional de México, Campus Lázaro Cárdenas, Av. Melchor Ocampo 2555, Cuarto Sector, CP 60950, Lázaro Cárdenas, Michoacán, México (e-mail: renato.morales@lcardenas.tecnm.mx).¹

*** Centro de Innovación y Desarrollo Agroalimentario de Michoacán A.C., Morelia, Michoacán, CP 58341, México, (e-mail: asosa@cidam.org).

Resumen. La revolución tecnológica no sólo está comenzando a sustituir el ser humano en las actividades secundarias y terciarias, actualmente en ámbitos básicos de la economía como en la agricultura, donde con el uso de vehículos aéreos no tripulados y la configuración de hardware libre para el uso fumigación de cultivos donde puede minimizar el uso de plaguicidas en campo, optimizar las áreas de fumigación y disminuir la pérdida de cultivos. Con la implementación de nuevas tecnologías, los de modelos de negocios están cambiando el impacto de la producción agrícola en el mercado. Por tanto, se pretende implementar tecnologías libres para disminuir costos y aumentar el nivel de la productividad del campo, esperando que un gran porcentaje de productores acepten estas nuevas tecnologías.

Keywords: Drone, Fumigación, Arduino, Cultivos, Agricultura.

1. INTRODUCTION

Los daños provocados por las plagas y las enfermedades han asolado a los agricultores desde el comienzo mismo de la agricultura. Para los agricultores combatir las plagas y las enfermedades es una necesidad.

Existen evidencias de que se vive un cambio de época, la era industrial está en crisis y se comienza a transitar lo que algunos autores llaman post-industrialismo o era del conocimiento. (Narváez Montoya, 2013)

La problemática global de la industria está provocando problemas ambientales, energéticos, alimentarios, económicos y financieros que han generado una profunda crisis mundial que afecta a las principales economías y que tiene consecuencias hasta el momento impredecibles. Actualmente se observan profundos cambios tecnológicos: el desarrollo de la electrónica y de las tecnologías de la información y comunicación ha favorecido la difusión de la agricultura de precisión. Si bien este concepto está vinculado al manejo de la variabilidad espacial y temporal en la producción agropecuaria, en muchos casos se asocia a la aplicación de la tecnología del post-industrialismo. (Damián, 2015)

El Centro de Innovación y Desarrollo Agroalimentario de Michoacán A.C CIDAM; posee recursos humanos altamente

especializados en tecnología agroalimentaria, con infraestructura y capital humano, integran la fuerza de trabajo, garantizando la calidad de los servicios que se ofrece, se homologa con las normativas nacionales e internacionales. Las Unidades Técnicas de Innovación son quienes sustentan el trabajo del CIDAM, ofreciendo servicios de catálogo y especializados, o bien diseñando estrategias para atender necesidades específicas a través de proyectos integrales de innovación. (College, 2020)

2. MARCO TEÓRICO

Android: Sistema operativo para dispositivos móviles más famoso del mundo, desde teléfonos y relojes hasta automóviles y TV, personaliza tu vida digital con Android. Android Studio es el entorno de desarrollo integrado (IDE) oficial para la plataforma Android. La primera construcción estable se lanzó en diciembre de 2014. Android Studio está diseñado específicamente para el desarrollo de Android. Ofrece herramientas personalizadas para el desarrollo de Android, incluida la edición de código enriquecido, depuración, pruebas y herramientas de perfilado. sin embargo, Mateusz Bartos, un desarrollador de Android de www.medium.com, declaró en su artículo que aplicaciones iOS en Java es compatible con Android.

Android era un sistema operativo que estaba desarrollando una compañía de nombre Android Inc. y que fue adquirida por Google en julio del año 2005. Desde entonces siempre



¹ ORC ID: 0000-0003-0670-2129, CVU CONACYT ID: 947329.

que se habla de este sistema operativo se hace referencia a la compañía del buscador, aunque es la Open Handset Alliance. En julio de 2005, Google adquirió Android Inc., una pequeña compañía de Palo Alto, California fundada en 2003. (Android, 2020)

Entre los cofundadores de Android que se fueron a trabajar a Google están Andy Rubin (co-fundador de Danger), Rich Miner (co-fundador de Wildfire Communications, Inc.), Nick Sears (alguna vez VP en T-Mobile), y Chris White (quien encabezó el diseño y el desarrollo de la interfaz en WebTV).

En aquel entonces, poco se sabía de las funciones de Android Inc. fuera de que desarrollaban software para teléfonos móviles. Esto dio pie a rumores de que Google estaba planeando entrar en el mercado de los teléfonos móviles. (Android, 2020)

Arduino: Es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador re-programable y una serie de pines hembra, los que permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla (principalmente con cables dupont). (Arduino.cl, 2020)

Una placa electrónica es una PCB ("Printed Circuit Board", "Placa de Circuito Impreso" en español). Las PCBs superficies planas fabricadas en un material no conductor, la cual consta de distintas capas de material conductor. Una PCB es la forma más compacta y estable de construir un circuito electrónico. Así que la placa Arduino no es más que una PCB que implementa un determinado diseño de circuitería interna, de esta forma el usuario final no se debe preocupar por las conexiones eléctricas que necesita el microcontrolador para funcionar, y puede empezar directamente a desarrollar las diferentes aplicaciones electrónicas que necesite.

¿Cómo se originó el Arduino? Arduino Nació en el año 2005 el Instituto de Diseño Interativo de Ivrea. Arduino apareció por la necesidad de contar con un dispositivo para utilizar en aulas que fuera de bajo coste. La idea original fue, fabricar una placa para uso interno de la escuela.

Sin embargo, el instituto se vio obligado a cerrar sus puertas precisamente en 2005. Ante la perspectiva de perder todo el proyecto Arduino en el proceso, se decidió liberarlo y abrirlo al público para que todo el mundo pudiese participar en la evolución del proyecto, proponer mejoras y sugerencias.

Los principales responsables de la idea y diseño de Arduino fueron Massimo Banzi, David Cuartielles, David Mellis, Tom Igoe y Gianluca Martino. (Arduino.cl, 2020)

Comunicaciones inalámbricas: La tecnología inalámbrica Bluetooth® es una tecnología inalámbrica de corto alcance que permite la comunicación inalámbrica de datos entre dispositivos digitales, como un ordenador o una cámara digital. La tecnología inalámbrica BLUETOOTH funciona en un rango de aproximadamente 10 metros.

Lo habitual es establecer una conexión entre 2 dispositivos, pero algunos dispositivos pueden conectarse simultáneamente a varios dispositivos. (SONY, 2012)

No necesita utilizar ningún cable para realizar la conexión ni es necesario orientar los dispositivos frente a frente como ocurre con la tecnología de infrarrojos. Por ejemplo, puede utilizar los dispositivos dentro de una bolsa o bolsillo.

El estándar BLUETOOTH es un estándar internacional admitido y empleado por miles de empresas en todo el mundo. (Definición, 2020) GPS: Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema de radionavegación de los Estados Unidos de América, basado en el espacio, que proporciona servicios fiables de posicionamiento, navegación, y cronometría gratuita e ininterrumpidamente a usuarios civiles en todo el mundo. A todo el que cuente con un receptor del GPS, el sistema le proporcionará su localización y la hora exacta en cualesquiera condiciones atmosféricas, de día o de noche, en cualquier lugar del mundo y sin límite al número de usuarios simultáneos. (GPS, 2020)

Constelación El GPS se compone de tres elementos: los satélites en órbita alrededor de la Tierra, las estaciones terrestres de seguimiento y control, y los receptores del GPS propiedad de los usuarios. Desde el espacio, los satélites del GPS transmiten señales que reciben e identifican los receptores del GPS; ellos, a su vez, proporcionan por separado sus coordenadas tridimensionales de latitud, longitud y altitud, así como la hora local precisa.

Hoy están al alcance de todos en el mercado los pequeños receptores del GPS portátiles. Con esos receptores, el usuario puede determinar con exactitud su ubicación y desplazarse fácilmente al lugar a donde desea trasladarse, ya sea andando, conduciendo, volando o navegando. El GPS es indispensable en todos los sistemas de transporte del mundo ya que sirve de apoyo a la navegación aérea, terrestre y marítima. Los servicios de emergencia y socorro en casos de desastre dependen del GPS para la localización y coordinación horaria de misiones para salvar vidas. Actividades cotidianas como operaciones bancarias, de telefonía móvil e incluso de las redes de distribución eléctrica, ganan en eficiencia gracias a de la exactitud cronométrica que proporciona el GPS. Agricultores, topógrafos, geólogos e innumerables usuarios trabajan de forma más eficiente, segura, económica y precisa gracias a las señales accesibles y gratuitas del GPS. (GPS, 2020)

3. PROBLEMÁTICA

Los daños provocados por las plagas y las enfermedades han asolado a los agricultores desde el comienzo mismo de la agricultura. Para los agricultores combatir las plagas y las enfermedades es una necesidad. Los métodos actuales de fumigación contaminan las fuentes de agua, matan animales e incluso contaminan el aire por su falta de precisión, adicionalmente provocan que algunos productos provocan no cumplan con los requerimientos de aceptación en otros países; siendo ésta una práctica peligrosa para el medio ambiente.

En la fumigación tradicional, los insectos son perjudicados terriblemente, afectando también a los insectos beneficiosos como las abejas, ya que los pesticidas viajan también a otros lugares fuera de los cultivos actuales, poniendo en peligro la existencia de tales insectos.



Los principales problemas para solucionar son: Optimización del tiempo de fumigación, precisión de fumigación solo en áreas afectadas, optimización de sustancias para fumigar para minimizar plaguicidas en fruto y aumentar aceptación en otros países, reducir el área de contagio entre plantas.

4. METODOLOGÍA

Desarrollo de aplicación móvil para la comunicación con el dispositivo de telemetría terrestre configurado como “maestro” que está conformado de un microcontrolador Arduino Nano, se encuentra equipado con dos módulos adicionales “Bluetooth HC-06” y “RF HC-12”, ya que gracias al módulo de Radio frecuencia mantiene una comunicación a distancia con el equipo de telemetría aérea. Como se puede observar en la Figura. 1 se incorporan tres diodos led para indicadores.

Rojos: Indica que existe comunicación con el dispositivo de telemetría aérea. Blanco: Indica que la trama de comunicación entre los módulos “RF HC-12” es correcta. Azul: Indica la comunicación Bluetooth con la aplicación FumApp del dispositivo móvil.

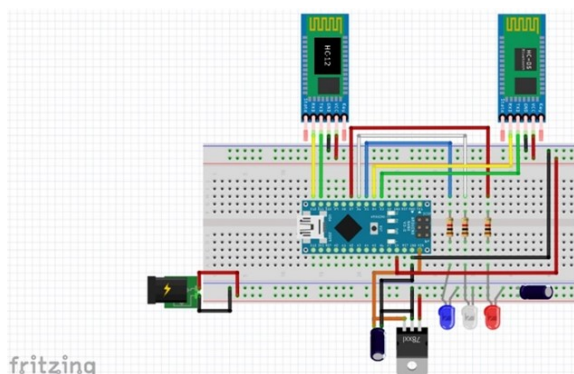


Figura 1. Diagrama Telemetría Terrestre

El dispositivo de telemetría aérea tiene el mismo principio a diferencia que este se encuentra configurado como “esclavo” ya que su principal objetivo es recibir las ordenes del dispositivo de telemetría terrestre. Este dispositivo cuenta con un módulo GPS NeoM8 y un puerto PWM para la activación del mecanismo de fumigación. En la Figura 2 se observa que igualmente cuenta con tres diodos de comunicación y la única diferencia es el led Azul: Indica que el dispositivo recibe información del módulo GPS.

Ya explicado el funcionamiento de los dispositivos de telemetrías se obtiene una comunicación bidireccional en serie(ver Figura. 3). Los datos compartidos viajan en bytes, pero en conjunto se forma un dato de tipo JSON (ECMA-262, 2017). De esta manera se obtienen más fácil y ordenada los datos entre dispositivos.

FumApp colabora en la automatización de fumigación de cultivos en ciertos puntos de todo tipo de terreno. Estos puntos son seleccionadores desde La aplicación móvil “FumApp” (Figura 4). Principalmente donde se detecta y comienza algún tipo de plaga o maleza, que impiden el crecimiento correcto de los cultivos. Mediante un dron de ruta,

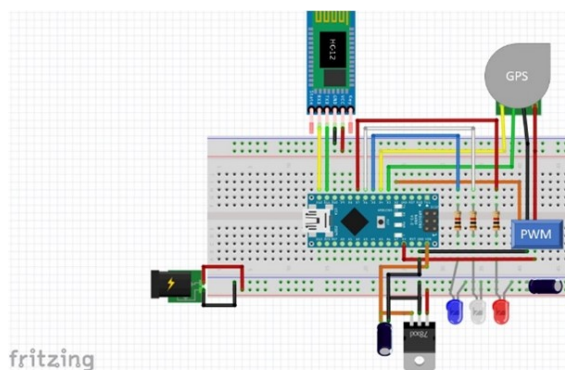


Figura 2. Diagrama Telemetría Aérea

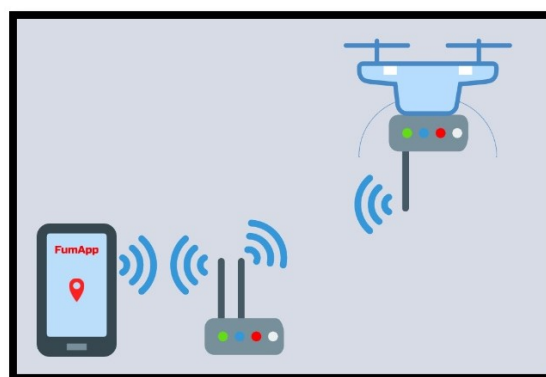


Figura 3. Diagrama Telemetría Aérea

y con la adaptación de la telemetría aérea incorporado al mismo, realizan su recorrido específico ya programado y gracias al componente GPS el microcontrolador sabrá exactamente dónde es que está ubicado el dron con mucha presión y con esto activar el mecanismo de fumigación en dicho punto. La aplicación esta desarrollada en Android Studio especial para el uso en Tableta, con el fin de mostrar todos los datos en tiempo real de manera organizada ya que son varios factores que se deben cuidar.



Figura 4. Aplicación FumApp

FumApp cuenta con dos modos de trabajo “online” y “offline” ya que puedes agregar coordenadas manualmente o mediante Google Maps. Cuenta con dos Fragmentos uno



que se comporta de manera estático ya que es el principal de enviar y recibir información a la telemetría terrestre, y el segundo que se comporta de manera dinámica, y con este poder cambiar las distintas tareas como el conectar con el dispositivo de telemetría, cambiar de modo online a offline o viceversa (Ver figura 5).

Narváez Montoya, A. (2013). Educación y comunicación : del capitalismo informacional al capitalismo cultural.
SONY (2012). Guía de ayuda.



Figura 5. Aplicación FumApp Online

Cuenta con un toolbar que es la encargada de mostrarnos los diferentes estados, son animaciones de cambian de color acorde a su actualización como lo son satélites GPS la comunicación entre telemetrías, así como también el estado del mecanismo de fumigación.

Actualmente el desarrollo de las estaciones de tierra y aire se encuentra en fase de pruebas de campo para laboratorio, es decir, se ha utilizado en servicios para productores en campo dando buenos beneficios, se trabajará de forma continua para mejorar las posibles fallas. Con lo cual se pretendería ponerlo ya en servicio al público en general.

5. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de esta aplicación y método para la aplicación de fumigación en huerto, le permitirá la optimización del tiempo, el costo en aplicación de químicos y mano de obra; logrando adicionalmente la reducción del grado de contaminación por la utilización del uso de químicos en exceso.

Como consecuencia los beneficios que se obtendrán al utilizar esta tecnología, que es un elemento innovador para la fumigación con precisión, que los agricultores de alimentos puedan ofrecer productos de calidad al consumidor final con precios razonables.

BIBLIOGRAFÍA

- Android (2020). Android-os. *Android os read the docs*.
Arduino.cl (2020). Arduino.
College, A. (2020). *Android Studio Apps Development*. Advanced Micro Systems Sdn Bhd.
Damián, A. (2015). Crisis global, económica, social y ambiental. *Scielo*.
Definición (2020). Definición de bluetooth.
ECMA-262 (2017). The json data interchange syntax. *ecma-international*.
GPS (2020). *Sistema de Posicionamiento Global Al Servicio del Mundo*.



Adquisición de competencias de ciencias computacionales de nivel superior a través de la realización de Cursos en Línea Masivos y Abiertos (Massive On-line Open Courses, MOOC's)

José Manuel Cuin Jacuinde

Tecnológico Nacional de México, Campus Morelia. Departamento de
Sistemas y Computación
Noviembre 2020

Resumen

De acuerdo con cifras del INEGI de 2016, solamente 3 de cada diez jóvenes tienen hoy en día en México, acceso a la enseñanza de nivel superior (Fuentes, 2017), cifra determinada entre otras cosas por la escasa infraestructura educativa que existe hoy en día, ya que hacía 2016 solamente existían en el país, 5 mil 343 universidades, para un país de 120 millones de habitantes.

Es claro que el país requiere la instrumentación de estrategias que permitan a un mayor porcentaje de la población tener acceso a formación de nivel superior, sin que la escasez de infraestructura educativa sea un factor determinante, por lo que la educación en línea cobra gran importancia debido entre otras cosas a las ventajas que ofrece, las cuales favorecen la reducción de costos, la vigencia de los contenidos y la flexibilidad de sus esquemas de aprendizaje (Universia, 2017), representando así una alternativa viable para que mayor cantidad de Mexicanos tengan acceso a una educación superior de calidad. Es así como se propone el reconocimiento y validación de competencias de nivel superior a través de la realización de Cursos en Línea Masivos y Abiertos o MOOC's, por sus siglas en inglés.

Palabras clave: Cursos masivos, ciencias computacionales, competencias, educación superior, validación

1. Introducción

Los MOOC's como herramienta de aprendizaje y adquisición de competencias en el campo de las ciencias computacionales, son hoy en día una verdadera alternativa de aprendizaje formal avalado e impulsado por organizaciones internacionales debido a su flexibilidad, rápida adaptabilidad y ubicuidad, los cuales trascienden las limitaciones de los modelos educativos presenciales de hoy en día.

El presente trabajo de investigación tiene el objetivo de respaldar mediante el aporte de evidencias obtenidas tras la experimentación, la efectividad de la implementación de los MOOC's desde el punto de vista de los involucrados, para la adquisición de conocimientos y competencias en el campo de las ciencias computacionales en el nivel superior.

2. Contexto Actual de los MOOC's en la educación

Como bien lo establece Ruíz Bolívar en su artículo titulado "The MOOC ¿An alternative model for higher education?", las universidades latinoamericanas de hoy en día necesitan flexibilizarse y renovarse para hacer frente a los nuevos retos que establece la denominada "sociedad de la información", para lo cual requieren de la adopción de nuevos esquemas educativos que les permita brindar a sus alumnos planes de estudio no solamente vigentes en contenido, sino que también flexibles en cuanto a la manera en que estos se ofrecen, pues hoy en día los esquemas presenciales se han visto evidentemente rebasados por la creciente demanda de los mismos, al menos en países como México, en el que según datos del INEGI (Fuentes, 2017), existían en 2016, únicamente 5 mil 343



instituciones de nivel superior, para dar atención a una población de 120 millones de habitantes.

Debido a dichas limitaciones, la educación en línea cobra cada vez mayor relevancia a nivel internacional como una alternativa viable para que cada vez más personas puedan tener acceso a educación superior de calidad, mediante los denominados Massive On-line Open Courses (MOOC's por sus siglas en inglés) los cuales como lo establece Cuin (2017), "los MOOCs gozan de reconocimiento como una de las 30 tendencias más prometedoras en educación hasta el año 2028", según lo establece el Instituto para las Tecnologías de la Información en la Educación, perteneciente a la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), entre otras cosas por las enormes ventajas que ofrece con relación a los esquemas presenciales tradicionales, al abaratar costos, brindar acceso a contenidos vigentes y favorecer la disponibilidad de acceso mediante internet, eliminando por completo limitantes inherentes a los cursos presenciales como son limitaciones físicas, temporales y espaciales (Fundación Telefónica Movistar, 2016).

Si bien es claro que las ventajas que ofrece la educación en línea son indiscutibles, existe también la inquietud referente a la validez y rigidez académica de los mismos, por lo que el mismo Cuin (2017), en su artículo "Los MOOC's como herramienta de especialización en las Ciencias Computacionales" menciona al respecto que son instituciones como el mismo Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT por sus siglas en inglés) establece de manera textual en el sitio <https://www.edx.org/school/mitx>, "que sus cursos contienen todo el rigor y calidad que caracterizan a la institución", por lo que la aceptación de la validez de sus cursos por parte de cualquier institución de nivel superior en México, respecto a los cursos que ofrece el MIT tomados a través de un esquema en línea, es por demás cuestionable, tomando en cuenta que éste último encabeza el ranking de las mejores universidades del mundo, según información publicada en 2018 por la agencia española EFE (EFE, 2018).

Cabe señalar que además de los aspectos anteriormente señalados, la UNESCO

recomendó a los Estados en 2012, a través de la Declaración de París sobre los Recursos Educativos Abiertos, el fomentar el conocimiento y uso de los recursos educativos abiertos como vehículo para la ampliación del acceso a la educación en todos sus niveles, de manera tanto formal como informal, así como también la necesidad de "Alentar la creación de mecanismos para la evaluación y certificación de los resultados del aprendizaje alcanzados mediante recursos educativos abiertos." (UNESCO, 2012), por lo que resulta hoy en día más que indispensable que en las instituciones de educación superior en México, exista la apertura necesaria para observar tales recomendaciones a más de 6 años de su declaración, si es que se quiere fomentar la preparación de profesionistas capaces de competir en el ámbito internacional.

3. Resultados

A manera de soporte y evidencia de la factibilidad de la implementación de los MOOCs para la adquisición de competencias profesionales en el ámbito de las ciencias computacionales en nivel superior, se incluyen a continuación una serie de observaciones realizadas tras la realización de un MOOC para el aprendizaje del framework de desarrollo de software "Laravel", el cual fue cursado en mayo 2019 por un grupo experimental de 22 jóvenes de nivel licenciatura de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Tecnológico Nacional de México, Campus Morelia, como parte de un ejercicio pedagógico que requería el aprendizaje del framework para el desarrollo de un proyecto de software de la materia Gestión de Proyectos de Software.

Cabe mencionar que el conocimiento previo del grupo experimental al momento del estudio correspondía íntegramente al de un grupo de alumnos cuya exposición a las tecnologías de programación web se limitaban únicamente al conocimiento de HTML, XML, CSS y la arquitectura cliente servidor, como se hace constar en su programa de estudios oficial dictado por el Tecnológico Nacional de México, Campus Morelia (2020), así como lo demuestra la siguiente gráfica:



A 1. Antes de haber tomado el curso en línea para el aprendizaje del framework Laravel, ¿Qué porcentaje de conocimientos consideras que tenías acerca del framework?

22 respuestas

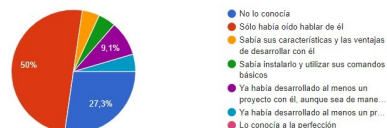


Figura 1. Conocimiento previo del grupo experimental del framework Laravel.

Dado lo anterior, es posible afirmar que las competencias adquiridas se obtuvieron de manera íntegra tras haber cursado algún MOOC, disponible a través de cualquiera de las plataformas que se muestran en la siguiente gráfica:

2.- Si la respuesta a la pregunta anterior fue afirmativa, ¿Qué plataforma utilizaste?

22 respuestas

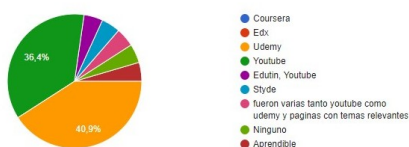


Figura 2. Plataformas utilizadas para la realización del MOOC.

Como se observa en la siguiente gráfica, la percepción del grupo experimental sobre su grado de confianza para utilizar la competencia adquirida para el desarrollo de un proyecto de software funcional, fue mayoritariamente favorecedora, considerando su nulo conocimiento previo:

A 4. Después de haber tomado el curso en línea para el aprendizaje del framework Laravel, ¿En qué porcentaje te sientes confiado para desarrollar un proyecto con él en el futuro?

22 respuestas

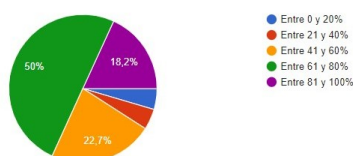


Figura 3. Percepción de confianza para la utilización de la nueva competencia en el desarrollo de un proyecto funcional.

Aunado a lo anterior, es importante resaltar que la percepción por parte del grupo experimental, sobre la efectividad de adquirir competencias en línea fue muy favorable, ya que más del 45% de los encuestados consideró que la experiencia resultó incluso más favorecedora, en comparación a haberlo realizado en el esquema presencial tradicional.

A 5. Después de haber tomado el curso en línea para el aprendizaje del framework Laravel, ¿Qué tan efectiva consideras que fue para ti, la experiencia de aprender nuevas tecnologías en línea?

22 respuestas



Figura 4. Percepción de efectividad para la adquisición de competencias en línea en comparación con el esquema presencial.

Aunado a lo anterior, es importante resaltar que la percepción por parte del grupo experimental, sobre la efectividad de adquirir competencias en línea fue muy favorable, ya que más del 45% de los encuestados consideró que la experiencia resultó incluso más favorecedora, en comparación a haberlo realizado en el esquema presencial tradicional.

A 7. Después de haber tomado el curso en línea para el aprendizaje del framework Laravel, ¿Qué posibilidad hay de que aprendas nuevas tecnologías de tu área a través de cursos de línea en el futuro?

22 respuestas



Figura 5. Posibilidad de utilización de MOOC's para la adquisición de competencias en el futuro.

Se puede observar que más del 85% del grupo experimental, considerará con alto grado de certeza, recurrir en el futuro a los MOOCs como herramienta de aprendizaje de nuevas tecnologías en el futuro.

Finalmente, es importante resaltar, que de acuerdo al índice de aprobación de la materia, 100% los involucrados en el experimento cubrieron de manera íntegra los requisitos de aprobación de la misma, lo que deja de manifiesto que el nivel de dominio adquirido respalda sus percepciones en el sentido de que al momento de la publicación de este artículo, todos ellos son capaces de desarrollar proyectos de software funcionales.



Conclusiones

Como cierre al presente trabajo de investigación, se llega a las siguientes conclusiones:

- El aprendizaje y obtención de competencias en el ámbito de las ciencias computacionales en el nivel superior, es una posibilidad sólida que puede ser analizada con mayor profundidad.
- Si bien la implementación de alternativas de aprendizaje virtual como los MOOC's es una práctica impulsada por organizaciones internacionales, empresas del sector tecnológico y universidades de renombre, debe considerarse con mayor seriedad para formar parte de los sistemas educativos formales actuales.
- Se sugiere la realización de un estudio más profundo en cuanto a la efectividad de utilizar MOOC's como herramientas de estudio complementarias, sino es que primordiales en el campo de las ciencias computacionales, tomando en consideración las demandas cambiantes del sector laboral, a las cuales no se ha podido adherir el sistema educativo actual.

Nota autobiográfica

El autor, José Manuel Cuin Jacuinde cuenta con grado de Ingeniero en Sistemas Computacionales por parte del Tecnológico Nacional de México, Campus Morelia, así como con el grado de Maestro en Gestión de las Tecnologías de la Información por la Universidad TecMilenio. Actualmente se desempeña como Jefe del Departamento de Sistemas y Computación del Tecnológico Nacional de México, Campus Morelia, como docente de materias del área de programación y como desarrollador de software freelance para la iniciativa privada.

Referencias

Cuin, Manuel. "Los MOOC's como herramienta de especialización en las Ciencias Computacionales". *XIV Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico* EFE, (2018). Marzo.

Harvard y el MIT dominan el ranking de las universidades más prestigiosas. Extraído el 24 de Octubre de 2018, de <https://www.efe.com/efe/espana/portada/harvard-y-el-mit-dominan-un-ranking-de-las-universidades-mas-prestigiosas/10010-3633030>

Fuentes, M. (2017). México social: educación superior, la desigualdad. *Excelsior*. Recuperado el 24 de Octubre de 2018, de <https://www.excelsior.com.mx/nacional/2017/08/08/1180263>

Ruiz, C. (2015). El MOOC: ¿Un modelo alternativo para la educación universitaria? *Apertura*. 7(2)

Tecnológico Nacional de México, (2020). AE055ProgramacionWeb. Extraído el 20 de octubre de 2020 de: <http://dsc.itmorelia.edu.mx/web/documentos/asignaturas/AE055ProgramacionWeb.pdf>

UNESCO, (2012). Declaración de París de 2012 sobre los REA. Extraído el 25 de Octubre de 2018, de http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/CI/WPFD2009/Spanish_Declaration.htm

Universia, (2017). Las 10 ventajas de las clases online. Extraído el 21 de Octubre de 2018, de <https://www.universia.net/es/actualidad/orientacion-academica/como-aprovechar-oportunidades-formacion-online-955144.html>



Red Neuronal Pulso Acoplada Simplificada Adaptada para la Mejora de Iluminación en Imágenes Médicas a Color

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

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

Resumen: En este artículo se introduce un modelo de Red Neuronal Pulso-Acoplada Simplificada preliminar para la mejora de imágenes médicas a color con iluminación reducida utilizando el modelo de color RGB realizando una mejora en cada canal de color. La matriz de tiempo generada por el modelo es utilizada como un mapa de iluminación para realizar la corrección de iluminación en las imágenes oscuras. El modelo propuesto incorpora técnicas para el ajuste automático de parámetros como la función de decaimiento para ajustar el número de iteraciones a un promedio de 72 y el ajuste automático del potencial de membrana de la función de alimentación. De manera objetiva los resultados son comparados con Ecuación de Histograma y Ecuación de Histograma Adaptativo Limitado de Contraste y medido con Peak Signal-to-Noise Ratio, Similitud estructural y Error Cuadrático Medio. Obteniendo mejores resultados el modelo SPCNN propuesto.

Palabras clave: Mejoramiento de imágenes, Redes Neuronales Pulso-Acopladas, SPCNN, Matriz de tiempo, Imágenes oscuras.

I. INTRODUCCIÓN

La calidad de imágenes es un tema subjetivo debido a que no existe un estándar universal para definirlo (Pratt, 1994) por tal motivo la calidad puede ser descrita por medio de diferentes atributos como: color, luminosidad, contraste, nitidez, ruido y los artefactos (Bonnie, 2010). Sin embargo, estos atributos pueden verse afectados por factores externos como problemas de iluminación o equipo que no se encuentre en un estado ideal. Una imagen con poca iluminación puede afectar el contraste y hacer que para el ojo humano no sea una tarea fácil tratar con estas imágenes. Por lo tanto, el no tener imágenes médicas con una calidad adecuada puede dificultar las tareas de diagnóstico médico (Alenezi & Salari, 2019). Además, la información presente dentro de la imagen es clave para el diagnóstico de enfermedades dentro de las cuales se pueden encontrar imágenes de tomografía digital, resonancia magnética, ultrasonidos, imágenes de microscopios digitales, etc. (Huang et al., 2019). No obstante, existen técnicas para realizar esta tarea, una de las más comunes es la ecualización del histograma (EH) y sus diferentes variantes que a pesar de su aparente antigüedad aún dan buenos resultados (Zheng et al., 2019). Además, existen métodos más avanzados que buscan asemejarse a la visión humana como Retinex (Park et al., 2019).

Otra forma de realizar la mejora de imagen es por medio de Redes Neuronales Artificiales (RNA) las cuales han ofrecido buenos resultados (Jena & Mishra, 2018). Dentro de las RNA, existen las de tercera generación o Pulso-Acopladas (PCNN).

Las PCNN comienzan en 1990 cuando Eckhorn et al. (Eckhorn et al., 1990) propusieron un nuevo modelo de red neuronal basado en la corteza visual de los gatos. En 1999, Johnson y Padgett (Johnson, 1994) modificaron este modelo en uno adaptado para el procesamiento de imágenes y lo nombraron como Red Neuronal Pulso-Acoplada (PCNN). El modelo de Red Neuronal Pulso-Acoplada Simplificado (SPCNN) surge a partir del Modelo Cortical Punzante (SCM) (Zhan & Zhang, 2009).

Una importante característica de las PCNN, es la Matriz de Tiempo (MT), la cual registra el tiempo de activación de las neuronas y puede ser utilizada en el procesamiento de imágenes (Zhan, Shi, et al., 2016). Dentro de los trabajos realizados se encuentra (Aguilar et al., 2019) el cual propone el Modelo de Intersección Cortical con Matriz de Tiempo Luminosa (ICM-LTM) en el cual mejora imágenes con problemas de iluminación en imágenes en escala de grises. A sí mismo, la MT puede ser utilizada para mejorar distintas características de la imagen como se muestra en (Rangel et al., 2016)(Cardenas et al., 2015). En este artículo se utiliza el comportamiento de la MT para obtener un mapa de iluminación con información de los píxeles que muestra la intensidad de cada pixel siguiendo un comportamiento en donde a mayor intensidad presente registra un menor valor y viceversa.

Este modelo propuesto es una versión preliminar de un trabajo en desarrollo, por lo tanto, los resultados aquí mostrados no necesariamente representan los resultados esperados en el trabajo final. Cabe mencionar que este es una versión de un proyecto de tesis.



El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. Sección 2 el modelo SPCNN. Sección 3 describe el modelo propuesto. Sección 4 presenta las métricas utilizadas. Sección 5 presenta la experimentación y resultados. Sección 6 presenta conclusiones y trabajo a futuro.

II. RED NEURONAL PULSO-ACOPLADA SIMPLIFICADA

Tomando como inspiración el trabajo de (Aguilar et al., 2019), se propone una variante al modelo SPCNN y este al ser una variante del modelo SCM y este ser una versión simplificada del modelo PCNN se logra mantener las características originales pero con un menor costo computacional (Chen et al., 2011). Este modelo es especialmente utilizado en fusión de imágenes, no obstante también puede ser utilizado en diferentes tareas (Deng et al., 2019) y debido a que en este trabajo lo que se necesita es la Matriz de Tiempo se puede experimentar con diferentes modelos sin afectar su comportamiento. El modelo está dado por las siguientes ecuaciones:

$$F_{ij}[n] = S_{ij} \quad (1)$$

$$L_{ij}[n] = V_L \sum W_{ijkl} Y_{kl}[n-1] \quad (2)$$

$$U_{ij}[n] = F_{ij}[n](1 + \beta L_{ij}[n]) \quad (3)$$

$$E_{ij}[n] = e^{-\alpha E} E_{ij}[n-1] + V_E Y_{ij}[n-1] \quad (4)$$

$$Y_{ij}[n] = \begin{cases} 1, & \text{si } U_{ij}[n] > E_{ij}[n] \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

Donde n representa el tiempo de activación actual. $F_{ij}[n]$ representa la función de alimentación y recibe directamente la imagen de entrada S_{ij} . La función de enlace $L_{ij}[n]$ registra las activaciones de las neuronas vecinas y es afectado por el potencial de membrana de la función de enlace dada por V_L , este potencial de membrana determina el impacto que tendrá la función de enlace sobre la PCNN y especialmente afecta a la función de activación interna. $U_{ij}[n]$ representa la función de activación interna y esta es utilizada por el umbral dinámico $E_{ij}[n]$, la función de activación $Y_{ij}[n]$ es activado cuando $U_{ij}[n]$ es mayor que $E_{ij}[n]$. $e^{-\alpha E}$ representa una función de decaimiento que afecta al umbral dinámico $E_{ij}[n]$, β representa el potencial de enlace y V_E potencial de activación de $Y_{ij}[n]$, ij representa las direcciones de los pixeles dentro de la imagen, W_{ijkl} es la matriz de pesos sinápticos generalmente gaussiana de 3×3 dado por la ecuación (6).

$$W_{ijkl} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0.5 & 0 & 0.5 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 \end{bmatrix} \quad (6)$$

La matriz de tiempos es un mapa de información de la imagen a través del tiempo, registrando el tiempo de activación de las neuronas (Ma et al., 2010). La matriz de tiempo está dada por la ecuación (7).

$$M_{ij}[n] = \begin{cases} n, & \text{si } Y_{ij}[n] = 1 \\ M_{ij}[n-1], & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (7)$$

Donde n representa al número de iteración o tiempo de activación. Cuando una neurona es detonada el valor de $Y_{ij}[n]$ en la posición ij es 1 por lo cual en la matriz de tiempo $M_{ij}[n]$ en la posición ij se asigna el tiempo n de lo contrario mantiene su valor.

III. MODELO PROPUESTO

El modelo propuesto es una variante directa del modelo SPCNN manteniendo su comportamiento original pero adaptado para la mejora de iluminación en imágenes a color. El modelo esta dado por las siguientes ecuaciones:

$$F_{ij}[n] = V_F S_{ij} \quad (8)$$

$$L_{ij}[n] = e^{-\alpha L} L_{ij}[n] + V_L \sum W_{ijkl} Y_{kl}[n-1] \quad (9)$$

$$U_{ij}[n] = F_{ij}[n](1 + \beta L_{ij}[n]) \quad (10)$$

$$E_{ij}[n] = e^{-\alpha E} E_{ij}[n-1] + V_E Y_{ij}[n-1] \quad (11)$$

$$Y_{ij}[n] = \begin{cases} 1, & \text{si } U_{ij}[n] > E_{ij}[n] \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (12)$$

Donde la imagen de entrada S_{ij} es previamente normalizada en el rango dinámico de $[0,1]$ a partir de la ecuación (13), donde I representa la imagen de entrada sin modificar:

$$S = \left(\frac{I - \min(I)}{\max(I) - \min(I)} \right) + \varepsilon \quad (13)$$

Donde:

$$\varepsilon = \frac{1}{255} \quad (14)$$

Donde ε es para asegurar que todas las neuronas puedan ser alcanzadas por el umbral dinámico $E_{ij}[n]$, esto debido a cuando en la imagen se encuentran un conjunto de pixeles en valor 0, estos pixeles no pueden ser activados al no ser alcanzados por el umbral dinámico debido a que este estará constantemente disminuyendo acercándose a cero, pero no alcanzándolo. Eventualmente estos pixeles con valor 0 serán alcanzados por la onda expansiva de la función de enlace, pero dependiendo del tamaño del área esto puede tomar suficientes iteraciones como para hacer inservible la información almacenada en la matriz de tiempo.

El potencial de membrana V_F de la función de alimentación representa el impacto que la imagen de entrada S_{ij} tendrá sobre la función de activación interna $U_{ij}[n]$, en el modelo SPCNN original (Deng et al., 2019) V_F es omitido del modelo por tal motivo en SPCNN original es igual a $V_F = 1$, no obstante, cuando $V_F = 1$, las imágenes oscuras con áreas iluminadas pueden verse afectadas cuando se genera la Matriz de Tiempo por lo cual se establece en un valor menor a 1. Por lo tanto, en el



modelo propuesto el potencial de membrana V_F es introducido y este valor es calculado por las ecuaciones (15) y (16).

$$v_f = \frac{\sum \log(s+\varepsilon)}{MN} \quad (15)$$

$$V_F = 1 - \left(\frac{v_f - \min(v_f)}{\max(v_f) - \min(v_f)} \right) \quad (16)$$

Donde MN representa el total de pixeles de la imagen. La Matriz de Tiempo generada por una PCNN tiene un comportamiento similar a la función logarítmica (Zhan, Shi, et al., 2016) por lo cual cuando la imagen presenta poca iluminación, el valor resultante será menor haciendo que V_F tenga un mayor valor, por lo tanto tendrá un mayor impacto la imagen de entrada ayudando a la activación de las neuronas. $e^{-\alpha_L L_{ij}[n]}$ se utiliza para almacenar una memoria de las activaciones de las neuronas vecinas ayudando a la activación cuando el contraste es alto.

De acuerdo con (Deng et al., 2019) es posible determinar el número de iteraciones necesarias para llenar la matriz de tiempo, por lo tanto también se puede ajustar el número de interacciones que la SPCNN tendrá. Por lo tanto, $e^{-\alpha_L}$ esta dado por la ecuación (17).

$$\alpha_L = \frac{1}{it} \log(255) \quad (17)$$

Donde it representa el número de iteraciones que se necesitan, en el modelo propuesto it es establecido en 72, tanto α_L y α_E se mantienen igual, por lo tanto: $e^{-\alpha_L} = 0.925925$ y $e^{-\alpha_E} = 0.925925$. V_E se establece en 1000000 esto para asegurar que las neuronas se activen sólo una vez (Zhan, Teng, et al., 2016)(Ranganath & Kuntimad, 1999), VL y B se establecen en 1.

Utilizando la matriz de tiempo generada, ahora considerada como un mapa de iluminación, esta es normaliza al rango [0,1] utilizando la ecuación (13) para obtener la matriz de tiempo normalizada MT, posteriormente utilizando la matriz de tiempo y la imagen de entrada previamente normalizada por la misma ecuación (13), se aplica las ecuaciones (18) y (19) para obtener la imagen mejorada.

$$\widehat{IN} = MT * S \quad (18)$$

$$\hat{I} = \frac{\widehat{IN} - \min(\widehat{IN})}{\max(\widehat{IN}) - \min(\widehat{IN})} (L - 1) \quad (19)$$

Donde L representa el número de intensidades de la imagen, en este caso equivale a los 256 niveles intensidad.

El modelo propuesto trabaja sobre un único canal, por tal motivo para mejorar imágenes a color, se utiliza el modelo RGB separando los canales de color y aplicando las ecuaciones del modelo propuesto, obteniendo de esta manera en lugar de $\hat{I}$ de la ecuación (19), se obtendrían tres canales distintos, $\hat{I}_R$, $\hat{I}_G$ y $\hat{I}_B$. Estos canales finalmente son unidos para generar la imagen a color mejorada. No obstante, una vez obtenida la matriz de

tiempo para ser normalizada utilizando la ecuación (13), solamente funcionaria si se desea mejorar imágenes en escala de grises o utilizando un modelo de color con un canal de iluminación como HSV, pero para utilizar el modelo de color RGB por el cual se realizaron las experimentaciones en este artículo, es necesario hacer la normalización considerando el valor máximo no del canal que se trabaja, sino más bien del valor máximo de los tres canales RGB como se muestran en las ecuaciones (20), (21) y (22) la normalización de la matriz de tiempo.

$$MIN = \min(MT_R, MT_G, MT_B) \quad (20)$$

$$MAX = \max(MT_R, MT_G, MT_B) \quad (21)$$

$$MT_{RGB} = \left(\frac{I_{RGB} - MIN}{MAX - MIN} \right) + \varepsilon \quad (22)$$

Donde MT_R , MT_G y MT_B representan las matrices de tiempo de cada canal del modelo RGB. De esta manera se asegura que no se pierda la proporción de color que hay entre los tres canales RGB, de lo contrario la imagen resultante estaría sesgada a tonos de grises.

IV. CRITERIOS DE MEDIDA

Los resultados fueron medidos utilizando las métricas:

Peak Signal-to-Noise Ratio PSNR (Wang et al., 2004): Representa la relación entre la señal máxima y la intensidad de ruido y Error Cuadrático Medio MSE que están dadas por las ecuaciones (23) y (24)

$$PSNR = 10 * \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) \quad (23)$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (x_{ij} - y_{ij})^2 \quad (24)$$

Donde MAX está representado por la intensidad máxima de la imagen, regularmente 255. MSE representa al error cuadrático medio, x_{ij} y y_{ij} representan los pixeles de la imagen ideal y la imagen medida respectivamente, MN es la cantidad de pixeles en la imagen.

Structural Similarity SSIM (Wang et al., 2004): Representa la medida de similitud entre 2 imágenes y está dada por la ecuación (25).

$$SSIM = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (25)$$

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

V. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Para realizar las experimentaciones se utilizó el *dataset* BreakHis (Spanhol et al., 2016), las cuales fueron oscurecidas



con la técnica de desplazamiento del histograma con un desplazamiento de -60, -120 y -180 aplicándolo sobre el canal de iluminación V del modelo de color HSV y finalmente regresando la imagen al modelo RGB. Con esto se obtienen tres grupos de imágenes en diferentes intensidades de iluminación siendo nivel 1 el menos afectado y nivel 3 el más afectado, por lo tanto, el número final de imágenes utilizadas fueron 600, 200 por cada nivel de intensidad. Cuando la matriz de pesos es llenada, en promedio suele tomar 70 iteraciones por lo tanto el rango dinámico de la matriz de tiempo es de [1,70] por lo cual es necesario normalizarla a rango de [0,1] así como también normalizar la imagen de entrada S_{ij} .

La matriz de pesos sinápticos como se muestra en la ecuación (6) puede causar un efecto onda que puede ser notorio al final, esto debido al impacto que ejerce las neuronas activadas con las neuronas vecinas (Zhan et al., 2017), provocando un efecto en cadena creando un efecto gradiente en las zonas más brillantes. No obstante, para solucionar este efecto los valores de la matriz de pesos sinápticos son disminuidos equitativamente dividiendo todos los valores entre 5, por otra parte, es posible conseguir este efecto dividiendo entre 5 el potencial de membrana V_L de la función de enlace.

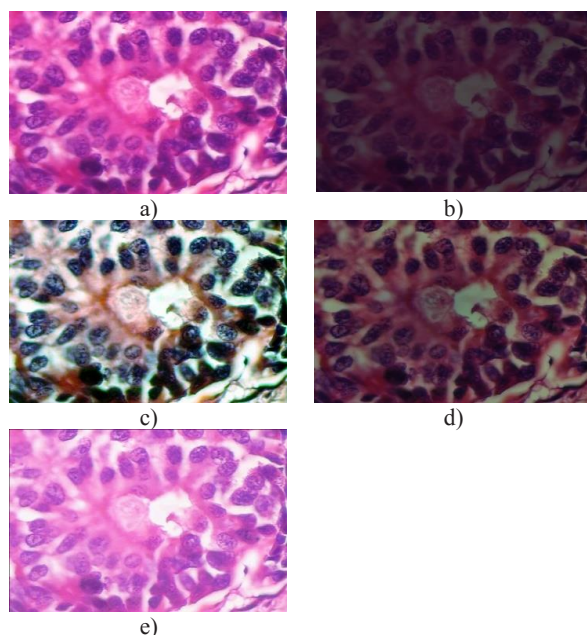


Fig. 1 Comparación subjetiva nivel 3 de oscuridad. a) Original, b) Oscura, c) EH, d) CLAHE, e) SPCNN propuesto

Aplicando el modelo SPCNN propuesto a cada uno de los canales RGB se obtienen las tres matrices de tiempo correspondiente a cada canal MT_R , MT_G y MT_B , estas matrices son normalizadas aplicando la ecuación (22) y finalmente unidas nuevamente para generar la imagen mejorada.

De manera subjetiva se puede comparar visualmente mediante la Fig. 1 donde se puede apreciar que EH llega a distorsionar los colores y CLAHE no logra recuperar adecuadamente la iluminación de la imagen, sin embargo, SPCNN propuesto si logra recuperar gran parte de la iluminación además de preservar mejor los colores a diferencia de EH. Por otra parte, de manera más objetiva como se muestra en la Fig. 2, obteniendo el histograma de las imágenes mostradas en la Fig. 1, se puede apreciar que la imagen de referencia a) tiene un histograma más equilibrado, por otra parte, b) su histograma está completamente cargado a la izquierda haciendo que el concentración de pixeles oscuros predominen, sin embargo, EH d) genera un histograma más uniforme pero de manera visual lo colores pueden comprometerse, no obstante CLAHE no logra crear una adecuada ecualización y es por ello que de manera visual CLAHE es más oscuro, finalmente SPCNN propuesto e), donde el histograma se ve más cargado a la derecha pero manteniendo una distribución más equivalente al histograma generado por EH o CLAHE.

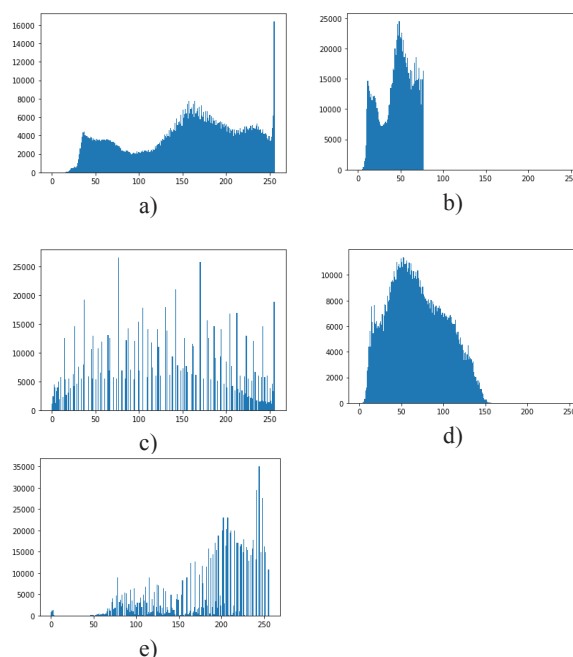


Fig. 2 Comparación de histogramas. a) Original, b) Oscura, c) EH, d) CLAHE, e) SPCNN

Ajustando el potencial de membrana V_F , es posible ajustar la distribución del histograma, utilizando las ecuaciones (15) y (16) se consigue una mejora global, no obstante, a pesar de funcionar en la mayoría de imágenes, en algunas imágenes como la que se muestra en la Fig. 1 no logra obtener una distribución completamente uniforme, en este caso, V_F es establecido en 0.6761 por las ecuaciones (15) y (16).

En la Fig. 3 se muestra una comparación entre tres valores distintos de V_F en donde para este caso en específico, utilizando la imagen de la Fig. 1 cuando V_F es igual a 1 es cuando obtiene un histograma más cargado a la derecha, en este caso, la imagen está cargada más hacia un color pero en imágenes con una buena distribución de colores se consigue un histograma más distribuido, por otra parte si tiene un valor bajo puede ocurrir que recupere adecuadamente la iluminación de la imagen o como en este caso el histograma no tiene una completa distribución

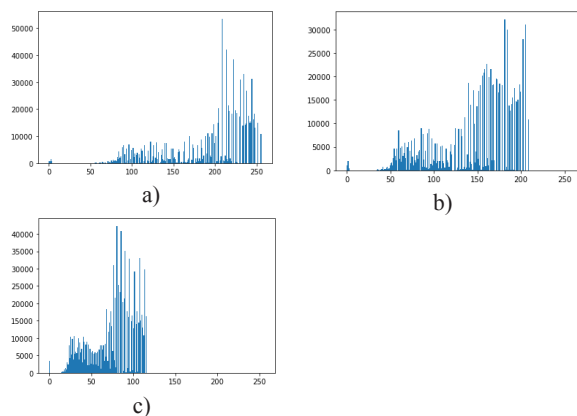


Fig. 3 Comparación de histogramas a través de diferentes valores de V_F . a) $V_F = 1$, b) $V_F = 0.5$, c) $V_F = 0.1$

Para este artículo, el parámetro de it de la ecuación (17) fue establecido en 72 después de realizar varias experimentaciones subjetivas y evaluando los resultados dados por las métricas y los resultados visuales no hay una gran diferencia como se muestra en la Fig. 4. No obstante, establecer it en 255 ofrece un histograma más distribuido, pero únicamente cuando los detalles a nivel de pequeñas diferencias entre los valores de los píxeles son importantes, sin embargo, el tiempo necesario es alrededor de tres veces más, por otra parte, establecer it en 72 además de ayudar en el tiempo es una buena alternativa si la imagen será impresa.

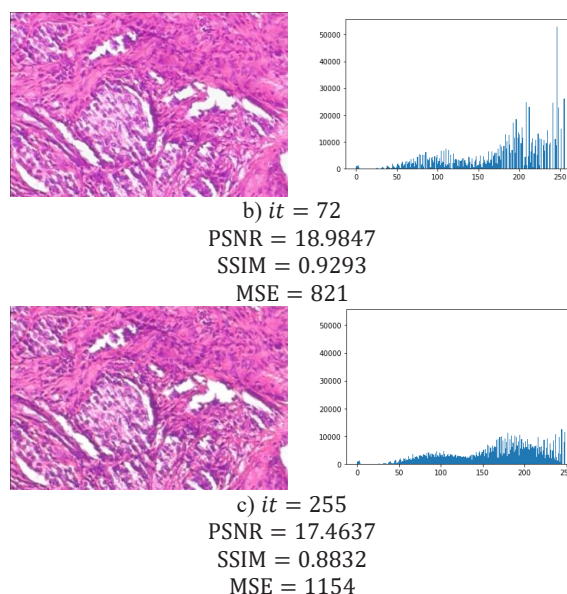
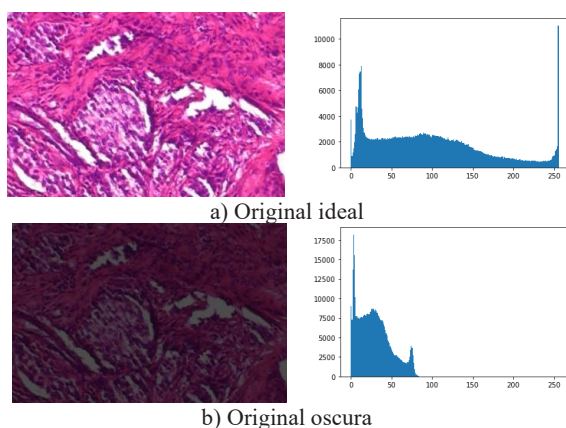


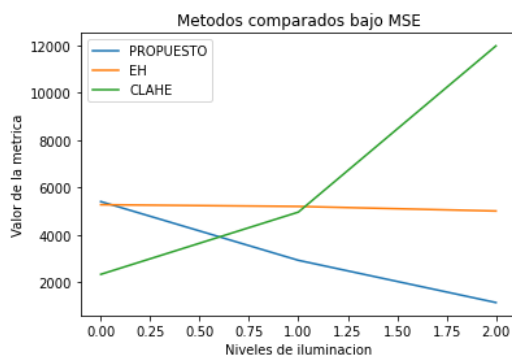
Fig. 4 Comparación entre diferentes valores de it

En TABLA 1, se muestran los resultados obtenidos y promediados de las 400 imágenes de nivel de intensidad 1 y 2, esto fue determinado en estos 2 niveles omitiendo el uno por tener pobres resultados, en esta versión se tiene este problema, sin embargo, en las versiones futuras se planea superar esta limitante para mantener resultados uniformes en imágenes con iluminación no tan reducida. En esta tabla se puede observar que SPCNN gana sobre las demás técnicas de manera objetiva exceptuando a CLAHE que logra superar en la métrica SSIM. Esto se debe a parámetro V_F que se establece de manera global para todas las neuronas provocando que en los canales de color con poco impacto no tenga la relevancia necesaria. No obstante, cuando las imágenes poseen una distribución de colores más uniformes el valor global no suele ser un inconveniente.

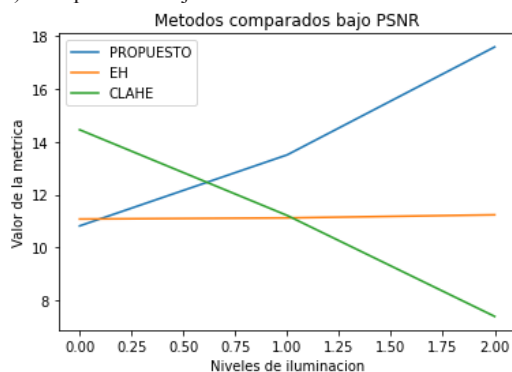
TABLA 1. RESULTADOS OBTENIDOS

	SPCNN	EH	CLAHE
PSNR	15.3881	11.1295	11.3276
SSIM	0.7678	0.6351	0.8075
MSE	2159.8472	5167.6035	5827.9688

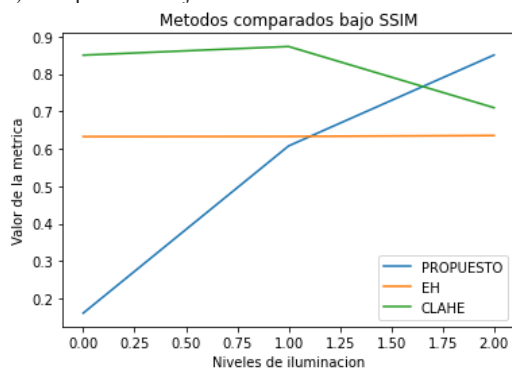
Como se muestra en la Fig. 1, EH distorsiona los colores mientras de CLAHE de manera objetiva no logra aclarar la imagen lo suficiente. Así mismo, SPCNN puede diluir la intensidad de los colores. Además, EH puede perder información especialmente en áreas brillantes eliminándolas completamente, aunque CLAHE no hace esto debido a que la mejora la realiza de manera local a diferencia de EH.



a) Comparación bajo la métrica MSE



b) Comparación bajo la métrica PSNR



c) Comparación bajo la métrica SSIM

Fig. 5 Comparación en promedio de diferentes niveles de iluminación bajo las diferentes metrics

SPCNN obtiene mejores resultados cuando la imagen es más oscura, esto debido al impacto que tiene V_F a diferencia de EH y CLAHE que mejoran sus resultados a más clara este la imagen. Como se muestra en la Fig. 5, a medida que la imagen se oscurece más, el modelo propuesto mejora sus resultados, sin embargo, en nivel 1 de iluminación sus resultados son deficientes, esta limitante se planea solucionar en versiones futuras.

De acuerdo con la métrica MSE, SPCNN ofrece imágenes que más se asemejan a la imagen original y CLAHE es la que menos se asemeja. SPCNN obtuvo una mejora del 139% respecto a EH en la métrica de MSE y un 169% respecto a CLAHE. Bajo la métrica SSIM, SPCNN y CLAHE tienen un resultado similar siendo únicamente un 5% superior CLAHE y SPCNN es un 20% mejor respecto a EH. Respecto a la métrica PSNR, el modelo propuesto es un 38% mejor respecto a EH y CLAHE y estos dos presentan resultados similares.

Cabe destacar que las medidas de la TABLA 1 son promediando los 3 conjuntos de imágenes de diferentes intensidades de iluminación puesto que basándose únicamente en el nivel 1 de oscuridad con un desplazamiento del histograma de -60, CLAHE logra ganar a SPCNN en un 98% y un 17% bajo las métricas MSE y PSNR respectivamente.

VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Principalmente es necesario hacer la aclaración de que los resultados aquí presentados son resultados preliminares de un proyecto de tesis, en esta versión se introduce el modelo propuesto en desarrollo y los resultados obtenidos no necesariamente representan los resultados esperados en el proyecto final, por lo tanto, para considerar resultados finales se incorporará lo descrito en trabajo a futuro que se muestra más adelante. No obstante, SPCNN propuesto obtiene buenos resultados a mayor nivel de oscuridad siempre que la imagen no esté completamente arruinada, de momento en estas imágenes puede verse afectado cuando el color esta sesgado hacia un único color. Cuando se mide en promedio, SPCNN obtiene los mejores resultados con MSE y PSNR y en algunos casos considerablemente superiores, pero cuando se mide únicamente con imágenes con un desplazamiento del -60 o el nivel 1 de oscuridad, CLAHE ofrece mejores resultados. Esto último puede ser solucionado ajustando V_F para que funcione de manera local a diferencia de cómo funciona actualmente. SPCNN logra mantener las zonas más iluminadas sin afectarlas siempre que no sean demasiado brillantes puesto que similar a EH puede llegar a borrar información si la disparidad de iluminación es muy grande o cuando hay zonas con muy poca iluminación y zonas con gran iluminación, la zona iluminada puede perder la información que contenga. Como trabajo a futuro se planea introducir más métricas además para solucionar el problema en este tipo de imágenes se planea utilizar un potencial de membrana de la función de alimentación V_F que sea dinámico, para evitar el problema con imágenes como las estudiadas en este artículo.

AGRADECIMIENTOS

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



REFERENCIAS

- Aguilar, K. S., Mejía, M., Magadán, A., & Reyes, G. (2019). *Red Neuronal con Matriz de Tiempo para Mejoramiento de Imágenes*.
- Alenezi, F., & Salari, E. (2019). Novel Technique for Improved Texture and Information Content of Fused Medical Images. *2018 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, ISSPIT 2018*, 348–353. <https://doi.org/10.1109/ISSPIT.2018.8642629>
- Bonnier, N. (2010). Attributes of image quality for color prints. *Journal of Electronic Imaging*, 19(1), 011016. <https://doi.org/10.1117/1.3277145>
- Cardenas, S. Y., Mejía-Lavalle, M., Azuela, H. S., & Pardo, E. C. (2015). Pulse-Coupled Neural Networks applied to Human Brain Image Processing. *Proceedings - 2014 IEEE International Conference on Mechatronics, Electronics, and Automotive Engineering, ICMEAE 2014*, 60–65. <https://doi.org/10.1109/ICMEAE.2014.46>
- Chen, Y., Park, S. K., Ma, Y., & Ala, R. (2011). A new automatic parameter setting method of a simplified PCNN for image segmentation. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 22(6), 880–892. <https://doi.org/10.1109/TNN.2011.2128880>
- Deng, X., Yan, C., & Ma, Y. (2019). PCNN Mechanism and Its Parameter Settings. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, PP, 1–14. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2019.2905113>
- Eckhorn, R., Reitboeck, H. J., Arndt, M., & Dicke, P. (1990). Feature Linking via Synchronization among Distributed Assemblies: Simulations of Results from Cat Visual Cortex. *Neural Computation*, 2(3), 293–307. <https://doi.org/10.1162/neco.1990.2.3.293>
- Huang, C., Tian, G., Lan, Y., Peng, Y., Ng, E. Y. K., Hao, Y., Cheng, Y., & Che, W. (2019). A New Pulse Coupled Neural Network (PCNN) for Brain Medical Image Fusion Empowered by Shuffled Frog Leaping Algorithm. *Frontiers in Neuroscience*, 13(March), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00210>
- Jena, M., & Mishra, S. (2018). Review of neural network techniques in the verge of image processing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 628, 345–361. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5272-9_33
- Johnson, J. L. (1994). Pulse-coupled neural nets: translation, rotation, scale, distortion, and intensity signal invariance for images. *Applied Optics*, 33(26), 6239. <https://doi.org/10.1364/ao.33.006239>
- Ma, Y., Zhan, K., & Wang, Z. (2010). *Applications of Pulse-Coupled Neural Networks*. Higher Education Press.
- Park, J. W., Lee, H., Kim, B., Kang, D. G., Jin, S. O., Kim, H., & Lee, H. J. (2019). A Low-Cost and High-Throughput FPGA Implementation of the Retinex Algorithm for Real-Time Video Enhancement. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, PP, 1–14. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2019.2936260>
- Pratt, W. K. (1994). Digital Image Processing. In *European Journal of Engineering Education* (Third Edit, Vol. 19, Issue 3). <https://doi.org/10.1080/03043799408928319>
- Ranganath, H. S., & Kuntimad, G. (1999). Object detection using pulse coupled neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 10(3), 615–620. <https://doi.org/10.1109/72.761720>
- Rangel, E. O., Mejía-lavalle, M., & Azuela, H. S. (2016). Uso de redes neuronales pulsantes para mejorar el filtrado de imágenes contaminadas con ruido Gaussiano Using Pulsed Neural Networks to Improve Filtering of Images Contaminated with Gaussian Noise. *Research in Computing Science*, 114, 45–58.
- Spanhol, F. A., Oliveira, L. S., Petitjean, C., & Heutte, L. (2016). A Dataset for Breast Cancer Histopathological Image Classification. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 63(7), 1455–1462. <https://doi.org/10.1109/TBME.2015.2496264>
- Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4), 600–612. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>
- Zhan, K., Shi, J., Teng, J., Li, Q., Wang, M., & Lu, F. (2017). Linking synaptic computation for image enhancement. *Neurocomputing*, 238, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.01.031>
- Zhan, K., Shi, J., Wang, H., Xie, Y., & Li, Q. (2016). Computational Mechanisms of Pulse-Coupled Neural Networks: A Comprehensive Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 24(3), 573–588. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9182-3>
- Zhan, K., Teng, J., Shi, J., Li, Q., & Wang, M. (2016). Feature-Linking Model for Image Enhancement. *Neural Computation*, 28, 1072–1100. https://doi.org/10.1162/NECO_a_00832
- Zhan, K., & Zhang, H. (2009). *New Spiking Cortical Model for Invariant Texture Retrieval and Image Processing*. 20(12), 1980–1986. <https://doi.org/10.1109/TNN.2009.2030585>
- Zheng, R., Guo, Q., Gao, C., & Yu, M. A. (2019). A hybrid contrast limited adaptive histogram equalization (clahe) for parathyroid ultrasonic image enhancement. *Chinese Control Conference, CCC, 2019-July*, 3577–3582. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2019.8866479>



Segmentación semántica de escenas interiores en una computadora embebida

Roberto Munguia-Silva* José Ruíz Ascencio**
Raúl Pinto Elías***

* TecNM / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
(e-mail: roberto.munguia19ca@cenidet.edu.mx).

** (e-mail: jose.ra@cenidet.tecnm.mx)

*** (e-mail: raul.pe@cenidet.tecnm.mx)

Resumen: La segmentación semántica de imágenes se ha estado utilizando en áreas como la robótica y la navegación autónoma de vehículos de calle para identificar obstáculos y rutas de navegación. Aunque se han presentado avances en esta tarea haciendo uso de arquitecturas de redes neuronales convolucionales, la mayoría de ellas requieren de un poder de cómputo considerablemente grande, lo que dificulta que puedan ser utilizadas en hardware con pocos recursos como lo son las computadoras embebidas SBC. Por lo anterior, en este trabajo se presenta una arquitectura de red para segmentación semántica de imágenes de escenarios interiores diseñada para ser utilizada en hardware embebido y funcionar en tiempo real. Los experimentos muestran que aunque existe una reducción en la velocidad de procesamiento, en términos de precisión se puede lograr un desempeño comparable con una arquitectura con mayores requerimientos de cómputo.

Keywords: CNN, U-Net, Segmentación semántica, SBC.

1. INTRODUCCIÓN

En el área de la robótica móvil, la navegación autónoma presenta un especial interés, ya que permite a los robots desempeñar tareas que dependan en menor medida de operadores externos. En este contexto, uno de los principales requerimientos es que el robot perciba el ambiente para tomar decisiones como puede ser el evitar obstáculos o dirigirse hacia puntos u objetos de interés Falanga et al. (2018); Jung et al. (2018). Esta adquisición de información se realiza principalmente por medio de sensores como pueden ser de proximidad, escáner láser o sensores de visión, siendo este último el que proporciona una mayor cantidad de información con respecto a su tamaño y costo comparado con los anteriores.

Una vez que el robot es capaz de adquirir información de su entorno, es necesario que sea interpretada y analizada para poder realizar con éxito las tareas que le sean asignadas. Haciendo uso de sensores visuales, utilizando técnicas de localización y mapeo simultáneo *SLAM*, es posible realizar una estimación de la posición del robot en un ambiente desconocido mientras se crea un mapa 3D. Con este mapa es posible para el robot navegar de manera segura y evitar obstáculos. Sin embargo, cuando se requiere que el robot reconozca o identifique objetos que le rodean, el mapa proporciona poca información de los elementos presentes en el escenario, por lo que es necesario una etapa adicional que permita al robot realizar dicha labor.

Tradicionalmente el análisis de imágenes se realizaba utilizando métodos que dependían de características manualmente elaboradas. Diferentes enfoques se han desarrollado con el objetivo de resolver esta tarea.

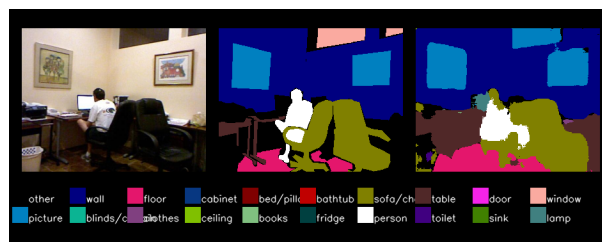


Fig. 1. Predicciones de segmentación semántica para una imagen en ambiente interior utilizando una CNN en hardware embebido.

Algunos de estos enfoques proponen identificar puntos destacados presentes en una imagen, como es el caso de esquinas o bordes donde hay cambios de contraste Dong-chen He and Li Wang (1990); Ong and Ma (2011); Shotton et al. (2006). Sin embargo, cuando los objetos presentan cambios en la orientación, los métodos tienden a fallar. Con los recientes avances en el poder de cómputo que brindan las unidades de procesamiento gráfico (*GPU*), se han aprovechado otros métodos que pretenden imitar el aprendizaje de los humanos para analizar y procesar imágenes Krizhevsky et al. (2012); Simonyan and Zisserman (2015). Debido al buen desempeño que han tenido en tareas como clasificación de imágenes, las redes neuronales convolucionales (*CNN*) se posicionan como una de las más utilizadas en los últimos años. A pesar de que la clasificación de imágenes es una tarea bien conocida en el área de la visión computacional, sólo proporciona información sobre el objeto que predomina en la imagen sin poder conocer su ubicación. Comparada



con la clasificación de imágenes, la tarea de segmentación semántica proporciona mayor información, ya que para todos los píxeles presentes en la imagen procesada es posible obtener su clasificación.

Para abordar este problema, diferentes sistemas basados en *CNN* se han propuesto capaces de identificar el grado de pertenencia de cada píxel en la imagen a diferentes clases a partir de sus características visuales Li and Kim (2019); Liu et al. (2020), Fig. 1. Una desventaja de estos sistemas, es su requerimiento de una gran cantidad de poder de procesamiento, además de conjuntos de datos compuestos por una gran cantidad de imágenes. Como consecuencia de esto, la mayoría de los sistemas no pueden ser utilizados en unidades de procesamiento embebidas limitando su uso en el área de la robótica móvil.

Por lo anterior, algunos trabajos se han especializado en el diseño de arquitecturas de redes con menor cantidad de requerimientos de poder de cómputo Mehta et al. (2018); Paszke et al. (2016), sin embargo, aún existen pocas alternativas que sean capaces de funcionar enteramente en una computadora embebida. Motivado por ello, en este trabajo se propone una arquitectura de red para segmentación semántica de imágenes en espacios interiores, completamente funcional en un hardware limitado como lo es una computadora embebida. Este tipo de arquitectura de red resulta útil para tareas como la navegación autónoma de robots en espacios interiores, ya que permite obtener información de los objetos presentes en el ambiente y ayudar en la toma de decisiones, además de que es posible utilizarla en robots sin necesidad de una unidad de procesamiento externa.

2. TRABAJO RELACIONADO

La segmentación semántica de imágenes es un problema activo de investigación en el área de la visión computacional, el cual consiste en asignar para cada píxel en una imagen su pertenencia a alguna de las clases previamente observadas. Trabajos recientes se enfocan principalmente en ambientes exteriores, como lo son los ambientes urbanos, un ejemplo de ellos es el conjunto de datos *Cityscapes* de Cordts et al. (2016) y *KITTI* Geiger et al. (2012). Esto se debe a que es utilizada para los automóviles autónomos, ya que, permiten que el sistema de navegación sea capaz de interpretar la información a partir de las imágenes y de este modo navegar de manera segura al conocer la ubicación de señalizaciones, peatones y demás vehículos Li and Kim (2019); Liu et al. (2020); Zhao et al. (2017).

Uno de los primeros trabajos que utilizaron *CNN* para segmentación semántica propuesto por Long et al. (2015) utiliza una arquitectura de red previamente entrenada con el conjunto de datos *Imagenet* Deng et al. (2009) para clasificación de imágenes. Posteriormente, A estas arquitecturas previamente entrenadas, se le sustituyeron las últimas capas de tipo *fully connected* por deconvoluciones, las cuales se utilizan para incrementar el tamaño del mapa de características, con esto, al final de la red se puede obtener una imagen del mismo tamaño que la imagen de entrada con anotaciones para cada píxel.

Otras arquitecturas basadas en *autoencoders*, se dividen en dos partes, la primera denominada como *encoder*, que es topológicamente idéntica a la red VGG16 de Simonyan and Zisserman (2015), la cual tiene la tarea de extraer características de la imagen de entrada. La segunda parte, llamada *decoder*, consiste en conjuntos de capas convolucionales seguidas por capas que incrementan el tamaño del mapa de características, de modo que al final del *decoder* se obtiene un mapa de características del tamaño de la imagen de entrada. Posteriormente, a la última capa le sigue una función de activación de tipo *Softmax* que clasifica cada uno de los píxeles del mapa final Badrinarayanan et al. (2017).

La red U-Net de Ronneberger et al. (2015), originalmente se diseñó para segmentar bordes de imágenes. Su principal contribución se encuentra en que, a pesar de ser una arquitectura de tipo *autoencoder* como la utilizada en SegNet Badrinarayanan et al. (2017), los autores proponen utilizar atajos entre las primeras capas convolucionales hacia las capas deconvolucionales, con esto, se logran recuperar características que fueron extraídas por las primeras capas y reutilizarlas en capas posteriores.

A pesar de los avances en este campo y el desarrollo de arquitecturas para resolver esta tarea, la mayoría de los modelos de redes dependen de una red previamente entrenada, lo cual consume una gran cantidad de recursos que no permiten que sean utilizadas en arquitecturas de computadora como las *SBC*. Algunos trabajos posteriores han presentado alternativas en el diseño de redes para segmentación semántica, entre las que se puede encontrar la propuesta por Paszke et al. (2016), que se diseñó con el objetivo de realizar segmentación semántica en tiempo real de manera eficiente. Al ser una arquitectura de red eficiente y requerir de menos capacidades de cómputo, es posible utilizarla en computadoras embebidas. Para lograr esto los autores diseñaron un módulo ENet, compuesto por tres capas convolucionales, la primera capa utiliza un filtro de 1×1 con el que se reduce la dimensionalidad, una capa convolucional principal y una capa con filtro 1×1 para expandir los mapas de características.

Trabajos como el de Mehta et al. (2018), al igual que ENet, la red fue diseñada para procesar imágenes en tiempo real. Los autores presentan un módulo compuesto por convoluciones dilatadas Yu and Koltun (2016), las cuales son capaces de captar un mayor campo receptivo comparado con las convoluciones normales, de este modo se pueden extraer características en un área más amplia. Estas convoluciones se realizan de manera factorizada y con diferentes niveles de dilatación, con lo cual se consigue reducir drásticamente los parámetros y del mismo modo, la capacidad de cómputo necesaria. Para reducir el efecto de malla producido por las convoluciones dilatadas, cada mapa de características es sumado de manera jerárquica al siguiente mapa de de características extraído por la siguiente convolución.

Otros trabajos presentan avances tanto en el diseño de arquitecturas de red Chen et al. (2018), como en la mejora en los resultados en las métricas de evaluación, sin embargo, son pocos los trabajos que recurren a conjuntos de datos de ambientes interiores para probar



su funcionamiento, por lo que los resultados corresponden a escenarios exteriores. Las imágenes de exteriores capturadas en un vehículo en movimiento en donde la cámara siempre apunta en el mismo ángulo y hacia el frente, los objetos de interés presentan pocas variaciones en el tamaño, orientación y ubicación espacial en la imagen. Por el contrario, en las escenas interiores los objetos presentes en las imágenes se encuentran en diferentes tamaños, orientaciones y formas, además que existen oclusiones entre objetos, lo que vuelve a los escenarios interiores particularmente difíciles, pudiendo considerar a la segmentación semántica de interiores como la tarea más desafiante para arquitecturas y métodos de visión para segmentación Badrinarayanan et al. (2017).

3. METODOLOGÍA

En este trabajo, para realizar la segmentación semántica de imágenes se diseñó una red *CNN*. Primeramente, se procedió a analizar los diferentes modelos de redes para segmentación semántica que se encuentran disponibles en la literatura. Posteriormente, de los conjuntos de datos mayormente utilizados se seleccionó uno que tuviera una cantidad suficiente de imágenes para permitir entrenar la red. Por último, se realizó el entrenamiento de la arquitectura de red con el conjunto de datos seleccionado.

3.1 Conjunto de datos para segmentación semántica

Se analizaron diferentes conjuntos de datos con objetos predominantemente pertenecientes a espacios interiores y que hayan sido utilizados en diferentes trabajos de segmentación semántica con *CNN*.

NYU Depth Dataset V2 Nathan Silberman and Fergus (2012)

Es un conjunto de datos que contiene 1449 imágenes *RGB-D* capturadas en espacios interiores utilizando un dispositivo Microsoft Kinect™. Provee además imágenes de referencia donde se etiqueta a cada pixel con la clase a la que pertenece dentro de un conjunto de 40 categorías. Está dividido en dos subconjuntos, uno para entrenamiento compuesto por 795 imágenes y otro para pruebas con 654 imágenes. Este conjunto de datos es de especial interés debido a que contiene además de la categoría persona, imágenes enteramente capturadas en espacios interiores y en escenarios diversos, entre los cuales se encuentran salones de clases, oficinas, comedores, entre otros.

SUN RGB-D: A RGB-D Scene Understanding Benchmark Suite Song et al. (2015)

Este conjunto de datos está compuesto por 10,355 imágenes *RGB-D*. Cada una de estas imágenes contiene anotaciones para tareas de segmentación semántica, detección de objetos en 2D y 3D. La cantidad de imágenes que contiene lo convierte en uno de los conjuntos de datos más grandes para las tareas de estimación de profundidad, segmentación semántica, detección de objetos y comprensión de escenarios.

De manera similar a *NYU Depth Dataset V2*, este conjunto de datos está completamente recolectado en espacios interiores, presentando aún mayor cantidad de

imágenes en comparación con el conjunto mencionado. Sin embargo, debido a que es de reciente creación, han sido pocos los trabajos encontrados que presenten resultados haciendo uso de él.

Cabe mencionar que aunque *NYU Depth Dataset V2* Nathan Silberman and Fergus (2012) contiene 1,449 imágenes con anotaciones, existen además secuencias de imágenes capturadas en ambientes interiores de las cuales se seleccionaron las imágenes que componen el conjunto con anotaciones. Este conjunto de datos se utilizará para tareas de prueba de la red entrenada.

3.2 Entrenamiento de la red

Para el entrenamiento, de la red se utilizó el conjunto *SUN RGB-D* Song et al. (2015), ya que contiene una mayor cantidad de imágenes. Es importante mencionar que al ser un conjunto de datos capturado en interiores, la distribución espacial, orientación y tamaño de los objetos presentes en las imágenes es variada, del mismo modo, también se presentan oclusiones entre los objetos, por lo que representa un reto el poder realizar una segmentación correcta Badrinarayanan et al. (2017). Otro importante rasgo a destacar es que las clases se encuentran desbalanceadas, siendo la clase persona la que presenta una menor cantidad de apariciones en las imágenes.

Inicialmente, para el entrenamiento se buscó reutilizar una arquitectura de red ya entrenada para ser utilizada en la sección correspondiente al *encoder*, sin embargo, se encontró que las arquitecturas más utilizadas como son DenseNet Huang et al. (2017), Inception Szegedy et al. (2015) y ResNet He et al. (2016), contienen una gran cantidad de parámetros, y no se ha encontrado trabajos en los cuales se demuestre que pueden ser utilizadas en computadoras *SBC*. Por esta razón el tipo de entrenamiento que se utilizó fue de tipo *end-to-end learning* Bojarski et al. (2016), esto gracias a que el conjunto de datos seleccionado es lo suficientemente grande. Aunque *SUN RGB-D* contiene una cantidad aceptable de imágenes, para el entrenamiento se empleó una técnica de aumento de datos, con la cual se realizan ciertas modificaciones a la imagen de entrada, como son cambios en el brillo, contraste, variaciones en los canales de color, entre otras.

4. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

El sistema en el que se realizaron los experimentos consta de una computadora embebida NVIDIA Jetson TX1 con procesador Quad-Core ARM® Cortex®-A57 MPCore 1.92Ghz, 4 GB DDR4 de memoria RAM y GPU 256-core NVIDIA Maxwell™. Esta computadora embebida es útil ya que en comparación con otros modelos disponibles en el mercado, cuenta con una GPU que permite acelerar el procesamiento de una red por medio de hardware GPU con un nivel de consumo energético menor al de un equipo de sobremesa. El entrenamiento de la red se realizó en una computadora con procesador Intel Core i7-6700 3.4 GHz con 24 GB DDR4 RAM y GPU NVIDIA GTX 1070 8 GB DDR5 y 1920-core.





Fig. 2. Resultado de pruebas realizadas con la *SBC* NVIDIA Jetson TX1. De izquierda a derecha: imagen de entrada a color, imagen etiquetada, salida de la red propuesta, imagen segmentada por arquitectura U-Net, resultados con ESPNet.

5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Los experimentos consistieron en medir la velocidad de procesamiento en cuadros por segundo (*FPS*) en la computadora embebida. Adicionalmente se comparó el desempeño, Tabla 1, en diferentes métricas, como son la media de intersección sobre la unión (*MIoU*) y la intersección sobre la unión con ponderación por frecuencia, con las reportadas por SegNet Badrinarayanan et al. (2017) y ENet Paszke et al. (2016).

Tabla 1. Resultados de evaluación de la arquitectura propuesta con las arquitecturas SegNet y ENet.

Modelo	FPS SBC	FPS PC	Parámetros (Millones)	Promedio de clases	MIoU
SegNet	1.3	14.6	29.46	35.6	26.3
ENet	21.1	135.4	0.364	32.6	19.7
Propuesta	14.1	158.7*	0.79	38.5	25.4

*: La GPU utilizada para éste experimento es diferente a la utilizada en los otros casos, presentando menos recursos de procesamiento.

Se puede notar que aunque la cantidad de parámetros influye en la velocidad de procesamiento, la red propuesta comparada con ENet obtiene mejores resultados en la MIOU e incluso se acercan a los reportados por SegNet. En donde se obtiene un mejor resultado que ambas redes es en la intersección ponderada, donde se mejoran los resultados de SegNet por 2.9%. En otro aspecto en el que se logró obtener un mejor desempeño es en la velocidad de procesamiento en una GPU de PC, donde se obtuvieron 158.7 FPS, es importante notar que la GPU utilizada para realizar las pruebas es de menor capacidad que la utilizada en SegNet y ENet, siendo una tarjeta NVIDIA GTX 1070 la utilizada en este trabajo y NVIDIA TITAN X la utilizada en los trabajos mencionados.

En la Fig. 2, se puede observar una comparación entre los diferentes modelos de red, puede apreciarse de manera cualitativa, que la red propuesta es capaz de identificar de mejor manera objetos aunque presenten oclusiones, o texturas similares entre ellos.

6. DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados presentados, se puede ver que la tarea de segmentación semántica se mantiene como un problema abierto, a pesar de los avances que se han hecho en el área. Esto se atribuye principalmente al nivel de complejidad que presentan los escenarios interiores en comparación con los exteriores. Sin embargo, esta tarea es de interés, ya que puede permitir que a partir del análisis del contenido de la imagen, un robot sea capaz de detectar y encontrar objetos que ha sido comisionado a buscar.

7. CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó una arquitectura de red basada en U-Net para segmentación semántica de imágenes capturadas en ambientes interiores diseñada para ser utilizada en hardware embebido con pocos recursos de cómputo. Los resultados muestran que la velocidad de procesamiento de la arquitectura en una computadora embebida se encuentra en el orden de los 14 cuadros por segundo, lo que permite que pueda ser utilizada en robots móviles como sistema de reconocimiento de ambientes interiores. Así mismo, ya que la red está compuesta por una cantidad de parámetros menor y una arquitectura más simplificada a las que actualmente obtienen mejores resultados, es posible utilizar esta arquitectura en conjunto con herramientas como SLAM para proporcionar mayor robustez a los algoritmos para navegación autónoma. Como trabajo futuro se pretende evaluar la posibilidad de combinar diferentes sistemas de navegación para realizar tareas de búsqueda en ambientes desconocidos.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a CONACYT, así como al Tecnológico Nacional de México / CENIDET.

REFERENCIAS

Badrinarayanan, V., Kendall, A., and Cipolla, R. (2017). Segnet: A deep convolutional encoder-decoder

architecture for image segmentation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 39(12), 2481–2495.

Bojarski, M., Del Testa, D., Dworakowski, D., Firner, B., Flepp, B., Goyal, P., Jackel, L.D., Monfort, M., Muller, U., Zhang, J., et al. (2016). End to end learning for self-driving cars. *arXiv preprint arXiv:1604.07316*.

Chen, L., Papandreou, G., Kokkinos, I., Murphy, K., and Yuille, A.L. (2018). Deeplab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected crfs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 40(4), 834–848. doi: 10.1109/TPAMI.2017.2699184.

Cordts, M., Omran, M., Ramos, S., Rehfeld, T., Enzweiler, M., Benenson, R., Franke, U., Roth, S., and Schiele, B. (2016). The cityscapes dataset for semantic urban scene understanding. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 3213–3223.

Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.J., Li, K., and Fei-Fei, L. (2009). Imagenet: A large-scale hierarchical image database. In *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 248–255. Ieee.

Dong-chen He and Li Wang (1990). Texture unit, texture spectrum, and texture analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(4), 509–512. doi: 10.1109/TGRS.1990.572934.

Falanga, D., Foehn, P., Lu, P., and Scaramuzza, D. (2018). Pampe: Perception-aware model predictive control for quadrotors. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 1–8. IEEE.

Geiger, A., Lenz, P., and Urtasun, R. (2012). Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite. In *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 3354–3361. doi:10.1109/CVPR.2012.6248074.

He, K., Zhang, X., Ren, S., and Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.

Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., and Weinberger, K.Q. (2017). Densely connected convolutional networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 4700–4708.

Jung, S., Hwang, S., Shin, H., and Shim, D.H. (2018). Perception, guidance, and navigation for indoor autonomous drone racing using deep learning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3), 2539–2544. doi: 10.1109/LRA.2018.2808368.

Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Hinton, G. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Neural Information Processing Systems*, 25. doi:10.1145/3065386.

Li, G. and Kim, J. (2019). Dabnet: Depth-wise asymmetric bottleneck for real-time semantic segmentation. In *British Machine Vision Conference*.

Liu, J., Zhou, Q., Qiang, Y., Kang, B., Wu, X., and Zheng, B. (2020). Fddwnet: A lightweight convolutional neural network for real-time semantic segmentation. In *ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2373–2377. IEEE.



- Long, J., Shelhamer, E., and Darrell, T. (2015). Fully convolutional networks for semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 3431–3440.
- Mehta, S., Rastegari, M., Caspi, A., Shapiro, L., and Hajishirzi, H. (2018). Espnet: Efficient spatial pyramid of dilated convolutions for semantic segmentation. In *Proceedings of the european conference on computer vision (ECCV)*, 552–568.
- Nathan Silberman, Derek Hoiem, P.K. and Fergus, R. (2012). Indoor segmentation and support inference from rgb-d images. In *ECCV*.
- Ong, H.T. and Ma, K. (2011). Semantic image segmentation using oriented pattern analysis. In *2011 8th International Conference on Information, Communications Signal Processing*, 1–4. doi: 10.1109/ICICS.2011.6173609.
- Paszke, A., Chaurasia, A., Kim, S., and Culurciello, E. (2016). Enet: A deep neural network architecture for real-time semantic segmentation. *arXiv preprint arXiv:1606.02147*.
- Ronneberger, O., Fischer, P., and Brox, T. (2015). U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention*, 234–241. Springer.
- Shotton, J., Winn, J., Rother, C., and Criminisi, A. (2006). Textonboost: Joint appearance, shape and context modeling for multi-class object recognition and segmentation. 1–15. doi:10.1007/11744023_1.
- Simonyan, K. and Zisserman, A. (2015). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. In *3rd International Conference on Learning Representations (ICLR)*. URL <http://arxiv.org/abs/1409.1556>.
- Song, S., Lichtenberg, S.P., and Xiao, J. (2015). Sun rgb-d: A rgb-d scene understanding benchmark suite. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 567–576.
- Szegedy, C., Wei Liu, Yangqing Jia, Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V., and Rabinovich, A. (2015). Going deeper with convolutions. In *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1–9. doi:10.1109/CVPR.2015.7298594.
- Yu, F. and Koltun, V. (2016). Multi-scale context aggregation by dilated convolutions. *ICLR 2016*.
- Zhao, H., Shi, J., Qi, X., Wang, X., and Jia, J. (2017). Pyramid scene parsing network. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2881–2890.



USO DE LAS TICS EN LA EDUCACIÓN ANTE LA PANDEMIA (COVID-19) ¿ESTAMOS PREPARADOS?

Blanca Lucía Pérez Guzmán*. Marisol Sánchez Flores**
Edgar Valdés Suárez *** Israel Bony Sandoval Bahena**** Laura Alicia Flores Durán*****

*Instituto Tecnológico de Tlalpan, (e-mail: blanca.pg@tlalpan.tecnm.mx)

**Colegio Williams de Cuernavaca (e-mail: msanchez@cwc.edu.mx)

*** Tecnológico Nacional de México (e-mail: d_difusion0101@tecnm.mx)

****Escuela Secundaria Técnica N°19(e-mail: sandoval@iebem.edu.mx)

*****Esc. Presidente Benito Juárez (email: lauralicia.flores@docentecoahuila.gob.mx)

Abstract: This “article” shows a look at the reality that many teachers live when talking about COVID-19 pandemic which caused some damage/drawbacks in distance education, the challenges they faced, as well as the obstacles that have been overcome and the mobilization of skills that were put into practice in order to put education at first place. It is carried out from a technical approach and with field work to analyze the situations that teachers and education in general have faced, not only in our country but at a global level; Likewise, the way in which teachers have lived the transition to distance education from face-face system. Giving evidence of the efforts that have been made and the results that have been obtained in this teaching-learning mode.

Keywords: COVID-19, pandemic, distance education, learning mode.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

A lo largo de la historia la educación ha sufrido grandes cambios los cuales han llevado a afrontar el proceso de enseñanza-aprendizaje desde diversas perspectivas sobre las nuevas metodologías y la calidad educativa.

Sin lugar a dudas al hablar de calidad educativa juega un papel muy importante el rol del profesor, así como las competencias que posee para llevar a cabo un buen desempeño docente.

Actualmente ante la situación de salud que azotó al mundo en el 2020, el COVID-19; se considera se deben abordar temas de investigación donde las TICS sean el protagonista de la facilidad de brindar acceso a la educación a los grupos más vulnerables, opciones, que ayuden a que la educación desde básica hasta superior en México.

1.2 ¿Por qué se plantea de esta forma?

La causa de la deserción de muchos estudiantes han sido la falta de instrumento tecnológico para poder tomar sus clases de forma virtual, así como la conectividad, no solo se trata de tener un equipo con acceso a internet o al radio, tv o diferentes medios por los cuales se han impartido clases a partir del mes de marzo que se inició con este cambio en la docencia y aprendizaje, sino brindar la conectividad, señal al alcance de todos. Hay zonas vulnerables como el estado de Guerrero donde

a pesar de tener medios móviles, en poblados alejados del centro del estado, solo una antena es la responsable de brindar señal telefónica, de internet, radio y tv, la cual al saturarse dificulta el acceso a su mayoría.

Según datos del TICómetro, diagnóstico de acceso y habilidades en el uso de TIC de la UNAM (DGTIC): En la generación 2019 del bachillerato el 16% de los estudiantes no tiene una computadora (PC o laptop) para estudiar desde casa. Si bien 95% tiene acceso a Internet, muchos lo tienen desde un teléfono celular.

2. TRABAJO DE CAMPO

2.1 Necesidad de uso de las TIC's

Ante el surgimiento del virus COVID-19, estudiantes, profesores y directivos de las diversas instituciones se han visto en la necesidad de hacer uso de los medios digitales para dar continuidad a la educación de niños, jóvenes y adultos, implementando y adecuando plataformas digitales, así como radio y televisión, sin embargo, han generado desafíos en el uso adecuado de las mismas, así como el marcado de las desigualdades sociales y económicas que existen en el país.

Los docentes deben contar con las habilidades necesarias para poder llevar a cabo sus actividades y poder fomentar en los alumnos las competencias necesarias para su aprendizaje, por



tanto es necesario un compromiso ético con su profesión, poseer un pensamiento crítico y reflexivo, estar en constante autoevaluación de su desempeño, participar activamente en cursos para desarrollar más habilidades y ser consciente de sus fortalezas, así como de sus áreas de oportunidad mostrando una mentalidad de crecimiento para poder seguir mejorando cada día.

“Para trabajar a distancia es necesario transformar muchísimas cosas que en presencia pueden funcionar, pero a distancia no. Por ejemplo, dar una clase donde solo se habla puede ser difícil de seguir para los estudiantes de manera virtual. Hay que diseñar actividades donde los estudiantes estén activos desde un punto de vista cognitivo y dónde se les pida que hagan y no solo que escuchen o vean” comenta la doctora Marina Kriscautzky Laxague, coordinadora de Tecnologías para la educación hábitat puma de la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación.

En la labor docente implica la adecuación de estrategias pedagógicas adaptables a la educación a distancia y claro, limitación de muchas personas del acceso a ella.

De acuerdo al extinto INEE en el ciclo escolar 2007-2008 la mitad de las primarias contaba con una computadora para uso educativo; para el 2013-2014 este porcentaje se redujo a 39.6%, y para el ciclo 2015.2016 llegó a 40.4%. En la educación secundaria, en el ciclo escolar 2007-2008, 71.5% del total de estas escuelas tenía una computadora para uso educativo; en el 2013-2014 el porcentaje bajó a 68.4% y se recuperó en el 2015-2016, al llegar a 70.1%. De acuerdo a los datos las condiciones en las escuelas no son las viables y ahora generar propuestas educativas haciendo uso de las TIC's es todo un enigma que tendrán que resolver maestros, alumnos y padres de familia.¹

Sin embargo, en una sociedad tan cambiante y en un mundo cada vez más globalizado el rol docente se ha visto modificado en diversas ocasiones, ¿Cómo es que los docentes se han adaptado a las innovaciones?, ¿Cómo homologar nuestro rol con las nuevas tendencias educativas?, ¿Qué actitud han mostrado los docentes ante la educación actual en México?, ¿Cómo el contexto impacta en el desempeño de los docentes?, estas son sólo algunas de las interrogantes que surgen al hablar de las transformaciones que han tenido que hacer los docentes para adaptarse a la realidad que vivimos en cuanto a la educación.

Por otro lado, la irrupción de las nuevas tecnologías ha provocado un cambio radical a la hora de acceder a la información. Esto, aplicado en el campo de la enseñanza o el aprendizaje, supone una modificación igual de drástica en el rol

del docente. Ahora, todo el contenido que deben aprender los alumnos está en la red, así que lo que debemos cuestionarnos es: ¿Cuál debe ser el papel de los docentes en el actual sistema de formación a distancia?

2.2 Educación a distancia

Comencemos por aclarar el concepto de educación a distancia, el cual se entiende como la **forma de estudio en la que el proceso de aprendizaje se desarrolla sin la existencia de un vínculo directo instructor-estudiante**, por tanto, sin tener que acudir sistemáticamente a un salón de clases, lo que posibilita el acceso al aprendizaje a todos aquellos que, por diferentes razones, no pueden asistir a los cursos de la modalidad presencial.

Establece la relación entre la Educación a Distancia y la presencial, a partir de la inclusión de los medios técnicos, para lograr así un proceso de enseñanza aprendizaje más abarcador.

El uso de herramientas de fácil uso y acceso como el correo electrónico o algunas redes sociales como Whatsapp o Facebook, son de gran utilidad para mantener la comunicación y compartir información, sin embargo, en zonas rurales, la carencia de energía eléctrica imposibilita la actividad del quehacer docente y del alumnado, orillando a la desertión.

De acuerdo con el INEGI (2019) 18.3 millones de viviendas (52.7% del total en México) cuentan con acceso a internet. La mayoría de viviendas que no cuentan con acceso (16.4 millones) corresponde a la sociedad con menores recursos, ubicada en los estados de Chiapas, Estado de México, Guanajuato, Jalisco, Oaxaca, Puebla y Veracruz.²

Disponibilidad y Uso de TIC

Indicadores sobre Disponibilidad y Uso de TIC	2015	2016	2017	2018	2019
Hogares con computadora como proporción del total de hogares	44.9	45.6	45.4	44.9	44.3
Hogares con conexión a Internet como proporción del total de hogares	39.2	47.0	50.9	52.9	56.4
Hogares con televisión como proporción del total de hogares	93.5	93.1	93.2	92.9	92.5
Hogares con televisión de paga como proporción del total de hogares	43.7	52.1	49.5	47.3	45.9
Usuarios de computadora como proporción de la población de seis años o más de edad	51.3	47.0	45.3	45.0	43.0
Usuarios de Internet como proporción de la población de seis años o más de edad	57.4	59.5	63.9	65.8	70.1
Usuarios de computadora que la usan como herramienta de apoyo escolar como proporción del total de usuarios de computadora	51.3	52.2	46.8	46.7	44.6
Usuarios de Internet que han realizado transacciones vía Internet como proporción del total de usuarios de Internet	12.8	14.7	20.4	23.7	27.2
Usuarios de Internet que acceden desde fuera del hogar como proporción del total de usuarios de Internet	29.1	20.5	16.7	13.4	10.7
Usuarios de teléfono celular como proporción de la población de seis años o más de edad	71.5	73.6	72.2	73.5	75.1

Fig. 1. Disponibilidad y uso de las TIC's en los hogares de México.

¹ INEE. (23 de Marzo de 2020). *Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación*. Obtenido de Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación: <https://www.inee.edu.mx/>

² INEGI. (29 de Diciembre de 2019). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía : <https://www.inegi.org.mx/temas/educacion/>



3. HALLAZGOS

3.1 Canales de información

En el intento de aportar instrumentos que faciliten el trabajo del docente en el ámbito virtual, la Secretaría de Educación en Coahuila a través del área de Informática, creó una aplicación en la cual los docentes tendremos un canal de comunicación abierta con los padres de familia, sin necesidad de compartir nuestros números telefónicos, esta es solo una de sus muchas funciones, entre ellas captura del Sisat, informes de evaluaciones entre las más importantes.

Actualmente, el mercado laboral no busca el mismo perfil profesional que hace algunos años atrás. En la actualidad demanda trabajadores que tengan entre sus competencias el trabajo en equipo, liderazgo, flexibilidad, formación continua, entre otras; habilidades que pueden adquirirse o perfeccionarse mediante las tecnologías de la información y la comunicación (TIC).³

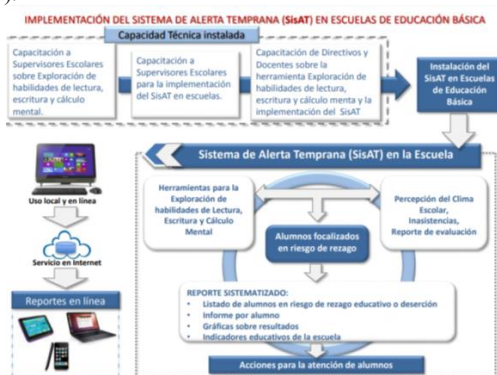


Fig.2. Implementación del Sistema de Alerta Temprana (SISAT)

La aplicación está disponible en ios y android, sin costo alguno, el panorama pintaba para ser una excelente opción para los docentes, se creó una gran expectativa y el día que se realizó la presentación mediante un en vivo en YouTube, el presentador de la aplicación tuvo una serie de problemas de conectividad que no le permitieron seguir el desarrollo de la presentación como debía ser, incluso tuvo que optar por utilizar los datos de su celular para terminar la presentación ya que los servidores de Secretaria De Educación de Coahuila fallaron, así mismo la aplicación no fue capaz de cargarse en el celular, instaló y desinstaló en varias ocasiones esperando lograr proseguir y no le permitía, pidió públicamente que no entraran los docentes al mismo tiempo a la aplicación, porque se describe todo esto,

para que nos percatamos que a pesar de los intentos hechos por ellos, la conectividad no está al 100% para dar buen funcionamiento, esto a pesar de ser una gran institución de la que depende toda la educación en Coahuila, qué podemos esperar de los hogares de nuestros alumnos.

3.2 Redes sociales como medios de comunicación

Después de lo sucedido, muchos docentes optamos por seguir en comunicación con los padres de familia y los alumnos a través de aplicaciones como whatsapp o facebook para evitar que se nos presenten estas situaciones en nuestro quehacer diario, dado que el desafío de educación a distancia es grande, tenemos que conseguir herramientas que faciliten el trabajo no que lo dificulten.

José Manuel Robles, coautor e investigador de la UNIR, explica que **para completar la última etapa se pueden tardar años e incluso puede que nunca se logre**. En conclusión, asegura, la incorporación de las TIC en la educación es inminente, siempre que ésta no suponga cambios radicales en los procesos establecidos.

4. CONCLUSIONES

Como en todos los países México no es la excepción la pandemia del nuevo coronavirus está dando un golpe duro en todos los sectores, pero sin embargo uno de los más vulnerables es la educación ya que se encuentra la población en aislamiento y distanciamiento social en esta nueva realidad es una cuarentena, por lo tanto, las TIC se volvieron el centro de la educación virtual, el teletrabajo, la telemedicina y hasta de ocio.

Las TIC's han brindado nuevas formas de ejecutar cada una de las tareas realizadas del ser humano y que han puesto en comunicación e interacción a millones de ciudadanos en el mundo. Durante esta emergencia se ha evidenciado las brechas de conectividad en el territorio nacional y socioeconómico, pero es claro que la apropiación de las tecnologías por parte de todos los sectores educativos ha significado un verdadero reto para la educación, por lo tanto hay una parte de oportunidad por innovar el papel docente.

4.1 El coronavirus y sus cambios

El coronavirus está cambiando instantáneamente la forma en que se imparte la educación, ya que la escuela y el hogar, ahora se convierten en el mismo lugar tras las necesarias regulaciones efectuadas.

Según la UNESCO, más de 861.7 millones de niños y jóvenes en 119 países se han visto afectados al tener que hacer frente a la pandemia global que nos ha sacudido este año.

3 -. (2020). La importancia de las TIC en el sector educación. octubre 30, 2020, de universia Sitio web: <https://www.universia.net/mx/actualidad/orientacion-academica/importancia-tic-sector-educacion-1129074.html>



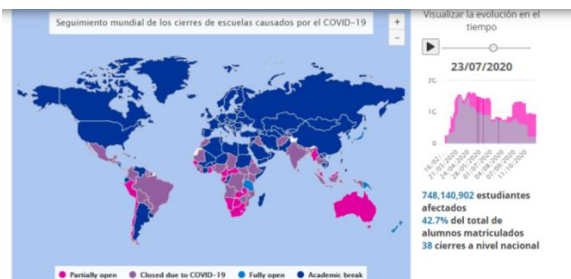


Fig 3. Impacto del COVID-19 en la Educación del mundo.

¿Realmente es la pandemia la que nos está poniendo en crisis o será la poca digitalización que existe en el ámbito educativo?

Las TIC's en la gestión educativa ante la pandemia han mostrado una gran importancia para apoyar la toma de decisiones de millones de personas que se encuentran en la educación, estas son nuevas estrategias de aprendizaje con sus alumnos.

Y es justo aquí en donde entran en juego nuestras competencias docentes, no podemos frenar la educación y es difícil parar nuestra vida, así que los docentes debemos poner nuestro esfuerzo para poder sacar adelante los aprendizajes esperados.

4.2 Áreas de oportunidad

Los docentes debemos anclar en nuestras fortalezas y trabajar en nuestras áreas de oportunidad, pero ¿Cómo lo podríamos hacer?

- Primero es perder miedo a la tecnología y animarnos a probar nuevas herramientas.
- Ver los cambios como oportunidades.
- Cultiva la perseverancia y la determinación.
- Autoevalúa tu desempeño
- Pide ayuda a alguien más experimentado.

El apoyo directo de las instituciones educativas es un parte de los eslabones en las mejoras educativas, ellos gestionan los recursos para que docentes lleven a cabo capacitaciones que ayuden a la familiarización de las TICS con sus asignaturas, es de entenderse que hay factores que son un obstáculo en la actualización del quehacer docente, como el poco uso de las tecnologías, la edad, la poca disposición por aprender, entre otros.

4.3 Necesidades

La comunidad estudiantil de cada nivel educativo genera una necesidad distinta, de acuerdo a las asignaturas que se imparten, no es lo mismo una clase de nivel básico como lo es kínder a una de nivel superior como una ingeniería, cada una tiene sus dificultades y necesidades, es trabajo del docente adaptar sus

planes de estudio a las distintas plataformas ya mencionadas para poder generar una clase dinámica y acorde al nivel que se necesite.

Conforme la necesidad crece, junto con ellas salen las ventajas como son:

1. La interacción con personas de otras partes del mundo, donde las barreras geográficas no existen.
2. La información se diversifica y se traduce a diferentes idiomas, llegando a más personas.
3. Fomento del autoaprendizaje, los cursos online o moocs son los aliados en la formación con el uso de las TICS, cada usuario puede estudiar a su propio ritmo y en el horario que le convenga, ahorrando tiempo y dinero.
4. Habilidades de investigación, se trabaja la habilidad de buscar información confiable en la red.
5. Proactividad, cada alumno es responsable de su aprendizaje y el docente toma el papel de guía en el proceso.
6. De igual manera podemos encontrar varias desventajas en el uso de estas herramientas como lo son:
7. Distractores, siendo el abuso de las redes sociales una de las principales en el proceso de aprendizaje.
8. Interacción Humana, es nula debido a que todo contacto es a través de web cam, chats de las plataformas o foros de intercambios de ideas.
9. No accesibilidad, desgraciadamente el acceso a las redes de comunicación no es para todos, aún contamos con zonas marginadas, en las que el internet es una realidad lejana e incluso la energía eléctrica, así como un dispositivo electrónico, lo cual impide el aprendizaje con el uso de las TICS.

4.4 Abuso de las nuevas tecnologías,

Organización Mundial de la Salud (OMS) reveló que una de cada cuatro personas padece trastornos asociados a las nuevas tecnologías, entre los que se destacan: síndrome del túnel carpiano, problemas de audición, de salud mental, sobrepeso, lesiones en el sistema nervioso, enfermedades visuales e incluso adicción.

Implementar el uso de las TICS en las aulas es un proceso que genera nuevas formas de adaptación, así como la planificación y la capacitación tanto de docentes como alumnos.

Sin embargo, somos docentes y llevamos en la vocación el espíritu innovador, siempre tratando de dar lo mejor de nosotros no importando las circunstancias, adaptando las metodologías, recursos y estrategias didácticas para nuestras



clases aunque éstas sean virtuales, tenemos el poder de traspasar una pantalla y así llegar al corazón de cada uno de los estudiantes con los que estamos; nuestra finalidad es generar aprendizajes, desarrollar habilidades y fomentar actitudes que lleven a cada uno de nuestros estudiantes a dar lo mejor de sí mismos, sin duda aún hay mucho por mejorar y hacer, pero si cada uno rompe con las barreras que limitan y anclamos en nuestras fortalezas entonces podremos y seremos capaces de llegar más lejos; los desafíos no son más que una prueba más para demostrar que un buen docente puede adaptarse al cambio, renovarse y buscar la mejor manera de enseñar; dejemos los “pero” para después es tiempo de accionar, el mundo está avanzando y cambiando constantemente y la educación debe hacerlo también para garantizar y seguir reafirmando que somos el medio idóneo para cambiar vidas, un entorno, una sociedad y movilizar un país.

La educación a distancia no es una visita, llegó para quedarse; aprovechemos y saquemos la mejor versión de nosotros mismos, sigamos preparándonos para ser guías que motiven a sus estudiantes, fomentemos el que sean aprendices de por vida y se sumen al cambio que el mundo necesita, como dijo Nelson Mandela “La educación es el arma más poderosa que puedes usar para cambiar el mundo”

REFERENCIAS

- UNESCO. (2019). La educación en situaciones de crisis. octubre 30, 2020, de UNESCO Sitio web: <https://es.unesco.org/themes/educacion-situaciones-crisis>
- Téllez Alarcía, Diego (2015). Plague Inc.: Pandemias, Videojuegos Y Enseñanza-Aprendizaje De Las Ciencias Sociales. Enseñanza de las Ciencias Sociales, (14),135-142.[fecha de Consulta 14 de Agosto de 2020].
- Sánchez Duarte, Esmeralda (2008). Las Tecnologías De Información Y Comunicación (Tic) Desde Una Perspectiva Social. Revista Electrónica Educare, XII (), 155-162. [Fecha de Consulta 14 de Agosto de 2020].
- Castro, Santiago, & Guzmán, Belkys, & Casado, Dayanara (2007). Las Tic en los procesos de enseñanza y aprendizaje. Lauros, 13(23),213-234.[fecha de Consulta 14 de Agosto de 2020]. ISSN: 1315-883X.
- López Domínguez, Hilda y Carmona Vázquez, Héctor (2017). El uso de las TIC y sus implicaciones en el rendimiento de los alumnos de bachillerato. Un primer acercamiento. La educación en la sociedad del conocimiento, 18 (1), 21-38. [Fecha de Consulta 14 de Agosto de 2020].
- Sierra Llorente, José y Bueno Giraldo, Isidro y Monroy Toro, Stella (2016). Análisis del uso de las tecnologías TIC por parte de los docentes de las Instituciones educativas de la ciudad de Riohacha. Omnia, 22 (2), 50-64. [Fecha de Consulta 14 de Agosto de 2020]. ISSN: 1315-8856.
- Henao-Kaffure, Liliana (2010). El concepto de pandemia: debate e implicaciones a propósito de la pandemia de influenza de 2009. Revista Gerencia y Políticas de Salud, 9(19),53-68.[fecha de Consulta 14 de Agosto de 2020]. ISSN: 1657-7027. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=545/54519045005>
- Secretaría de Educación Pública. (2019). ORIENTACIONES PARA EL ESTABLECIMIENTO DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA EN ESCUELAS DE EDUCACIÓN BÁSICA. octubre 30, 2020, de seslp Sitio web: http://www.seslp.gob.mx/consejostecnicos Escolares/2017/docto sdeconsulta/Manual_Orientaciones_SisAT.pdf
- Laura García. (2020). Coronavirus. Educación y uso de tecnologías en días de pandemia. Agosto 13, 2020, de Ciencia UNAM Sitio web: <http://ciencia.unam.mx/leer/1006/educacion-y-uso-de-tecnologias-en-dias-de-pandemia>
- Jesús Adriano. (2020). La brecha digital en la educación ante el COVID-19. Agosto 13, 2020, de Pluma invitada Sitio web: <https://www.educacionfutura.org/la-brecha-digital-en-la-educacion-ante-el-covid-19/>
- Aguilar, R. (2020). Sin televisión o internet en comunidades de Guerrero durante regreso a clases. octubre 30, 2020, de imagen radio Sitio web: <https://www.imagenradio.com.mx/sin-television-o-internet-en-comunidades-de-guerrero-durante-regreso-clases>
- Universidad de la Rioja. (2020). El uso de las redes sociales en Educación: consideraciones para sacarle el máximo partido. octubre 30, 2020, de UNIR Sitio web: <https://www.unir.net/educacion/revista/redes-sociales-educacion/>
- UNESCO. (2020). La educación en América Latina y el Caribe ante la COVID-19. octubre 30, 2020, de UNESCO Sitio web: <https://es.unesco.org/fieldoffice/santiago/covid-19-education-alc/medios>



Implementación Ágil de Servicios para Aplicaciones de Internet de las Cosas

Erick Infante-Covarrubias* Regino Infante-Covarrubias*
Javier Ortiz-Hernández*

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET
Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: {erick.infante19ca,
rinfante19ce, ortiz}@cenidet.edu.mx).

Resumen: El desarrollo de aplicaciones para el internet de las cosas tiene muchos desafíos que afrontar. El alto número de dispositivos del entorno físico que se conectan a la red producen cada vez una mayor cantidad de datos. Para la utilización de los datos es necesario el desarrollo ágil de servicios, el cual es una tarea difícil debido a la complejidad de los sistemas existentes. En este trabajo se muestra el uso de la plataforma de código abierto FIWARE para la implementación ágil de servicios que permitan explotar de manera adecuada los datos de ubicación en interiores para futuras aplicaciones del internet de las cosas.

Palabras Clave: Internet de las Cosas, IoT, FIWARE, NGSI

1. INTRODUCCIÓN

El internet de las cosas o IoT lo define (ITU, 2015) como “Una infraestructura global para la sociedad de la información que permite servicios avanzados interconectando elementos (físicos y virtuales) basados en tecnologías de la información y la comunicación existentes y en evolución”.

Debido a la alta complejidad de estos entornos y a la falta de estandarización en las tecnologías se utilizan una amplia variedad de arquitecturas para su desarrollo dependiendo del tipo de entorno de la aplicación.

Existen dos arquitecturas de uso general para desarrollos en aplicaciones de internet de las cosas (Al-Qaseemi, Almulhim, Almulhim, & Chaudhry, 2016):

La arquitectura de tres capas (Figura 1): la cual consiste en las capas de percepción, red y aplicación. La capa de percepción contiene los dispositivos que recopilan datos y son enviados a la capa de red. La capa de red es la responsable de interconectar la capa de percepción con la capa aplicación. La capa de aplicación recibe los datos y los procesa para proveer los servicios solicitados.

Por otro lado, la arquitectura de cinco capas (Figura 2): es una adecuación de la arquitectura de tres capas a la que se le adicionan las capas de Gateway y Middleware. La capa Gateway es la responsable del manejo de dispositivos IoT y de efectuar el intercambio de mensajes entre los dispositivos y los diversos subsistemas. Por su parte la capa Middleware proporciona un vínculo flexible para la comunicación entre el conjunto de los dispositivos y las aplicaciones.

La plataforma FIWARE es una plataforma abierta y estandarizada basada en código abierto para fomentar el desarrollo de servicios y aplicaciones inteligentes en diferentes dominios del internet de las cosas (Martínez, Ramírez, Estrada, & Torres, 2017). Proporciona un con-

junto de herramientas para integrar diferentes funcionalidades. Se define como un ecosistema de innovación para la creación de nuevas aplicaciones y servicios de Internet. Es especialmente útil para el desarrollo de aplicaciones Smart Cities, ya que asegura la interoperabilidad y la creación de modelos de datos estándar.

Uno de los componentes clave de FIWARE es el Orion Context Broker, ya que permite gestionar todo el ciclo de vida de la información de contexto, incluidas actualizaciones, consultas, registros y suscripciones. Por ejemplo, es posible efectuar suscripciones para recibir una notificación cuando algún elemento del contexto, que es de nuestro interés observar, ha cambiado (FIWARE, 2020b).

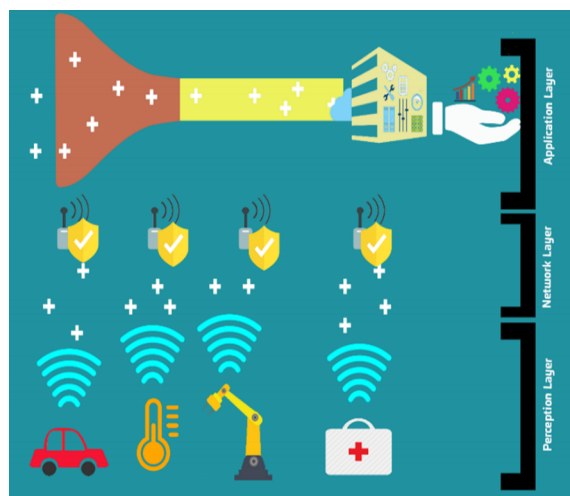


Fig. 1. Arquitectura de tres capas para IoT (Al-Qaseemi et al., 2016)

El objetivo de este trabajo es mostrar cómo una correcta implementación de servicios permite solventar los desafíos



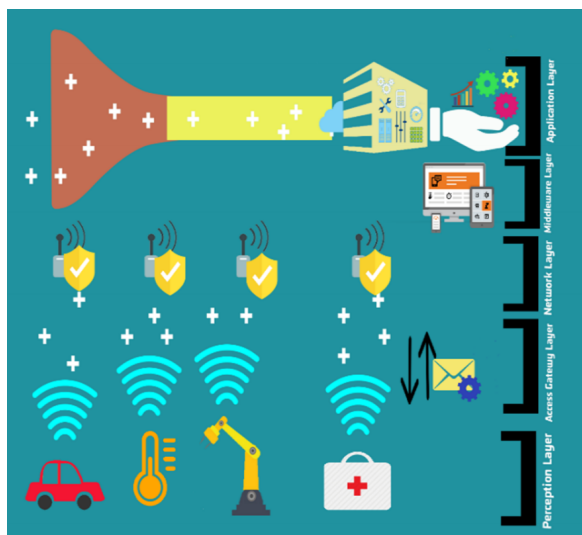


Fig. 2. Arquitectura de cinco capas para IoT (Al-Qaseemi et al., 2016)

de implementación en sistemas con diseños complejos. El artículo está estructurado de la siguiente manera: la Sección 2 describe los trabajos relacionados con la implementación de servicios y los desafíos a los que se enfrentan; en la Sección 3 se presenta una propuesta de metodología para la implementación ágil de servicios; la Sección 4 describe la implementación de la metodología utilizando la plataforma FIWARE mediante un desarrollo experimental; y la Sección 5 se presentan las conclusiones de este trabajo.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Existen diversas plataformas de código abierto que tienen como objetivo brindar soporte al desarrollo de aplicaciones del internet de las cosas (Zeinab & Elmustafa, 2017). En esta sección se presentan dos plataformas de código abierto, que se reconocen por sus características similares a la plataforma FIWARE y que brindan herramientas para la implementación de servicios para internet de las cosas.

- **DeviceHive.**- Es una plataforma escalable basada en microservicios. Cuenta con una API de administración de dispositivos en diferentes protocolos que le permite configurar y monitorear la conectividad de los dispositivos, controlarlos y analizar el comportamiento (DeviceHive, 2020). Proporciona los protocolos REST, MQTT y Websocket. DeviceHive emplea las mejores prácticas de diseño de software, presentando un enfoque de arquitectura orientada a servicios basada en contenedores administrada y orquestada por Kubernetes. Los componentes de DeviceHive están diseñados como pequeñas aplicaciones que se suscriben a las notificaciones de DeviceHive.
- **IoTivity.**- Es una implementación de referencia de código abierto del OCF Core Framework, permite una conectividad perfecta de dispositivo a dispositivo para abordar las necesidades emergentes de Internet de las cosas (IoTivity, 2020a). OCF Core Framework

proporciona una capa de comunicaciones versátil con la mejor seguridad de su clase para conectividad de dispositivo a dispositivo y dispositivo a la nube a través de IP. La interoperabilidad de IoT se logra mediante el uso de modelos de datos estándar. La característica principal de la plataforma es la habilidad de funcionar en diversas plataformas que utilizan el lenguaje C. Utiliza un conjunto de interfaces genéricas que permiten la implementación rápida en cualquier sistema operativo (IoTivity, 2020b).

- **Distributed Services Architecture.**- La arquitectura de servicios distribuidos (DSA) es una plataforma de IoT de código abierto que facilita la intercomunicación, la lógica y las aplicaciones de los dispositivos en cada capa de la infraestructura de Internet de las cosas (DSA, 2020). DSA tiene tres componentes principales; DSBroker, DSLink y nodeAPI. El DSBroker actúa como un enrutador para los flujos entrantes y salientes y los DSLinks que están conectados al DSBroker actúan como originadores de los flujos de datos. La función de un DSLink es conectarse a un DSBroker y anunciar los servicios disponibles a través del protocolo nodeAPI y responder a las solicitudes y suscripciones de nodeAPI. Si el propio DSLink necesita suscribirse a los datos del DSBroker, se establece otro canal de comunicación basado en la política de seguridad que permite al DSLink suscribirse a eventos que se originan en otros DSLinks. NodeAPI es el método de comunicación común para todos los nodos DSA y facilita todos los mensajes entre entidades de manera estandarizada.

Estas plataformas presentan características clave para la implementación de nuevos servicios, entre los cuales el sistema de notificaciones y suscripciones y los modelos estandarizados de datos que presentan DeviceHive y DSA. Estas herramientas permiten una comunicación estandarizada entre los dispositivos, garantizando la modularidad en los servicios, así como la reutilización de código para una implementación ágil.

Al ser plataformas de código abierto se garantiza un crecimiento colaborativo por parte de la comunidad de IoT. El desarrollo de proyectos IoT puede ser muy rápido debido a la cantidad de documentación disponible y a la cantidad de herramientas complementarias que ofrecen. Incluso, el ciclo de desarrollo y la corrección de errores es mucho más rápido, construyendo sistemas más robustos, confiables y escalables. En lo que respecta a plataformas comerciales, los principales proveedores, que en su mayoría empezaron ofreciendo servicios de almacenamiento de datos en la nube, ahora se están enfocando en el mundo del internet de las cosas (Pierleoni, Concetti, Belli, & Palma, 2020). Empresas como Google (Google Cloud IoT Core), Amazon (AWS IoT Core) y Microsoft (Azure IoT Hub) ofrecen plataformas listas para la implementación de aplicaciones del internet de las cosas.

- **Google Cloud IoT Core.**- Es un servicio completamente administrado que le permite conectar, administrar e ingerir datos de manera fácil y segura desde una gran diversidad de dispositivos. Cloud IoT Core proporciona una solución completa para recopilar, procesar, analizar y visualizar datos de IoT en tiempo



real, así como funcionalidades para soportar una eficiencia operativa (Google, 2020).

- **AWS IoT Core.**- Es una plataforma administrable que permite que los dispositivos conectados interactúen de manera fácil y segura con aplicaciones en la nube. AWS IoT Core puede conectar una cantidad ilimitada de dispositivos y emitir procesar y enrutar una cantidad ilimitada de mensajes a los puntos finales de AWS y a otros dispositivos, de manera confiable y segura. AWS IoT Core asegura que las aplicaciones pueden realizar un seguimiento y comunicarse con todos sus dispositivos, todo el tiempo, incluso cuando no están conectados (Amazon, 2020).
- **Azure IoT Hub.**- Es un servicio administrado, hospedado en la nube, que actúa como centro de mensajes para comunicaciones bidireccionales entre la aplicación de IoT y los dispositivos que administra. Las funcionalidades de IoT Hub le ayudan a compilar soluciones de IoT escalables y completas (Microsoft, 2020).

Consideramos que las plataformas comerciales existentes son una gran opción para desarrollos a mayor escala, debido al soporte que integran para el manejo de múltiples dispositivos, pero esto impacta en el aspecto económico del usuario a medida que la aplicación crece en la plataforma. Al ser una plataforma comercial las actualizaciones de seguridad del sistema general esta restringido a la disponibilidad de la empresa misma, siendo esto en ocasiones un proceso lento.

Para el desarrollo experimental planteado, consideramos la utilización de la plataforma de código abierto FIWARE como elemento principal para el sistema de localización en espacios cerrados. FIWARE combina la mayoría de las características mencionadas anteriormente, por lo cual será de gran ayuda para cumplir con el propósito de implementación de servicios y facilitar la modificabilidad de estos para futuros trabajos.

3. METODOLOGÍA

En este trabajo se propone un proceso metodológico para el desarrollo de aplicaciones IoT, que busca asegurar que las modificaciones y mejoras se realicen de la forma rápida y sin alterar la arquitectura del sistema.

La metodología propuesta consta de los siguientes pasos:

- Identificar un modelo de datos estandarizado que permita el intercambio de datos a través de diferentes aplicaciones y servicios (FIWARE, 2020a). Estos modelos cuentan con un identificador único y permiten el envío de múltiples datos de manera simultánea.
- Diseñar los componentes de los servicios en forma modular, separando claramente las partes que en algún futuro requieran una modificación. La idea es una transición rápida para implementar nuevos servicios. Los componentes tienen típicamente como función interactuar con los datos, con las vistas de las aplicaciones, efectuar validaciones de datos, etc.

- Pruebas de intercambio de componentes para asegurar la modificabilidad de los servicios y envío de datos simulados para asegurar su correcto envío.

En el primer punto de la metodología se plantea el uso de estos modelos de datos para asegurar una estandarización para la creación de nuevos servicios, así como para la comunicación con los dispositivos. Es importante señalar que se pueden usar más de uno modelo de datos si el servicio así lo requiere.

Para el segundo punto el hecho de manejar un servicio como la suma de múltiples microservicios facilita la modificabilidad y la reusabilidad de componentes para otros servicios, logrando así un desarrollo más fluido y disminuye la cantidad de errores que puedan cometerse.

El tercer punto de la metodología es muy importante ya que asegura un conjunto de pruebas rápidas para evaluar el funcionamiento y la modificabilidad de los servicios. En esta etapa se pueden aislar las fallas a nivel componente o servicio en general, sin la necesidad de investigar problemas en otras partes del sistema.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para poner a prueba la metodología mencionada se llevará a cabo un desarrollo experimental que permita la localización de personas mayores en el interior de una vivienda, con la finalidad de brindar información importante a las personas encargadas de su cuidado.

El beneficio que se espera es probar eficacia y la eficiencia en la implementación de servicios en combinación con las herramientas que ofrece la plataforma FIWARE. Los resultados se evaluarán con la implementación de dos servicios de características y aplicaciones similares. Uno de estos será desarrollado con el uso de la metodología y herramientas de FIWARE, mientras que el otro servicio se desarrollará de manera convencional de forma monolítica. Otro aspecto para evaluar será la facilidad para modificar el servicio midiendo el tiempo de modificación y la cantidad de líneas modificadas para el funcionamiento con las nuevas modificaciones.

La plataforma FIWARE define una arquitectura de habilitación de servicios de internet de las cosas para los escenarios que necesitan conectar dispositivos y otros puntos generadores de datos a componentes en la plataforma (Araujo, Mitra, Saguna, & Åhlund, 2019). Los habilitadores genéricos proporcionan implementaciones de código abierto que permiten a los desarrolladores aplicar estrategias de desarrollo ágiles (Carnevale, Celesti, Di Pietro, & Galletta, 2018; Carnevale, Galletta, Fazio, Celesti, & Villari, 2018). Los servicios y aplicaciones se pueden desarrollar fácilmente integrando habilitadores genéricos de código abierto con un enfoque ágil de ingeniería de software.

FIWARE tiene un conjunto de APIs que permiten el desarrollo fácil y rápido de aplicaciones para internet de las cosas. Utiliza la topología Publicar / Suscribirse que es útil para aplicaciones que requieren el monitoreo de variables como la que se utilizarán en el experimento. La Figura 3 muestra la vista lógica de la arquitectura ligera de sistemas de posicionamiento en interiores que permitirá la creación y modificación de servicios plug-and-play permitiendo una



mejor modularidad y escalabilidad para el desarrollo de servicios.

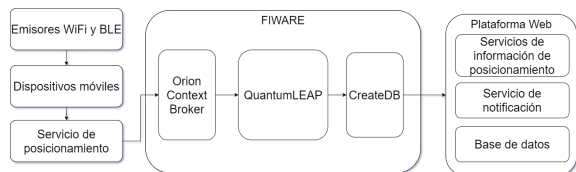


Fig. 3. Arquitectura ligera para sistemas de posicionamiento en interiores

Para este desarrollo experimental se planea utilizar la plataforma FIWARE, utilizando los siguientes componentes (Figura 4) (FIWARE, 2020c):

- IoT Agent para JSON.- Establece la comunicación entre los dispositivos IoT con el Orion Context Broker.
- Orion Context Broker.- Es una API Restful que permite realizar actualizaciones, consultas o suscribirse a cambios en la información de contexto.
- QuantumLeap.- Es un servicio REST para almacenar, consultar y recuperar datos espacio-temporales proporcionados por la información generada de los dispositivos IoT mediante el Orion Context Broker.
- CreateDB.- Es el motor de base de datos el cual es controlado por QuantumLeap.
- Grafana.- Herramienta de visualización de datos que se encuentran almacenados en CreateDB en escalas de tiempo.
- NGSI.- Interfaz de servicio de próxima generación (NGSI por sus siglas en inglés) es un protocolo para el manejo de información de contexto, su propósito es intercambiar información de contexto realizando dos actividades primordiales: consultas únicas para información de contexto y suscripciones para actualizaciones de información de contexto (y las notificaciones correspondientes).

Esquema de datos FIWARE

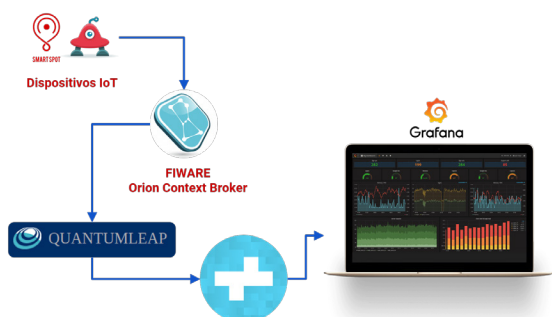


Fig. 4. Diagrama de flujo de datos entre los componentes de FIWARE

El desarrollo experimental consiste en una aplicación web que permita visualizar la última posición conocida de la



Fig. 5. Localización de usuario en el edificio

persona mayor de edad en un mapa del edificio similar a la presentada en la Figura 5, así como la recepción de mensajes de ayuda cuando el usuario presione un botón de alerta con datos de su posición y el mensaje deseado. La posición de la persona es proporcionada por una aplicación móvil en el teléfono de usuario, que calcula las distancias entre los emisores de señales BLE y Wifi cercanos, para después comparar los datos utilizando el método de fingerprinting y mandar la información al Orion Context Broker. Para fines prácticos en esta primera parte del desarrollo la posición de la persona será simulada mediante el envío de datos para probar el servicio de visualización del usuario.

Para el desarrollo de la plataforma web se utilizarán elementos Iframes en el menú de aplicaciones para evitar modificaciones mayores a futuro, lo cual permitirá un desarrollo modular de aplicaciones al ser tratadas cada aplicación o servicio como una página web externa. El uso de elementos modulares facilitará la modificación a futuro de las aplicaciones y servicios que sean implementados en esta plataforma.

En cuanto al desarrollo de la aplicación móvil, se plantea el uso de una metodología ágil, mediante el despliegue de una aplicación incremental en la cual se puedan añadir características de manera iterativa realizando el ciclo completo de desarrollo (planificar, diseñar, construir, probar y revisar) para los servicios de ubicación, notificación y emergencias que están planteados en este desarrollo experimental.



5. CONCLUSIONES

El desarrollo experimental propone una arquitectura capaz de implementar servicios de internet de las cosas de una manera ágil. Se esperan realizar las evaluaciones de los resultados con dos desarrolladores con un conocimiento similar para evitar así afectar los resultados del experimento.

La plataforma permitirá el desarrollo de futuros experimentos y aplicaciones para la localización de personas y objetos en espacios interiores. En particular, se espera que este tipo de aplicación sea de utilidad para el monitoreo de personas de edad avanzada en centros de cuidado especial, no solo para su monitoreo de su movilidad, también para aplicaciones de su actividad física.

REFERENCIAS

- Al-Qaseemi, S. A., Almulhim, H. A., Almulhim, M. F., & Chaudhry, S. R. (2016). Iot architecture challenges and issues: Lack of standardization. In *2016 future technologies conference (ftc)* (pp. 731–738).
- Amazon. (2020). *Aws iot core*. Retrieved 15-10-2020, from <https://aws.amazon.com/iot-core/?nc=snloc=1>
- Araujo, V., Mitra, K., Saguna, S., & Åhlund, C. (2019). Performance evaluation of fiware: A cloud-based iot platform for smart cities. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 132, 250–261.
- Carnevale, L., Celesti, A., Di Pietro, M., & Galletta, A. (2018). How to conceive future mobility services in smart cities according to the fiware frontiercities experience. *IEEE Cloud Computing*, 5(5), 25–36. doi: 10.1109/MCC.2018.053711664
- Carnevale, L., Galletta, A., Fazio, M., Celesti, A., & Vilari, M. (2018). Designing a fiware cloud solution for making your travel smoother: The fiware experience. In *2018 ieee 4th international conference on collaboration and internet computing (cic)* (p. 392–398). doi: 10.1109/CIC.2018.00059
- DeviceHive. (2020). *101 overview*. Retrieved 13-10-2020, from <https://docs.devicehive.com/docs/101-overview>
- DSA. (2020). *What is dsa?* Retrieved 12-10-2020, from <http://iot-dsa.org/get-started/how-dsa-works>
- FIWARE. (2020a). *Data models*. Retrieved 07-10-2020, from <https://www.fiware.org/developers/data-models/>
- FIWARE. (2020b). *Orion context broker*. Retrieved 19-10-2020, from <https://fiware-orion.readthedocs.io/en/master/>
- FIWARE. (2020c). *Plataforma fiware*. Retrieved 07-10-2020, from https://fiware-training.readthedocs.io/es_MX/latest/ecosistemaFIWARE/plataformaFIWARE/#catalogo-de-componentes-de-la-plataforma-fiware
- Google. (2020). *Cloud iot core*. Retrieved 15-10-2020, from <https://cloud.google.com/iot-core>
- IoTivity. (2020a). *Iotivity*. Retrieved 12-10-2020, from <https://iotivity.org/>
- IoTivity. (2020b). *Iotivity architecture*. Retrieved 12-10-2020, from <https://iotivity.org/about/iotivity-architecture>
- ITU. (2015). *Itu work on internet of things*. Retrieved 07-10-2020, from http://wireless.ictp.it/school_2015/presentations/secondweek/ITU-WORK-ON-IOT.pdf
- Martinez, A., Ramirez, F., Estrada, H., & Torres, L. A. (2017). Generic module for collecting data in smart cities. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W3*, 65–72. Retrieved from <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-4-W3/65/2017/> doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W3-65-2017
- Microsoft. (2020). *¿qué es azure iot hub?* Retrieved 15-10-2020, from <https://docs.microsoft.com/es-mx/azure/iot-hub/about-iot-hub>
- Pierleoni, P., Concetti, R., Belli, A., & Palma, L. (2020). Amazon, google and microsoft solutions for iot: Architectures and a performance comparison. *IEEE Access*, 8, 5455–5470. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2961511
- Zeinab, K. A. M., & Elmustafa, S. A. A. (2017). Internet of things applications, challenges and related future technologies. *World Scientific News*, 2(67), 126–148.



Comparativo de metodologías y estándares para el Internet de las Cosas

Guadalupe Guerrero Ruiz, Javier Ortiz-Hernández

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Departamento de Ciencias Computacionales

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

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 dominio de aplicación es cada vez más amplio. El abordaje de este tipo de proyectos es complejo ya que existen pocos estándares y metodologías específicas para su desarrollo, además de poca experiencia acerca de su adecuación a este tipo de aplicaciones. Incluso varias de estas metodologías en realidad son extensiones de algunas de las más utilizadas para proyectos de ingeniería de software. El objetivo de este trabajo es analizar el estado del arte referente a las metodologías y estándares más utilizados hasta el momento y demostrar su importancia para que el desarrollo de proyectos de Internet de las Cosas cumpla con las expectativas esperadas.

Palabras clave: Internet de las Cosas, Scrum, Kanban, SysML

1.-Introducción

En 2005 la ITU (International Telecommunication Union) publica el primer estudio sobre el internet de las cosas “Una nueva dimensión se ha agregado al mundo de las tecnologías de información y la comunicación (TIC): a cualquier hora, en cualquier lugar, ahora vamos a tener conectividad para cualquier cosa. Las conexiones se multiplican y crearán una nueva red dinámica de redes con redes, una Internet de las Cosas” o IoT [1]. La implementación del internet de las cosas se basa en modelos de conectividad, de 3, 4 o hasta 7 capas, dependiendo de la forma en que los dispositivos pueden conectarse para proporcionar valor al usuario.

Es sabido que utilizar metodologías apropiadas para el desarrollo de proyectos de software eleva su

porcentaje de éxito. En el caso de proyectos de IoT la mayoría de las metodologías que están siendo actualmente utilizadas son adaptaciones de esas mismas metodologías para proyectos de software. La literatura ofrece poca información acerca de metodologías específicas para IoT, solo adecuaciones basadas en metodologías ágiles como es el caso de Scrum o Kanban.

Este artículo pretende analizar por un lado las metodologías ágiles que están utilizando en el ámbito del IoT y por otro lado algunos estándares en cuanto al dominio del mismo.



2.- Conceptualización del Internet de las Cosas.

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 control de dispositivos, ahorro de tiempo, mejor toma de decisiones, entre otros, pero también tiene algunas desventajas en términos de seguridad ya que la información a menudo no se encuentra cifrada, además de problemas de incompatibilidad de los dispositivos con el resto del sistema debido a la falta de estandarización [2].

El IoT se caracteriza por la heterogeneidad de los dispositivos y los componentes del software, la falta de categorización de los grupos de interés asociados tanto al desarrollo de los proyectos como de los usuarios, además de la falta de metodologías ad hoc para el desarrollo de este tipo proyectos.

3.- Estudio comparativo de metodologías IoT.

En [3], se describe el ciclo de vida de un proyecto de IoT, el cual está constituido por las siguientes etapas concepto, desarrollo, producción, utilización, soporte y desmantelamiento. En la etapa de concepto se define el problema, cómo se espera que el sistema funcione desde el punto de vista del usuario o del operador, y cómo se especifican las necesidades y sus objetivos. Se explica que el ciclo de vida genérico que propone el estándar ISO/IEC/IEEE 15288:2015 se diferencia de otros debido a que pone mayor énfasis en la conceptualización del problema, los riesgos tecnológicos que conlleva y el nivel de madurez de la tecnología a utilizar. Se propone que el desarrollo de proyectos IoT para ciudades inteligentes se sustente en los siguientes tres principios: 1) Desarrollo ágil, 2) técnicas de desarrollo ligero de productos y 3) en el pensamiento sistémico (por sus siglas en inglés *Agile development, Lean product development, and Systems Thinking*)

Los autores, A. Redmon y A. Zarli realizaron una comparación entre las metodologías tradicionales y las metodologías ágiles Scrum y Kanban, y llegan a la conclusión de que es conveniente utilizar una metodología híbrida, en donde se fusionen las

características de las metodologías tradicionales con la rapidez de las ágiles.

Tabla 1 Comparación metodologías tradicionales y ágiles

Aspectos de desarrollo	Metodología Tradicional	Metodologías ágiles
Requisitos	Los requisitos no pueden cambiar, se establecen al inicio de la metodología	Los requisitos son muy cambiantes. Se requiere de una retroalimentación sobre un resultado obtenido para determinar si es lo requerido o no.
Cambios	Al realizar un cambio se requiere que haya un proceso formal de control de cambios	Se realizan en cualquier momento
Tiempo	Existe un compromiso en el tiempo de entrega	Hay incertidumbre respecto al tiempo de entrega del producto. Se van haciendo entregas rápidas.
Costo	Es definido por el proyecto	Existe incertidumbre respecto al costo del proyecto. Se invierte en las funcionalidades que más valor le dan al cliente y cíclicamente se avanza hasta que se logre
Riesgos	Son asumidos por el proveedor	Responsabilidad compartida
Cliente	El cliente apoya el desarrollo mediante la participación de reuniones	Involucración directa del cliente en el desarrollo, el cliente es parte del equipo
Planeación	Requiere de un plan detallado desde el inicio del proyecto	Se va planeando a medida que el proyecto avanza. Es un planeación gradual y constante
Éxito del proyecto	Es dado por el seguimiento del plan	Es dado por la entrega continua de valor y funcionalidad al cliente
Elaboración de entregables	Se generan entregables que requieren mucho tiempo de elaboración	Se centran en hacer entregables en tiempos cortos con alta calidad inmersa.



Los proyectos de IoT requieren entregas rápidas y una constante interacción con el cliente. En este sentido, las metodologías ágiles tienen una alta efectividad en proyectos donde los requisitos son muy cambiantes y la comunicación con el cliente es primordial

SysML Open Source Project propone un lenguaje de modelado basado en el lenguaje UML para proyectos de ingeniería denominado SysML. SysML amplía UML para modelar requerimientos y restricciones paramétricas a fin de dar soporte a la ingeniería de requerimientos y el análisis de desempeño para proyectos de ingeniería de sistemas. Un ejemplo emblemático lo conforman los llamados “sistemas embebidos” para los que desde 1998 existe una adaptación de UML conocida como Real Time UML [4].

Según [5], la a) complejidad de los sistemas actuales, los b) cambios repentinos en el contexto de estos sistemas y las c) modificaciones en los requerimientos del cliente una vez que se ha comenzado el desarrollo de un proyecto de ingeniería, generan un ambiente donde la planificación, el desarrollo, la administración y el control del mismo resultan difíciles de estimar o evaluar. Este tipo de escenarios requiere de metodologías que permitan generar resultados rápidamente. Algunos de los factores asociados son el tamaño del proyecto, la complejidad, el tiempo asignado y el presupuesto, entre otros.

Dentro de la literatura [3],[6], utilizan las metodologías ágiles Scrum y Kanban. Scrum utiliza las opiniones de los usuarios finales para identificar los requerimientos necesarios, sin embargo se centra en los requerimientos funcionales y los requerimientos no funcionales los ignora o los implementa al final del ciclo de vida, ocasionando posibles problemas de calidad y errores en el funcionamiento de la aplicación. Señalan los autores que el uso de la nube y el manejo de grandes volúmenes de datos hace muy importante el observar y considerar los requerimientos no funcionales.

Tabla 2 Comparación de metodologías ágiles

Características	XP	SCRUM	KANBAN
Periodo del ciclo de iteración	1-6 semanas	2-4 semanas	No es iterativo, es incremental

Tamaño adecuado del proyecto y complejidad	Proyecto pequeño y sencillo	Proyecto grande y complejo	Manejo de proyectos repetitivos y no tan complejos
Involucramiento del cliente	Altamente involucrado	Altamente involucrado	Altamente involucrado
Documentación	Básica	Básica	Básica
Principales practicas	Simplicidad, reuniones en pares	Reuniones SRUM	Respeto, integridad, reuniones
Desarrollo de características concurrentes	Posible	Posible	Si

La tabla anterior nos muestra que, si tenemos un proyecto grande, XP no sería la metodología adecuada, ya que los proyectos deben ser simples, en cambio Scrum se aplica a cualquier tipo de proyectos principalmente a los grandes y complejos, Kanban puede emplearse en todo tipo de proyectos, pero principalmente a los no tan complejos, ya que es posible que no se cumpla con los tiempos de entrega.

De acuerdo al reporte anual de las metodologías ágiles [7], se muestra que la metodología Scrum es la más utilizada, Figura 1.

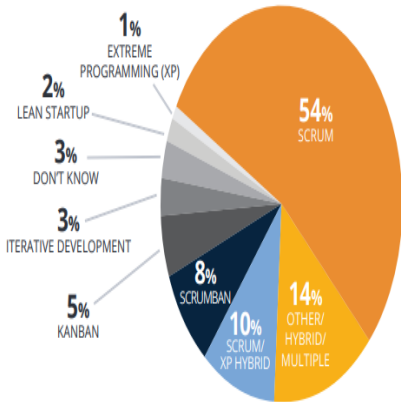


Figura 1 Metodologías ágiles más utilizadas

4.- Estudio comparativo de Estándares para el IoT.



Las aplicaciones del internet de las cosas son múltiples y para su desarrollo encontramos una gran diversidad de plataformas, herramientas y dispositivos de sensado, pero también diversos grupos de interés asociados a los proyectos. De acuerdo a [8], para normalizar el desarrollo de este tipo de proyectos se revela sumamente importante aplicar estándares.

En el 2018 la Organización Internacional de Normalización, ISO por sus siglas en inglés, anuncia la primera Norma Internacional para IoT, con la que se caracteriza el vocabulario para el diseño y desarrollo de aplicaciones [9].

Estándar ISO/IEC 30141 Internet de las Cosas (IoT)-Arquitectura de Referencia. [10]: Este estándar hace referencia a una arquitectura en la cual se hace énfasis en la seguridad y protección de los datos. Es la primera arquitectura que tiene como objetivo armonizar el mundo del IoT, su aplicación permite que se maximicen los beneficios y se minimicen los riesgos.

Estandar IEEE Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things (IOT) [11]: Es un estándar el cual caracteriza los diferentes dominios que existen en el internet de las cosas, como lo son Smart city, health, entre otros, proporcionando los stakeholders y las posibles arquitecturas.

La European Telecommunication Standards Institute (ETSI)[12], cuenta con varios estándares publicados sobre IoT, algunos de ellos son los siguientes:

EMTEL (Study of use cases and communications involving IoT devices in provision of emergency situations): Este estándar realiza un análisis basado en los dispositivos, actores y redes que pueden estar involucrados en los servicios de emergencia, y cómo las organizaciones como la UTI y la IEEE caracterizan están dispositivos. Desarrollan casos de uso que cuentan con tres precondiciones: los servicios de emergencia, las redes de comunicación y los actores y dispositivos en IoT[13].

Los estándares ETSI TR 103 536 V1.1.2 (2019-12)[14]: Este estándar nos muestra como la comunidad del internet de las cosas a implementado los estándares sobre las plataformas de IoT, indicando cuales son los principales requerimientos para la interoperabilidad y la seguridad.

Estándar ETSI SR 003 680 V1.1.1 (2020-03)[15]: Este estándar nos demuestra como la seguridad, la

interoperabilidad o la privacidad, deben ser tratados de manera especial, nos da una visión de cómo se deben de abordar en los diferentes dominios del internet de las cosas. SmartM2M (Requirements & Feasibility study for Smart Lifts in IoT)[16]: Este estándar nos presenta un caso de estudio sobre el centro de monitoreo de un grupo de edificios, categoriza los diferentes usuarios involucrados, las diferentes señales que puede recibir, como es el caso de alarmas, enviar un auto, llamar a determinado piso, etc.

Tabla 3 Contenido de los estándares

Estándar	Interesados	Arquitectura	Seguridad	Metodología
ISO/IEC 30141		X	X	
IEEE Std 2413 TM -2019	X	X	X	
EMTEL	X	X		
ETSI TR 103 536 V1.1.2 (2019-12)	X	X	X	
ETSI SR 003 680 V1.1.1 (2020-03)	X	X	X	
SmartM 2M	X		X	

5.- Conclusiones

Las metodologías dan soporte al desarrollo de proyectos, en particular para organizar, planear y administrar su desarrollo y para el logro de sus objetivos. Si bien no se cuenta con metodologías específicas para IoT, diversas investigaciones coinciden en que metodologías ágiles como Scrum y Kanban pueden ser de gran utilidad. De nuestra parte consideramos que el uso de estas metodologías apegadas a estándares industriales puede contribuir al desarrollo exitoso de proyectos IoT.

Si bien ya podemos encontrar algunos estándares para IoT, son todavía poco utilizados. Es deseable poder darles una mayor difusión y sustentar en ellos el desarrollo de metodologías específicas para IoT.



De acuerdo a diversos reportes, un enfoque de desarrollo basado en metodologías ágiles para la administración e implementación de proyectos de IoT permite generar una entrega continua de resultados, así como realizar ajustes en cada entregable.

6.-Referencias

- [1] Unión Internacional de telecomunicaciones, “internet de las cosas”, [online], Disponible: <https://www.itu.int/en/Americas/Documents/EVENTS>, [Accesado: abril-2020].
- [2] Internet Society, “Internet de las cosas”, [online], Disponible: <https://www.internetsociety.org/wp-content/uploads/2017/09/report-InternetOfThings-20160817-es-1.pdf>, [accesado: octubre-2020]
- [3] A. Redmon y A. Zarli, “The concept selection of lean software and system 23 engineering tools for smart cities” In 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), Portugal, 2017, pp.36-43.
- [4] Abiztar, “SysML-modelando sistemas”, [online], Disponible: <https://www.abiztar.com.mx/articulos/sysml-modelando-sistemas-y-sistemas-de-sistemas.html>, [accesado: octubre-2020]
- [5] D. A. Godoy, E. A. Belloni, H. Kotynski, H. dos Santos, and E. O. Sosa, “Simulado Proyectos de Desarrollo de Software Administrados con Scrum,” XVI Work. Investig. en Ciencias la Comput., pp. 485–489, 2014.
- [6] V. Sachdeva, L. Chung, “Handling non-functional requirements for big data and IOT projects in Scrum” in 2017 7th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering - Confluence, India, 2017, pp. 216-221
- [7] Cesi, “Workshop: Introducción al SCRUM. 13º informe anual del estado de los Métodos Ágiles”, [online], Disponible: <https://www.cesi-iberia.com/workshop-introduccion-al-scrum-13o-informe-anual-del-estado-de-los-metodos-agile/>, [accesado: octubre-2020]
- [8] N. Kishor Narang: Standards Matters/Mentor's Musings on IoT 2.0: IoT Coming of Age. IEEE Internet Things Mag. 3(2): 10-11 (2020)
- [9] Isotoolsexcellence, “Norma Iso/IEC30141”, [online], Disponible: <https://www.isotools.org/2018/11/21/norma-iso-iec-30141-internet-cosas-iot/>, [Accesado octubre-2020]
- [10] A. Herrera, D. Alarcon, “Revisión sistemática del estándar ISO / IEC 30141: 2018 como arquitectura de referencia para la seguridad en entornos IoT”, Tesis de maestría, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., Colombia, 2019
- [11] IEE SA, “IEEE 2413-2019 - IEEE Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things (IoT)”, [online], Disponible: <https://standards.ieee.org/content/ieee-standards/en/standard/2413-2019.html> [Accesado: octubre-2020]
- [12] ETSI, “Etsi around the world”, [online], Disponible: <https://www.etsi.org/>, [Accesado: Octubre-2020]
- [13] ETSI, “EMTEL; Study of use cases and communications involving IoT devices in provision of emergency situations”, [online], Disponible: <https://www.etsi.org/standards#Pre-defined%20Collections>, [accesado: octubre-2020]
- [14] ETSI, “SmartM2M; Strategic/technical approach on how to achieve interoperability/interworking of existing standardized IoT Platforms”, [online], Disponible: <https://www.etsi.org/standards#Pre-defined%20Collections>, [accesado: octubre-2020]
- [15] ETSI, “SmartM2M; Guidelines for Security, Privacy and Interoperability in IoT System Definition”, [online], Disponible: <https://www.etsi.org/standards#Pre-defined%20Collections>, [accesado: octubre-2020]
- [16] ETSI, “SmartM2M; Requirements & Feasibility study for Smart Lifts in IoT”, [online], Disponible: <https://www.etsi.org/standards#Pre-defined%20Collections>, [accesado: octubre-2020]



Simultaneous State and Actuator Fault Estimation in a Double Pipe Heat Exchanger via Fuzzy Descriptor Approach

Mujica-Campos V.E.* Osorio-Gordillo G.L.*
Vargas-Méndez R.A.* García-Beltrán C.D.*
Astorga-Zaragoza C.M.*

* Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
Cuernavaca, Mor; México (e-mail: victor.mujica19ea@cenidet.edu.mx)

Abstract: The aim of this paper is to provide a method for simultaneous state and actuator fault estimation in a counter-flow double pipe heat exchange. The proposed approach is based on a Generalised Dynamic Observer (GDO) for a class of non-linear descriptor systems described by a Fuzzy Descriptor System. The observer gains are computed by solving a set of Linear Matrix Inequalities (LMIs). The proposed approach is illustrated via numerical simulation.

Keywords: Heat Exchangers, Fuzzy Descriptor Systems, Fault Estimation, Linear Matrix Inequalities, Generalised Dynamic Observer

1. INTRODUCTION

A heat exchanger is an equipment that is responsible for transferring heat between two fluids or between the surface of a solid and a moving fluid. Heat exchangers are widely used in industrial process, for example, in the food industry for cooling and pasteurization, in petroleum refineries and natural gas processing or space heating or cooling. Heat exchangers are frequently subject to faults, some common faults are related to their control actuators for example: valve is stuck causing that the fluid can not move freely through the pipeline, valves do not fully open or instead do not fully close due to weakening spring causing an abnormal leakage, or instrumentation close to the valves interferes with their operation. Therefore, it is extremely important to develop techniques of control and monitoring focused on heat exchangers.

Several works about fault diagnosis has been carried out for heat exchangers. In López-Zapata et al. (2016) a sensor and actuator Fault Detection and Isolation (FDI) system based on Kalman filters was presented. In Escobar et al. (2011) the authors shown a sensor FDI system based on a non-linear high gain observer. On the other hand, some Fault Tolerant Control (FTC) techniques for heat exchangers have been reported. In Carbot-Rojas et al. (2015) an active FTC through a Model Predictive Control (MPC) was presented. In that work the authors shown satisfactory experimental results implementation.

The aim of this work is design an adaptive observer for simultaneous state and actuator fault estimation based on a GDO structure. This observer structure was recently used for state and parameter estimation in Pérez-Estrada

et al. (2019) for Linear Parameter Varying (LPV) systems, state estimation for Lipschitz non-linear descriptor systems (Osorio-Gordillo et al., 2019) and finite-time functional observers for linear descriptor systems (Rios-Ruiz et al., 2019). It is interesting to use this alternative design since the GDO observer structure has more degrees of freedom compared to the observers reported in the literature. This characteristic provides better estimation accuracy, stability margin and robustness to modeling errors.

2. HEAT EXCHANGER MATHEMATICAL MODEL

The simplified model of a counter-flow double pipe heat exchanger is shown in (1)–(3), this equations represent the energy balance, it is important to takes into account the following assumptions:

- (1) A constant volume in the heat exchanger pipes.
- (2) Global heat transfer coefficient are constant
- (3) Physical properties of the fluid are constant.
- (4) There is not heat transfer with the environment.

$$\frac{dT_{co}(t)}{dt} = \frac{w_c(t)}{V_c} T_{ci} - \frac{w_c(t)}{V_c} T_{co}(t) + \frac{Q(t)}{cp_c \rho_c V_c} \quad (1)$$

$$\frac{dT_{ho}(t)}{dt} = \frac{w_h(t)}{V_h} T_{hi} - \frac{w_h(t)}{V_h} T_{ho}(t) - \frac{Q(t)}{cp_h \rho_h V_h} \quad (2)$$

$$0 = U A_r \Delta T(t) - Q(t) \quad (3)$$

where V_c is the volume in the cold side ($134.99 \times 10^{-6} m^3$), V_h is the volume in the hot side ($15.512 \times 10^{-6} m^3$), cp_c is the specific heat of cold water ($4174 J/kg^\circ C$), cp_h is the specific heat of hot water ($4191 J/kg^\circ C$), ρ_c is the density of cold water ($988.8 kg/m^3$), ρ_h is the density of hot water ($973.7 kg/m^3$), T_{ci} is the cold wa-



ter inlet temperature (18°C), T_{hi} is the hot water inlet temperature (55°C), U is the heat transfer coefficient ($1400\text{W/m}^2\text{C}$), A_r is the heat transfer surface area (0.0154m^2), $\Delta_T(t) = \sqrt{(T_{ho}(t) - T_{ci})(T_{hi} - T_{co}(t))}$ is the geometric mean temperature difference, $Q(t)$ is heat flow into the fluid, $T_{co}(t)$ and $T_{ho}(t)$ are the cold-water outlet temperature and the hot-water outlet temperature respectively. The inputs are the flow in the cold stream $w_c(t)$ and the flow in the hot stream $w_h(t)$.

2.1 Fuzzy Descriptor System

The mathematical model of (1)–(3) in state space representation is described by the following equations:

$$E\dot{x}(t) = A(x(t))x(t) + B(x(t))u(t) + Gf(t) \quad (4)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (5)$$

$$\text{where } x(t) = \begin{bmatrix} T_{co}(t) \\ T_{ho}(t) \\ Q(t) \end{bmatrix}, u(t) = \begin{bmatrix} w_c(t) \\ w_h(t) \end{bmatrix}, z(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \Delta_T(t) \\ \frac{x_2(t) - x_1(t)}{1} \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A(x(t)) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{c\rho_c\rho_h V_c} \\ 0 & 0 & \frac{c\rho_c\rho_h V_h}{c\rho_h\rho_h V_h} \\ -UA_r z_3(t) & UA_r z_3(t) & -1 \end{bmatrix},$$

$$B(x(t)) = \begin{bmatrix} \frac{T_{ci} - z_1(t)}{V_c} & 0 \\ 0 & \frac{T_{hi} - z_2(t)}{V_h} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

To obtain the limit of each non-linearity, its necessary to determine the range of operation. These values are based on the knowledge of the process. According to García Morales (2013) the range of the manipulated variables are $0\text{m}^3/\text{s} \leq u_1(t) \leq 1.4 \times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$ and $0\text{m}^3/\text{s} \leq u_2(t) \leq 1.4 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$. By considering the maximum and minimum inputs values, a numerical simulation of (1)–(3) is carried out to obtained the limits for the premise variables $40 \leq z_1(t) \leq 54$, $22 \leq z_2(t) \leq 30$ and $1 \leq z_3(t) \leq 17$. The corresponding weighting functions (6)–(7) and membership functions (8) are computed as follows:

$$\eta_0^j = \frac{z_j \max - z_j(t)}{z_j \max - z_j \min}, j = 1, 2, \dots, p \quad (6)$$

$$\eta_1^j = 1 - \eta_0^j \quad (7)$$

$$\omega_i(z_j) = \prod_{j=1}^p \eta_{\gamma}^j(z_j), i = 1, 2, \dots, r \quad (8)$$

where γ is zero or one (depending on the weighting functions), p is the number of premise variables, the number of local model is $r = 2^p$. By taking into account each local model a global model can be obtained. The global model reproduces the dynamics of the original non-linear descriptor system (4)–(5) by the following equations:

$$E\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \omega_i(z) \left(A_i x(t) + B_i u(t) \right) + Gf(t) \quad (9)$$

$$y = Cx(t) \quad (10)$$

where $x(t) \in \mathbb{R}^n$ is the semi-state vector, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ is the input vector, $f(t) \in \mathbb{R}^{n_f}$ is the actuator fault vector, $y(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$ is the measurable output vector and

$z(t) \in \mathbb{R}^p$ is the measurable premise variables vector. Matrices $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $G \in \mathbb{R}^{n \times n_f}$, $C \in \mathbb{R}^{n_y \times n}$ and $E \in \mathbb{R}^{n \times n}$ is a singular matrix such that $r = \text{rank}(E) < n$. The membership functions, denoted as $w_i(z(t))$, for $i = 1, 2, \dots, r$, satisfy the convex sum property:

$$\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) = 1 \quad (11)$$

where $r = 2^p$, p is the number of measurable premise variables. The membership functions domains are $0 \leq w_i(z(t)) \leq 1$.

3. PROBLEM STATEMENT

Consider an adaptive observer of the form (12)–(15) for the systems describe by (9)–(10):

$$\dot{\zeta}(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z) \left(N_i \left(\zeta(t) + TG\hat{f}(t) \right) + H_i v(t) + F_i y(t) + J_i u(t) \right) + TG\hat{f}(t) \quad (12)$$

$$\dot{v}(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z) \left(S_i \left(\zeta(t) + TG\hat{f}(t) \right) + L_i v(t) + M_i y(t) \right) \quad (13)$$

$$\hat{x}(t) = P \left(\zeta(t) + TG\hat{f}(t) \right) + Qy(t) \quad (14)$$

$$\dot{\hat{f}}(t) = \Phi \left(C\hat{x}(t) - y(t) \right) \quad (15)$$

where $\zeta(t) \in \mathbb{R}^{q_0}$ is the observer vector, $v(t) \in \mathbb{R}^{q_1}$ is an auxiliary vector, $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ is the estimation of $x(t)$ and $\hat{f}(t) \in \mathbb{R}^{n_f}$ is the estimation of $f(t)$. Matrices $T, N_i, H_i, F_i, J_i, S_i, L_i, M_i, P, Q$ and Φ are unknown matrices of appropriate dimensions to be determinate such that $\hat{x}(t)$ converges asymptotically to $x(t)$ as well as $\hat{f}(t)$ converges asymptotically to $f(t)$.

Lemma 1. There exists an observer of the form (12)–(15) for the system describe by (9)–(10) if the following two conditions hold.

- (1) The matrix $\begin{bmatrix} N_i & H_i \\ S_i & L_i \end{bmatrix}$ is Hurwitz when $f(t) = 0$.
- (2) There exists a matrix T such that the following conditions are satisfied:
 - a) $N_i T E + F C - T A_i = 0$
 - b) $J_i = T B_i$
 - c) $S_i T E + M_i C = 0$
 - d) $P T E + Q C = I_n$

Proof. Consider a matrix $T \in \mathbb{R}^{q_0 \times n}$ and define a transformed error vector $\varepsilon(t) = \zeta(t) - T E x(t) + T G f(t)$. The derivative of $\varepsilon(t)$ is given by:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z) \left(N_i \varepsilon(t) + \left(N_i T E + F_i C - T A_i \right) x(t) + H_i v(t) + \left(J_i - T B_i \right) u(t) + \left(N_i T G + T G \right) e_f(t) \right) \quad (16)$$

where $\dot{f}(t) = 0$ and $e_f(t) = \hat{f}(t) - f(t)$. By using the equation (14) and definition of $\varepsilon(t)$, (13) and (14) can be rewritten as:



$$\dot{v}(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z) \left(S_i \varepsilon(t) + L_i v(t) + S_i T G e_f(t) + (S_i T E + M_i C) x(t) \right) \quad (17)$$

$$\hat{x}(t) = P \varepsilon(t) + P T G e_f(t) + (P T E + Q C) x(t) \quad (18)$$

Since $\dot{f}(t) = 0$, the derivative of $e_f(t)$ is given by:

$$\dot{e}_f(t) = \Phi C P \varepsilon(t) + \Phi C P T G e_f(t) \quad (19)$$

Considering that conditions a)—d) are satisfied, the observer error dynamic is obtained from (16) and (17):

$$\dot{\varphi}(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z) \left(\begin{bmatrix} N_i & H_i \\ S_i & L_i \end{bmatrix} \varphi(t) + \begin{bmatrix} N_i T G + T G \\ S_i T G \end{bmatrix} e_f(t) \right) \quad (20)$$

where $\varphi(t) = \begin{bmatrix} \varepsilon(t) \\ v(t) \end{bmatrix}$ and $\begin{bmatrix} N_i & H_i \\ S_i & L_i \end{bmatrix}$ is Hurwitz, if only if $e_f(t) = 0$. From (18) we have:

$$e_x(t) = P \varepsilon(t) + P T G e_f(t) \quad (21)$$

4. OBSERVER DESIGN

4.1 Parametrisation of the observer matrices

From Lemma 1 can be deduce that the design of the observer is reduced to find the unknown matrices such that the conditions a)—d) are satisfied.

Now, since $\text{rank} \left(\begin{bmatrix} T E \\ C \end{bmatrix} \right) = n$, there always exist two matrices $T \in \mathbb{R}^{q_0 \times n}$ and $K \in \mathbb{R}^{q_0 \times (n_y)}$ such that:

$$\begin{bmatrix} T & K \end{bmatrix} \Omega = R \quad (22)$$

where $R \in \mathbb{R}^{q_0 \times n}$ is a full rank matrix and $\Omega = \begin{bmatrix} E \\ C \end{bmatrix}$. Since $\text{rank}(\Omega) = \text{rank} \left(\begin{bmatrix} \Omega \\ R \end{bmatrix} \right)$, the particular solution of equation (22) is given by:

$$\begin{bmatrix} T & K \end{bmatrix} = R \Omega^+ - Z_1 (I_{n+n_y} - \Omega \Omega^+) \quad (23)$$

Equation (23) is equivalent to:

$$T = T_1 - Z_1 T_2 \quad (24)$$

$$K = T_1 - Z_1 T_2 \quad (25)$$

where $T_1 = R \Omega \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix}$, $T_2 = (I_{n+n_y} - \Omega \Omega^+) \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix}$,

$K_1 = R \Omega \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n_y} \end{bmatrix}$, $K_2 = (I_{n+n_y} - \Omega \Omega^+) \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n_y} \end{bmatrix}$ and Z_1 is an arbitrary matrix of appropriate dimension. By using the equivalence of $T E$ from (22) into condition a) of Lemma 1 it leads to:

$$N_i R - N_i K C + F_i C = N R + \tilde{K} C = \begin{bmatrix} N_i & \tilde{K}_i \end{bmatrix} \Sigma = T A_i \quad (26)$$

where $\Sigma = \begin{bmatrix} R \\ C \end{bmatrix}$ is a full column rank matrix and $\tilde{K}_i = F_i - N_i K$. The general solution to (26) is:

$$\begin{bmatrix} N_i & \tilde{K}_i \end{bmatrix} = T A_i \Sigma^+ - Y_{1i} (I_{q_0+n_y} - \Sigma \Sigma^+) \quad (27)$$

By replacing matrix T from equation (24) into equation (27) it gives:

$$N_i = N_{1i} - Z_1 N_{2i} - Y_{1i} N_3 \quad (28)$$

$$\tilde{K}_i = \tilde{K}_{1i} - Z_1 \tilde{K}_{2i} - Y_{1i} \tilde{K}_3 \quad (29)$$

where: $N_{1i} = T_1 A_i \Sigma^+ \begin{bmatrix} I_{q_0} \\ 0 \end{bmatrix}$, $N_{2i} = T_2 A_i \Sigma^+ \begin{bmatrix} I_{q_0} \\ 0 \end{bmatrix}$,

$$\tilde{K}_{1i} = T_1 A_i \Sigma^+ \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n_y} \end{bmatrix}, \tilde{K}_{2i} = T_2 A_i \Sigma^+ \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n_y} \end{bmatrix},$$

$$N_3 = (I_{q_0+n_y} - \Sigma \Sigma^+) \begin{bmatrix} I_{q_0} \\ 0 \end{bmatrix}, \tilde{K}_3 = (I_{q_0+n_y} - \Sigma \Sigma^+) \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n_y} \end{bmatrix}$$

and Y_{1i} is arbitrary matrix of appropriate dimension. As matrices N_i , T , K , $\tilde{K}_i$ are known, using the definition of $F_i = \tilde{K}_i + N_i K$ can be deduce as:

$$F_i = \tilde{K}_{1i} + N_{1i} K - Z_1 (\tilde{K}_{2i} + N_{2i} K) - Y_{1i} (\tilde{K}_3 + N_3 K) = F_{1i} - Z_1 F_{2i} - Y_{1i} F_3 \quad (30)$$

where $F_{1i} = T_1 A_i \Sigma^+ \begin{bmatrix} K \\ I_{n_y} \end{bmatrix}$, $F_{2i} = T_2 A_i \Sigma^+ \begin{bmatrix} K \\ I_{n_y} \end{bmatrix}$

$$F_3 = (I_{q_0+n_y} - \Sigma \Sigma^+) \begin{bmatrix} K \\ I_{n_y} \end{bmatrix}$$

On the other hand, from equation (22) we obtain:

$$\begin{bmatrix} T E \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{q_0} & -K \\ 0 & I_{n_y} \end{bmatrix} \Sigma \quad (31)$$

Conditions c) and d) of Lemma 1 can be written as:

$$\begin{bmatrix} S_i & M_i \\ P & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T E \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_n \end{bmatrix} \quad (32)$$

Inserting equation (31) into the equation (32) we get:

$$\begin{bmatrix} S_i & M_i \\ P & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{q_0} & -K \\ 0 & I_{n_y} \end{bmatrix} \Sigma = \begin{bmatrix} 0 \\ I_n \end{bmatrix} \quad (33)$$

Since Σ is a full column rank matrix and $\begin{bmatrix} I_{q_0} & -K \\ 0 & I_{n_y} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} I_{q_0} & K \\ 0 & I_{n_y} \end{bmatrix}$, the general solution to equation (33) is given by:

$$\begin{bmatrix} S_i & M_i \\ P & Q \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 0 \\ I_n \end{bmatrix} \Sigma^+ - \begin{bmatrix} Y_{2i} \\ Y_3 \end{bmatrix} (I_{q_0+n_y} - \Sigma \Sigma^+) \right) \begin{bmatrix} I_{q_0} & K \\ 0 & I_{n_y} \end{bmatrix} \quad (34)$$

where Y_{2i} and Y_3 are arbitrary matrices of appropriate dimensions. Then matrices S_i , M_i , P and Q can be determined as:

$$S_i = -Y_{2i} N_3 \quad (35)$$

$$M_i = -Y_{2i} F_3 \quad (36)$$

$$P = P_1 - Y_3 N_3 \quad (37)$$

$$Q = Q_1 - Y_3 F_3 \quad (38)$$

where $P_1 = \Sigma^+ \begin{bmatrix} I_{q_0} \\ 0 \end{bmatrix}$ and $Q_1 = \Sigma^+ \begin{bmatrix} K \\ I_{n_y} \end{bmatrix}$. By considering replacing the parametrisation made before in the equation (20), a bilinearity appears in the product $N_i T G$. In order to avoid this bilinearity, an adaptation is carried out. Let $\bar{T}_2 = T_2 G$ and $Z_1 = Z \left(I_{n+n_y} - \bar{T}_2 \bar{T}_2^+ \right)$, where Z is an arbitrary matrix of appropriate dimension, so that, the bilinearity becomes:

$$N_i T G = N_{1i} T_1 G - Z N_{2i} T_1 G - Y_{1i} N_3 T_1 G \quad (39)$$



where the fact of $\bar{T}_2 \bar{T}_2^+ \bar{T}_2 = \bar{T}_2$ is considered. Considering the new definition of Z_1 the following expressions are obtained for matrices T , K , N_i and F_i :

$$T = T_1 - ZT_2 \quad (40)$$

$$K = K_1 - ZK_2 \quad (41)$$

$$N_i = N_{1i} - ZN_{2i} - Y_{1i}N_3 \quad (42)$$

$$F_i = F_{1i} - ZF_{2i} - Y_{1i}F_3 \quad (43)$$

where $\mathcal{T}_2 = (I_{n+n_y} - \bar{T}_2 \bar{T}_2^+) T_2$, $\mathcal{K}_2 = (I_{n+n_y} - \bar{T}_2 \bar{T}_2^+) K_2$, $\mathcal{N}_{2i} = (I_{n+n_y} - \bar{T}_2 \bar{T}_2^+) N_{2i}$, $\mathcal{F}_{2i} = (I_{n+n_y} - \bar{T}_2 \bar{T}_2^+) F_{2i}$. Now, by using the parametrisation made before and taking $Y_3 = 0$ for simplicity, the error dynamics can be written as:

$$\dot{\varphi}(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z) \left((\mathbb{A}_{1i} - \mathbb{Y}_i \mathbb{A}_2) \varphi(t) + (\mathbb{F}_{1i} - \mathbb{Y}_i \mathbb{F}_2) e_f(t) \right) \quad (44)$$

where $\mathbb{A}_{1i} = \begin{bmatrix} N_{1i} - ZN_{2i} & 0 \\ 0 & -I_{q_0} \end{bmatrix}$, $\mathbb{A}_2 = \begin{bmatrix} N_3 & 0 \\ 0 & -I_{q_0} \end{bmatrix}$, $\mathbb{Y}_i = \begin{bmatrix} Y_{1i} & H_i \\ Y_{2i} & L_i \end{bmatrix}$, $\mathbb{F}_{1i} = \begin{bmatrix} N_{1i} T_1 G + T_1 G - ZN_{2i} T_1 G \\ 0 \end{bmatrix}$ and $\mathbb{F}_2 = \begin{bmatrix} N_3 T_1 G \\ 0 \end{bmatrix}$. By putting together the observer error dynamics (4.1) and (19) we get:

$$\dot{\beta}(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z) (\mathcal{A}_i \beta(t)) \quad (45)$$

where $\mathcal{A}_i = \begin{bmatrix} \mathbb{A}_{1i} - \mathbb{Y}_i \mathbb{A}_2 & \mathbb{F}_{1i} - \mathbb{Y}_i \mathbb{F}_2 \\ \mathbb{C}_1 & \mathbb{D}_1 \end{bmatrix}$, $\beta(t) = \begin{bmatrix} \varphi(t) \\ e_f(t) \end{bmatrix}$, $\mathbb{C}_1 = [\Phi C P_1 \ 0]$ and $\mathbb{D}_1 = \Phi C P_1 T_1 G$. The problem has been now reduced to find matrices $\mathbb{Y}_i$, Φ and Z such that (45) is stable.

4.2 Observer stability analysis

In this section, a method to design an adaptive observer from (12)–(15) is presented.

Theorem 2. There exists a parameter matrices $\mathbb{Y}$, Φ and Z such that the systems (45) is asymptotically stable if and only if there exists a matrix $X_1 = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{12}^T & X_{22} \end{bmatrix} > 0$ with $X_{11} = X_{11}^T$ and a matrix $X_2 > 0$ such that the following LMIs are satisfied:

$$\mathcal{C}^T \mathcal{D}_i \mathcal{C}^{\perp T} < 0 \quad (46)$$

$$X_2 \Phi C P_1 T_1 G + G^T T_1^T P_1^T C^T \Phi^T X_2 < 0 \quad (47)$$

The definition of matrix $\mathcal{D}_i$ is:

$$\mathcal{D}_i = \begin{bmatrix} \Pi_{1i} & N_{1i}^T X_{11} - N_{2i}^T W_1^T & \Pi_{2i} \\ (*) & 0 & X_{11} (N_{1i} T_1 G + T_1 G) - W_1 N_{2i} T_1 G \\ (*) & (*) & X_2 \Phi C P_1 T_1 G + G^T T_1^T P_1^T C^T \Phi^T X_2 \end{bmatrix}$$

where Π_{1i} and Π_{2i} are:

$$\Pi_{1i} = X_{11} N_{1i} - W_1 N_{2i} + N_{1i}^T X_{11} - N_{2i}^T W_1^T$$

$$\Pi_{2i} = X_{11} (N_{1i} T_1 G + T_1 G) - W_1 N_{2i} T_1 G + P_1^T C^T \Phi^T X_2$$

In this case $W_1 = X_{11} Z$ and matrix $\mathbb{Y}_i$ is determined by using the following equations:

$$\mathbb{Y}_i = X_1^{-1} \left(\mathcal{B}_r^+ \mathcal{K}_i \mathcal{C}_i^+ + \mathcal{Z} - \mathcal{B}_r^+ \mathcal{B}_r \mathcal{Z} \mathcal{C}_i \mathcal{C}_i^+ \right) \quad (48)$$

$$\mathcal{K}_i = -\mathcal{R}^{-1} \mathcal{B}_i^T \vartheta_i \mathcal{C}_r^T \left(\mathcal{C}_r \vartheta_i \mathcal{C}_r^T \right)^{-1} + \mathcal{S}_i^{\frac{1}{2}} \mathcal{L} \left(\mathcal{C}_r \vartheta_i \mathcal{C}_r^T \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (49)$$

$$\vartheta_i = \left(\mathcal{B}_i \mathcal{R}^{-1} \mathcal{B}_i^T - \mathcal{D}_i \right)^{-1} > 0 \quad (50)$$

$$\mathcal{S}_i = \mathcal{R}^{-1} - \mathcal{R}^{-1} \mathcal{B}_i^T \left[\vartheta_i - \vartheta_i \mathcal{C}_r^T \left(\mathcal{C}_r \vartheta_i \mathcal{C}_r^T \right)^{-1} \mathcal{C}_r \vartheta_i \right] \mathcal{B}_i \mathcal{R}^{-1} \quad (51)$$

where $\mathcal{L}$, $\mathcal{R}$ and $\mathcal{Z}$ are arbitrary matrices of appropriate dimensions such that $\mathcal{R} > 0$ and $\|\mathcal{L}\| < 1$. $\mathcal{C}_l$, $\mathcal{C}_r$, $\mathcal{B}_l$ and $\mathcal{B}_r$ are factor matrices such that $\mathcal{C} = \mathcal{C}_l \mathcal{C}_r$ and $\mathcal{B} = \mathcal{B}_l \mathcal{B}_r$.

Proof. Consider the following Lyapunov function candidate:

$$V(\beta(t)) = \beta(t)^T X \beta(t) > 0 \quad (52)$$

where $X = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_2 \end{bmatrix} > 0$. Its derivative along the trajectory of (45) is given by:

$$\dot{V}(\beta(t)) = \sum_{i=1}^r w_i(z) \left(\beta(t)^T \left(\mathcal{A}_i^T X + X \mathcal{A}_i \right) \beta(t) \right) \quad (53)$$

The asymptotic stability of (45) is guaranteed if and only if $\dot{V}(\beta(t)) < 0$. This leads to a LMI:

$$\sum_{i=1}^r w_i(z) \left(\mathcal{A}_i^T X + X \mathcal{A}_i \right) < 0 \quad (54)$$

$$\begin{bmatrix} (\mathbb{A}_{1i}^T - \mathbb{A}_2^T \mathbb{Y}_i^T) X_1 + X_1 (\mathbb{A}_{1i} - \mathbb{Y}_i \mathbb{A}_2) & (*) \\ (\mathbb{F}_{1i}^T - \mathbb{F}_2^T \mathbb{Y}_i^T) X_1 + X_2 \mathbb{C}_1 & \mathbb{D}_1^T X_2 + X_2 \mathbb{D}_1 \end{bmatrix} < 0$$

the equation (54) can be written as (55), in order to avoid the bilinearity $X_1 \mathbb{Y}_i$:

$$\mathcal{B} \mathcal{X}_i \mathcal{C} + \left(\mathcal{B} \mathcal{X}_i \mathcal{C} \right)^T + \mathcal{D}_i < 0 \quad (55)$$

where $\mathcal{B} = \begin{bmatrix} -I_{q_0+q_1} \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathcal{C} = [\mathbb{A}_2 \ \mathbb{F}_2]$, $\mathcal{X}_i = X_1 \mathbb{Y}_i$ and

$$\mathcal{D}_i = \begin{bmatrix} X_1 \mathbb{A}_{1i} + \mathbb{A}_2^T X_1 & X_1 \mathbb{F}_{1i} + \mathbb{C}_1^T X_2 \\ (*) & X_2 \mathbb{D}_1 + \mathbb{D}_1^T X_2 \end{bmatrix}$$

According to Skelton et al. (2017), the solvability conditions of inequality (55) are:

$$\mathcal{B}^\perp \mathcal{D}_i \mathcal{B}^{\perp T} < 0 \quad (56)$$

$$\mathcal{C}^T \mathcal{D}_i \mathcal{C}^{\perp T} < 0 \quad (57)$$

Where $\mathcal{C}^{\perp} = \begin{bmatrix} \mathbb{A}_2^T \\ \mathbb{F}_2^T \end{bmatrix}^\perp$ and $\mathcal{B}^\perp = [0 \ I]$. Equations (56) and (57) are equivalent to (46) and (47).

5. APPLICATION: DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER

In order to illustrate the effectiveness of the adaptive observer, let us consider the double pipe heat exchanger.

5.1 Simulation results

To evaluate the performances of adaptive observer define the following fault scenario: $f_1(t) = 0.26^\circ C$ when $70s \leq t \leq 90s$, $f_2(t) = 1.6^\circ C$ when $30s \leq t \leq 50s$, the initial condition for the system are $x(0) = [22 \ 45]^\top$ for the observer are $\zeta(0) = [14.6 \ 30 \ 321.8]^\top$, $v(0) = [0 \ 0 \ 0]^\top$, $\hat{f}(0) = [0 \ 0]^\top$ and $u(t) = [12.67 \ 10.7]^\top \times 10^{-6} m^3/s$.

The figure 1 shows the behavior of the system and the state estimation, although the observer does not have



information about the fault, there is a negligible error estimation. A fault in the hot-water valve and another in the cold-water valve were considered due to weakening spring causing an abnormal leakage, the fault estimation has a convergence time between 4s to 6s. These faults estimation are illustrated in figure 2. The membership functions are show in figure 3. It should be noted that the evolution of the membership functions of the eight local models in relation to the global behavior during the time simulation.

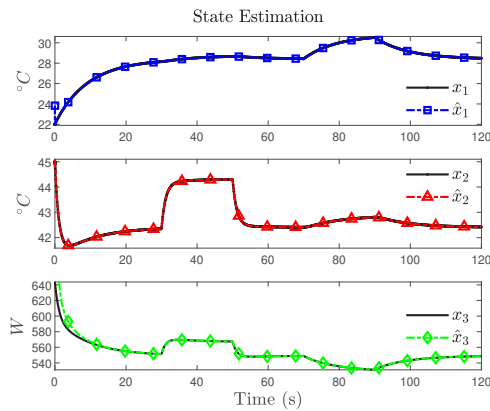


Fig. 1. State Estimation

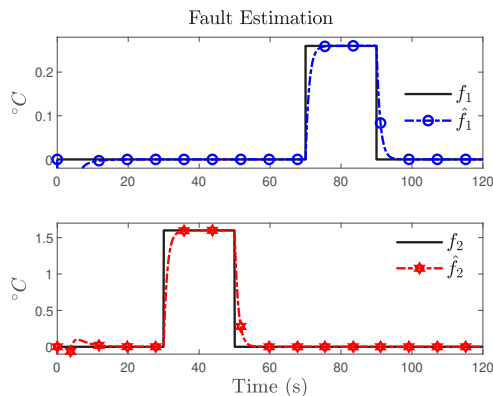


Fig. 2. Fault Estimation

6. CONCLUSION

In this paper simultaneous state and actuator fault estimation applied to a double pipe heat exchanger is presented. The conditions for the existence of the adaptive observer are provided an its stability is given in terms of LMIs via a Lyapunov function. The results show that the proposed approach represents a feasible alternative for fault estimation in descriptor systems.

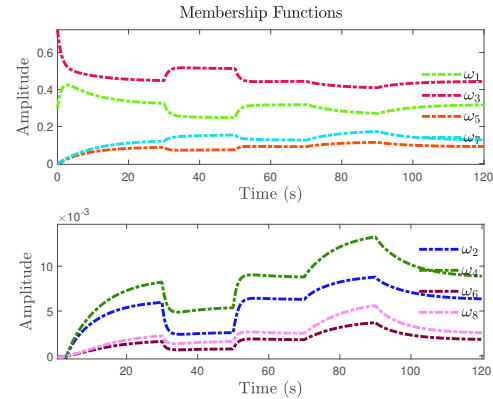


Fig. 3. Membership Functions

REFERENCES

- Carbot-Rojas, D.A., Escobar, R.F., Gómez-Aguilar, J.F., López-López, G., and Olivares-Peregrino, V.H. (2015). Experimental validation of an actuator fault tolerant control system using virtual sensor: Application in a double pipe heat exchanger. *Chemical Engineering Research and Design*, 104, 400–408.
- Escobar, R.F., Astorga-Zaragoza, C.M., Tllez-Anguiano, A.C., Jurez-Romero, D., Hernández, J.A., and Guerrero-Ramirez, G.V. (2011). Sensor fault detection and isolation via high-gain observers: Application to a double-pipe heat exchanger. *ISA Transactions*, 50(3), 480–486.
- García Morales, J. (2013). *Diagnóstico de Fallas para Componentes de un Intercambiador de Calor Empleando el Enfoque de Observadores en Modos Deslizantes Super-Twisting*. Maestría en ciencias en ingeniería electrónica director, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- López-Zapata, B., Adam-Medina, M., Escobar, R.F., Álvarez-Gutiérrez, P.E., Gómez-Aguilar, J.F., and Vela-Valdés, L.G. (2016). Sensors and actuator fault tolerant control applied in a double pipe heat exchanger. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 93, 215–223.
- Osorio-Gordillo, G.L., Darouach, M., Astorga-Zaragoza, C.M., and Boutat-Baddas, L. (2019). Generalised dynamic observer design for Lipschitz non-linear descriptor systems. *IET Control Theory and Applications*, 13(14), 2270–2280.
- Pérez-Estrada, A.J., Osorio-Gordillo, G.L., Darouach, M., and Alma, M. (2019). Adaptive observer design for LPV systems. *IFAC-PapersOnLine*, 52(28), 140–145.
- Ríos-Ruiz, C., Osorio-Gordillo, G.L., Souley-Ali, H., Darouach, M., and Astorga-Zaragoza, C.M. (2019). Finite time functional observers for descriptor systems. Application to fault tolerant control. *27th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2019 - Proceedings*, 2074(2), 165–170.
- Skelton, R.E., Iwasaki, T., and Grigoriadis, K.M. (2017). A unified algebraic approach to linear control design. *A Unified Algebraic Approach to Control Design*, 1–285.



Estudio de Técnicas de Mejora de la Eficiencia en Cargas Ligeras para Convertidores CD-CD

América Morales Benítez*. Hugo Calleja
Gjumlich.**

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
México (Tel: 7771930094; e-mail:
america.morales@cenidet.edu.mx).

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
México (e-mail: Jorge.cg@cenidet.tecnm.mx)

Resumen: Este artículo se orienta a la revisión y comparación de diversas técnicas reportadas en la literatura, para lograr una eficiencia alta en un amplio intervalo de carga. El enfoque principal es a los convertidores CD/CD y a la eficiencia bajo condiciones de carga ligera. Entre los métodos revisados figuran la modulación por frecuencia variable, técnicas de frecuencia fija como interruptores híbridos, desconexión de fases, circuitos resonantes y algoritmos de optimización multiobjetivo. Se muestran las aplicaciones y el funcionamiento de los métodos revisados. Se observe que los métodos cumplieron el objetivo de mejorar, en mayor o menor grado, la eficiencia en cargas ligeras, aunque lo hicieron a costa de una mayor complejidad.

Palabras clave: Eficiencia, cargas ligeras, convertidores CD/CD.

1. INTRODUCCION

La eficiencia energética es un factor que cobra cada vez mayor relevancia en la electrónica de potencia. En la literatura existe una gran variedad de topologías de convertidores CD/CD, los que presentan eficiencias cercanas al 100%; sin embargo, es común que la eficiencia alta no sea constante a lo largo del intervalo de potencia de salida, con una disminución mayor ante cargas ligeras. Una de las principales causas por la cual la eficiencia disminuye es debido a las pérdidas en el convertidor de potencia.

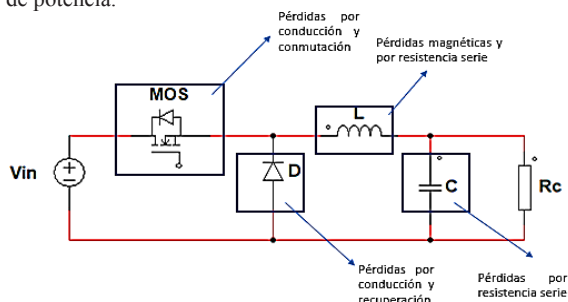


Fig. 1. Fuentes de pérdidas en un convertidor reductor.

En la Fig.1 se muestra un convertidor reductor con sus principales causas de pérdidas. Se observa que en el interruptor se tiene una gran cantidad de pérdidas por conducción y conmutación; en el inductor y el capacitor por la resistencia serie, y en el diodo por conducción y la recuperación inversa.

En la actualidad, muchos dispositivos portátiles operan en modo de espera a baja potencia (p. ej. teléfonos celulares, computadoras, consolas de videojuegos, etc.) con la finalidad de extender su autonomía. Es por esta razón que cobra una gran importancia el tener una buena eficiencia en cargas ligeras, ya que esto permite aumentar la vida útil de las baterías de los dispositivos portátiles. Aunado a esto, las microrredes han tenido un gran auge en los últimos años, sobre todo si hablamos de microrredes en CD, debido a que la gran mayoría de las cargas conectadas al tomacorriente basan su operación en corriente continua. Si se toma como ejemplo una microrred con paneles solares, se espera tener una buena eficiencia en ciertos horarios, pero se descuida la eficiencia en las primeras horas del día cuando la irradiancia es baja; si se tuviera una buena eficiencia en cargas ligeras se podría extraer una mayor cantidad de energía y, por lo tanto, recuperar la inversión en un lapso más corto.

En los últimos años se han llevado a cabo múltiples investigaciones a nivel circuito, dispositivo y sistema para mejorar la eficiencia a cargas ligeras. A nivel circuito se tienen opciones como interruptores híbridos o circuitos resonantes. En dispositivos se ha optado por introducir diodos Schottky en los interruptores MOSFET, y por utilizar materiales magnéticos de mayor calidad en los inductores para disminuir la resistencia serie. Por otra parte, a nivel sistema existen muchas opciones como el control por frecuencia variable, la técnica de frecuencia fija y otras más.

El objetivo de este documento es examinar las técnicas que se reportan a nivel sistema y circuito en la literatura, con el fin de aprovechar estas tecnologías para obtener una mayor eficiencia en un amplio rango de carga.



El artículo se organiza de la siguiente forma: en la sección 2 se abordan las soluciones a nivel circuito y en la 3 las soluciones a nivel sistema, en la 4 se desarrolla una comparación y, finalmente, en la sección 5 se muestran las conclusiones.

2. SOLUCIONES A NIVEL SISTEMA

A nivel sistema, se reportan en la literatura técnicas por frecuencia variable, las que se describen a continuación.

2.1 Modulación por frecuencia de pulso

Una de las técnicas de control por frecuencia variable es la Modulación de Frecuencia de Pulso (PFM), la cual se utiliza para reducir las pérdidas por conmutación y de accionamiento de compuerta (Sahu & Rincon-Mora, 2007).

Su funcionamiento se basa en reducir la frecuencia de conmutación cuando la corriente de carga disminuye, provocando que las pérdidas por conmutación y accionamiento se reduzcan (Jinwen, 2004). Existen algunas variantes de la modulación por frecuencia variable (Xunwei, 1997); las que mejor desempeño han mostrado son la PFM síncrona, por salto de pulso, y en modo ráfaga (Sahu & Rincon-Mora, 2007). En la Fig.3 se muestran las formas de onda de la PFM síncrona en un convertidor reductor síncrono (Fig. 2). La regulación del voltaje de salida generalmente se logra utilizando un tiempo de encendido T_{on} fijo, y un tiempo de apagado T_{off} controlado de manera tal que el voltaje de salida alcance un umbral establecido al final de T_s . En estos controladores la frecuencia de conmutación está dada por:

$$f_s = \frac{I_{out}}{T_{on}^2} \frac{2V_{out}L}{V_{in}(V_{in}-V_{out})} \quad (1)$$

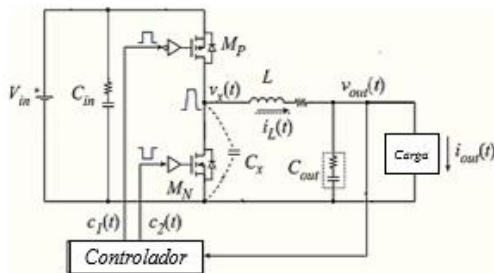


Fig. 2. Convertidor reductor síncrono (Olivier Trescases, 2011).

Con T_{on} fijo, la frecuencia de conmutación cambia linealmente en función de la corriente de carga, para mantener un voltaje de salida constante. La frecuencia puede utilizarse para detectar la corriente de salida y cambiar de un modo PFM a uno PWM o viceversa (Yie & Cing-Hong, 2009), (Ciaran & Dr. Maeve, 2012) dependiendo de la carga que se tenga.

En la literatura se utilizan las combinaciones de ambas técnicas para tener una buena eficiencia a lo largo de un amplio intervalo de carga: el modo PFM usualmente se utiliza cuando en el convertidor de potencia se tienen cargas ligeras, y el modo PWM cuando se tienen cargas medias o altas. Uno de los principales problemas al utilizar el híbrido PWM/PFM es que, debido a los cambios de la frecuencia, se producen interferencias electromagnéticas (EMI). Además, para cambiar de un modo a otro es necesario tener un detector de corriente de salida y, como resultado, el control se vuelve complejo.

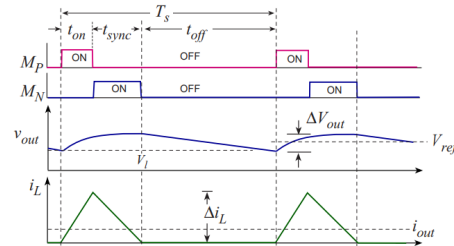


Fig. 3. Formas de onda ideales de la PFM síncrona en cargas ligeras (Olivier Trescases, 2011).

El T_{on} de la señal no puede elegirse de manera arbitraria debido a que, si se elige muy grande, el voltaje de salida se vería severamente afectado, como se muestra en la Fig.4 (Olivier Trescases, 2011). Se puede seleccionar un T_{on} óptimo por medio de:

$$T_{on,op} = \frac{(6V_{in}Q_T L^2)^{\frac{1}{3}}}{(V_{in}-V_{out})^{\frac{2}{3}}} (R_{on,P} + R_{on,N} \frac{V_{in}-V_{out}}{V_{out}})^{-1/3} \quad (2)$$

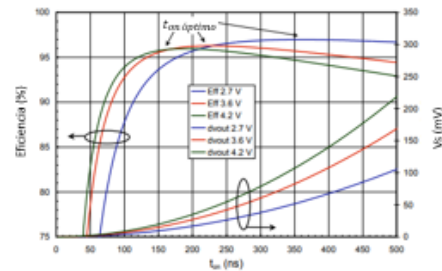


Fig. 4. Voltaje de salida y eficiencia teórica de PFM síncrona (Olivier Trescases, 2011).

2.2 Modulación por salto de pulso

Como se mencionó, existen algunas variantes de la PFM; un ejemplo es la modulación por salto de pulso (PSM). En esta modulación, cuando el voltaje de salida está por debajo del nivel de referencia seleccionado, el interruptor se acciona por un reloj externo con un periodo y un ciclo de trabajo fijos. Si sucede lo contrario, el pulso se salta inhabilitando el interruptor durante el intervalo de tiempo en el cual el voltaje de salida es mayor al voltaje de referencia (P. Luo, 2012).



Una de las principales desventajas de esta modulación son las ondulaciones que presenta el voltaje de salida cuando la carga o el voltaje de entrada cambian. Para solucionar esto se han implementado controles que, además de implementar la PSM, pueden controlar el voltaje de salida (VPSP). En la Fig.5 se observa un convertidor elevador con control de voltaje y PSM (Kapat, 2009).

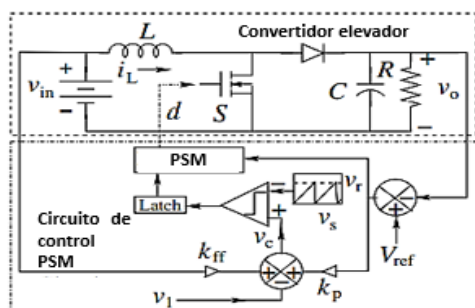


Fig. 5. Convertidor elevador con control de voltaje y PSM (VCPSM) (Kapat, 2009).

Finalmente, en el modo ráfaga se utiliza una ráfaga periódica de pulsos para cargar el capacitor de salida (Fig.2). En la Fig.6 se observan las formas de onda del convertidor reductor síncrono con una modulación en modo ráfaga; funciona con un ciclo de trabajo fijo, dando como resultado que los rizados de corriente en el inductor se reduzcan (Olivier Trescases, 2011).

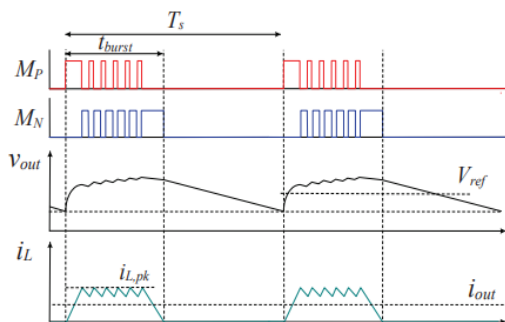


Fig. 6. Formas de onda ideales bajo control modo ráfaga (Olivier Trescases, 2011).

2.3 Optimización multiobjetivo

Uno de los algoritmos utilizados para mejorar la eficiencia es el multiobjetivo, el cual se utiliza para solucionar problemas en los que se requiere satisfacer simultáneamente un número de objetivos que presentan diferentes soluciones óptimas individuales. Se utiliza la optimización multiobjetivo para extraer el punto de máxima potencia en un arreglo de celdas fotovoltaicas y, a la vez, reducir las pérdidas por conducción y conmutación (A. Mendoza Mendoza, 2014). El algoritmo NSGA-II es uno de los más eficientes para encontrar resultados óptimos y es muy utilizado para solucionar problemas de optimización en la electrónica de potencia (Zhou, 2011).

Al aplicar el algoritmo se genera un conjunto de soluciones óptimas dentro de un espacio de solución llamado “Frente de Pareto”. Cada solución implica un compromiso particular para las funciones objetivo, y en la Fig.7 se observa la gráfica de incremento de eficiencia en cargas ligeras en un convertidor puente completo utilizando la optimización multiobjetivo.

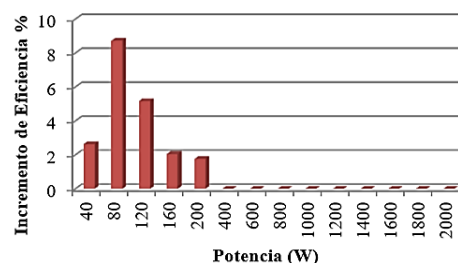


Fig. 7. Gráfica de incremento de eficiencia en cargas ligeras en un convertidor CD/CD (A. Mendoza Mendoza, 2014).

2.4 Desconexión de fases

En general, las técnicas mencionadas, como PFM Y PSM, se utilizan en convertidores con aplicaciones de corriente de carga muy baja o sistemas portátiles; por otro lado, el consumo de energía en microprocesadores, memorias (altamente dinámicas), circuitos de corrección del factor de potencia y reguladores de voltaje depende del consumo de la aplicación.

Es por esta razón que desconectar algunas fases durante periodos de carga ligera aumenta la eficiencia de los convertidores (Su, 2013). En la Fig.8 se muestra el esquema a bloques de un convertidor reductor multifase con control por desconexión de fases.

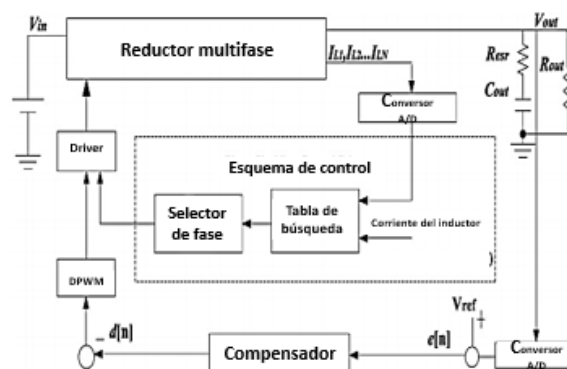


Fig. 8. Diagrama a bloques de un convertidor reductor multifase con control por desconexión de fases (Su, 2013).

3. SOLUCIONES A NIVEL CIRCUITO

Existen casos en los cuales el convertidor de potencia tiene un rango impredecible de frecuencia (Olivier Trescases, 2011); por ejemplo, en las unidades de control electrónico en aplicaciones automotrices. Debido a esto, no se pueden usar técnicas de frecuencia variable y se recurre a técnicas a nivel circuito, a frecuencia fija, para mitigar las pérdidas en cargas ligeras sin afectar el funcionamiento del convertidor (A. Parayandeh, 2009).

3.1 Interruptores híbridos

Una de las técnicas utilizadas para mejorar la eficiencia en cargas ligeras se basa en la combinación de interruptores IGBT o MOSFET, lo que disminuye las pérdidas por conmutación (Akca, 2015). Los MOSFET de doble compuerta se utilizan para mejorar la eficiencia ante cargas ligeras con frecuencias de conmutación elevadas. Esto es posible debido a que en la combinación de doble compuerta se reducen la capacitancia de entrada y las pérdidas por accionamiento de compuerta. El principio de operación implica dos interruptores en paralelo, de área y ancho de compuerta distintos, los que conmutan de manera simultánea cuando en el convertidor se conectan cargas elevadas; cuando se detectan cargas ligeras, solamente conmuta el dispositivo más pequeño. Este concepto se basa en que la mayoría de las pérdidas en un convertidor CD/CD de bajo voltaje operando a frecuencias elevadas resulta de la activación de la capacitancia del MOSFET (R. Williams, 1997). Cuando el convertidor tiene cargas elevadas, ambos interruptores funcionan con un PWM convencional de frecuencia fija. Cuando se detecta una condición de carga ligera, la compuerta del interruptor más grande (M2, en la Fig.9) se aterriza, lo que deja a M1 como único interruptor en conmutación. Como la compuerta de M2 es más ancha, la eficiencia aumenta cuando éste deja de conmutar (Fig.10).

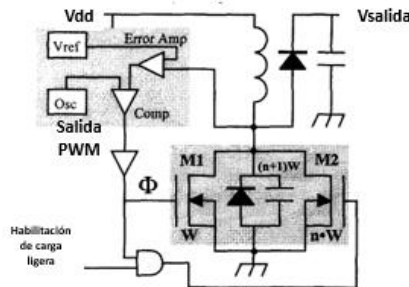


Fig. 9. Circuito con interruptores híbridos (R. Williams, 1997).

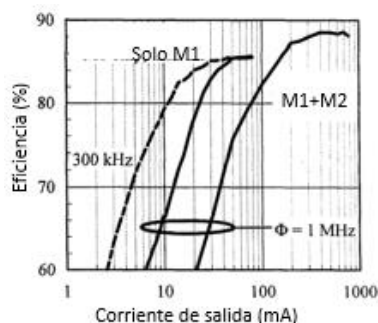


Fig. 10. Eficiencia medida con interruptores híbridos (R. Williams, 1997).

3.2 Circuitos resonantes

En la actualidad se han aplicado sistemas de almacenamiento de energía en sistemas de microrredes en CD (N. Hatzigiorgiou, 2008), (T. Dragiević, 2016). Es importante que los sistemas de almacenamiento tengan una buena eficiencia en un intervalo amplio de carga, debido a que las oscilaciones de potencia pueden abarcar un intervalo amplio; además, el voltaje se ve afectado por la carga y descarga de una batería (Lance, 2017). Usualmente, para obtener bidireccionalidad en este tipo de sistemas se utilizan convertidores tipo elevador-reductor, pero la conmutación dura no es una opción viable debido a las pérdidas que produce (Higa, 2018). Una solución muy utilizada para este tipo de aplicaciones es la conmutación suave, en específico la conmutación a voltaje cero (ZVS) con circuitos resonantes adicionales a la topología seleccionada. En estos métodos el intervalo del ciclo de trabajo está limitado por el periodo de resonancia (Higa, 2018). En la Fig.11 se muestran las formas de onda del funcionamiento de conmutación con ZVS del convertidor bidireccional reductor-elevador.

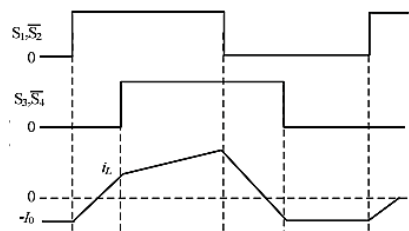


Fig. 11. Formas de onda de conmutación ZVS (Higa, 2018).

4. COMPARACION

Las seis técnicas para mejorar la eficiencia a cargas ligeras cubiertas en este trabajo se contrastan en la Tabla I. En cuanto a la eficiencia, con las seis técnicas se obtienen mejoras ante cargas ligeras, y con algunas se observan incluso en un amplio intervalo de carga. Por ejemplo, con la PFM la eficiencia aumenta un 5% (Ciaran & Dr. Maeve, 2012), y con la PSM aumenta hasta un 3% en comparación con una PWM convencional (Ping Luo, 2009); además, si estas técnicas se combinan con la PWM se pueden obtener eficiencias constantes a lo largo de un amplio intervalo de carga.

Con la desconexión de fases (*phase shedding*), la eficiencia se incrementa entre un 3-5% en los puntos óptimos de conmutación de carga (Su, 2013), [23]. En caso del algoritmo NSGA-II, el incremento alcanza el 8% debido a la disminución de pérdidas en los interruptores (Zhou, "Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art," 2011). Por lo que atañe a los interruptores híbridos, los aumentos llegan al intervalo entre el 8 % y el 10% (Akca, 2015). Si se utiliza la conmutación suave puede aumentarse en un 13% la eficiencia [22], lo cual representa el mejor caso entre los analizados (Betanzo, 2016). Finalmente, en los circuitos resonantes se observan incrementos en la eficiencia de entre 5% y 8% (Siyan Zhou, 2006).



TABLA I

CONTRASTE DE LAS TÉCNICAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA A CARGAS LIGERAS

	PFM PWM	PSM PWM	NSGA- II	PS	IH	CR
SECCIÓN						
INTERRUPTOR ADICIONAL	NO	NO	NO	NO	SI	NO
INDUCTOR ADICIONAL	NO	NO	NO	SI	NO	SI
CAPACITOR ADICIONAL	NO	NO	NO	NO	NO	SI
PROBLEMAS CON EMI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
BUENA EFICIENCIA A LO LARGO DEL INTERVALO DE CARGA	SI	SI	SI	NO	NO	NO
OPTIMIZACIÓN EXTRA	NO	NO	NO	SI	SI	SI

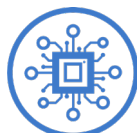
PS=desconexión de fases (phase shedding, IH= interruptores híbridos, CR=circuitos resonantes.

5. CONCLUSIONES

Mantener una eficiencia elevada en condiciones de carga ligera se ha convertido en un tema importante y necesario para muchas de las aplicaciones actuales. En este documento se describen seis de las técnicas utilizadas para mejorar la eficiencia en cargas ligeras; cada una de ellas ofrece distintos resultados con sus diferentes combinaciones. Ejemplo de ello son la modulación por frecuencia de pulso, la PSM o el modo ráfaga las cuales, al combinarlas con PWM, permiten obtener una alta eficiencia a lo largo del intervalo de carga, aunque sacrificando un poco los rizados de voltaje a la salida y (en el caso de PFM) la interferencia electromagnética. Para casos donde no se pueden utilizar técnicas de frecuencia variable se presentan opciones como interruptores híbridos y circuitos resonantes, los cuales ofrecen buena eficiencia con rizados de voltaje pequeños, aunque utilizando componentes extra. Las mejoras de eficiencia y la relación costo/beneficio deben considerarse para cada aplicación individual. La inclusión de elementos adicionales puede impactar no solamente en el costo, sino también en el volumen, en el peso, y en la confiabilidad del convertidor.

REFERENCIAS

- A. Mendoza Mendoza, T. J. (2014). Optimización multiobjetivo en una cadena de suministro. *Ciencias Estratégicas*, 22(32), 295.
- A. Parayandeh, C. P. (2009). "Digitally controlled low-power dc-dc converter with instantaneous on-line efficiency optimization,". *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 159-163.
- Akca, H. &. (2015). Hybrid switch use for light load efficiency improvement of a power inverter for stand-alone residential renewable energy system. *European Conference*. Istanbul.
- Betanzo, C. C. (2016). *Estudio de la Mejora de la Eficiencia ante Cargas Ligeras de un Inversor sin Transformador Orientado a Microrredes en CD(Tesis de Maestría)*.
- Ciaran, F., & Dr. Maeve, D. (2012). Comparison of light-load improvement techniques for low power buck converters. *International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. Galway, Ireland.
- Higa, H. S. (2018). Improvement of Light Load Efficiency for Buck-Boost DC-DC converter with ZVS using Switched Auxiliary Inductors. *IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition*.
- Jinwen, X. (2004). "A 4- μ a quiescent-current dual mode digitally controlled buck converter IC for cellular phone applications,". *Solid-State Circuits, IEEE Journal*, 39, 2342-2348.
- Kapat, S. B. (2009). Voltage controlled pulse skipping modulation: Extension towards the ultra light load. . *IEEE International Symposium on Circuits and System*. Kharagpur.
- Lance, G. (2017). "Energy storage systems (ESS) and microgrids in Brittany islands". *CIRED - Open Access Proceedings Journal*, 1(1), 1741-1744.
- N. Hatziargyriou, H. A. (2008). "Microgrids". *IEEE Power Energy Mag*, 6(3), 78-94.
- Olivier Trescases, Y. W. (2011). A Survey of Light-Load Efficiency Improvement Techniques for Low-Power DC-DC Converters. *8th International Conference on Power Electronics*. The Shilla Jeju, Korea.
- Olivier Trescases, Yue Wen.
- P. Luo, L. L. (2012). "Skip cycle modulation in switching DC-DC converter". *IEEE ICCCS*.
- Ping Luo, W. D. (2009). A high energy efficiency PSM/PWM dual-mode for DC-DC converter in portable applications. *International Conference on Communications, Circuits and Systems*. The Shilla Jeju, Korea.
- R. Williams, W. G. (1997). The dual-gate W-switched power MOSFET: a new concept for improving light load efficiency in DC/DC converters. *IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*, 193-196.
- Sahu, B., & Rincon-Mora, G. (2007). "An accurate, low-voltage, cmos switching power supply with adaptive on-time pulse-frequency modulation (PFM) control,". *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 54(2), 312-321.
- Siyuan Zhou, G. A.-M. (2006). A High Efficiency, Soft Switching DC-DC Converter With Adaptive Current-Ripple Control for Portable Applications. *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS*, 53(4), 319-323.
- Su, J.-T. &. W. (2013). A Novel Phase-Shedding Control Scheme for Improved Light Load Efficiency of Multiphase Interleaved DC-DC Converters. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 28(10).
- T. Dragiević, X. L. (2016). "DC Microgrids—Part II: A Review of Power Architectures, Applications, and Standardization Issues,". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(5), 3528-3549.
- Xunwei, Z. (1997). "Optimizing design for low voltage DC-DC converters,". *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2, 612-616.
- Yie, T., & Cing-Hong, C. (2009). A DC-DC Buck Converter Chip with Integrated PWM/PFM Hybrid-Mode Control Circuit. *International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. Taiwan.
- Zhou, A. (2011). "Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art,". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1(1), 32-49.



Desarrollo de un Simulador de Sistemas Dinámicos para Aplicación en Métodos Heurísticos de Optimización

Diego Martínez Guillén * Domingo Cortés Rodríguez **
Francisco Hernández Salas ***

* Instituto Politécnico Nacional, ESIME Culhuacán, Ciudad de México(e-mail: diegomtzg@hotmail.com).

** Instituto Politécnico Nacional, ESIME Culhuacán, Ciudad de México(e-mail: domingo.cortes@gmail.com).

*** Instituto Politécnico Nacional, ESIME Culhuacán, Ciudad de México(e-mail: fhernandezs094@gmail.com).

Resumen: Se presenta el desarrollo de un simulador en lenguaje lisp capaz de especificar sistemas dinámicos con la versatilidad de construir nuevas estructuras a partir de estructuras previamente definidas. Para ello se crea la arquitectura base que el ingeniero en control pueda manipular de manera sencilla e intuitiva. El simulador permite realizar un gran número de simulaciones mediante la variación iterativa de parámetros y condiciones iniciales. Además de la opción de filtrar aquellas simulaciones que cumplan con un criterio de interés o hacer combinaciones de sistemas en diversas configuraciones deseadas. De esta manera se puede simular un sistema bajo un gran número de condiciones sin necesidad de intervención del usuario.

Keywords: differential equations, domain specific language, dynamical systems, simulation.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen programas capaces de simular ecuaciones diferenciales usando diversos métodos de integración y ante diversas condiciones iniciales. Dentro de estos programas pueden mencionarse Matlab/Simulink, Xppaut, Octave, SageMath, Mathematica entre otros. Aunque estos programas pueden simular ecuaciones diferenciales con diversas opciones configurables, requieren la atención constante del usuario para definir el sistema dinámico, cambiar parámetros, condiciones iniciales, probar diferentes entradas, cambiar las características del sistema y otras modificaciones que se requieran llevar a cabo en el sistema [Gaviño (2010)].

Existen programas que mantienen sus procesos ocultos, como Matlab/Simulink, por lo que realizar modificaciones o entender la forma en la que se ejecutan puede significar una gran dificultad. Varias de las tareas pueden automatizarse y ser especificadas al inicio, para posteriormente lograr que la computadora realice un gran número de simulaciones una por una [Tewari (2002)]. En general, la construcción de un sistema grande exige mucho tiempo y conlleva una alta probabilidad de cometer errores y dificultad al identificarlos.

Matlab también es un lenguaje por lo que es factible haberse programado el simulador propuesto en código ".m" (Código

de Matlab), pero dado que uno de los problemas de este lenguaje es la falta de estándares así como poco acceso al bajo nivel del mismo, se optó por lisp, ya que poder usar funciones como argumento de otras funciones o procedimientos ayuda y facilita el crecimiento del programa.

Xppaut, es un programa que permite realizar el cambio de parámetros, condiciones iniciales entre otros cambios posibles de forma semiautomática, sin embargo, no puede programarse con el uso de ciclos o condicionales. En el caso de Simulink, se requiere el uso de bloques y crear conexiones entre ellos, lo que dificulta el manejo de sistemas donde se necesita utilizar varias ecuaciones [Ermentrout (2002)].

Para resolver estos inconvenientes es necesario construir un simulador programable [Vöth (2006)]. Para lograrlo hay que desarrollar un lenguaje de dominio específico que haga más sencilla la especificación de sistemas dinámicos, el cambio de parámetros, de condiciones iniciales y de entradas. También es conveniente lograr la creación de diferentes estructuras de sistemas, para después nombrarlas y crear bloques que puedan ser reutilizados. Estas acciones pueden ser programables para lograr la simulación de sistemas solo con el cambio de sus atributos de manera recursiva y, al mismo tiempo, poder aplicar otros procedimientos a los resultados. Esto hará que se abra un abanico de posibilidades en las características que se podrán simular [Kirk (2004)]. Al ser programable y libre es posible crear nuevas



funciones a través del uso de estructuras o procedimientos ya desarrollados para que sea un lenguaje escalable.

2. MÉTODOS

Características deseables y Estructura del simulador programable:

- Instrucciones para la ejecución de tareas complejas como la composición, retroalimentación y filtrado de sistemas.
- Posibilidad de nombrar sistemas como un objeto nuevo para ser reutilizado junto con otras características del programa.
- Expresiones sencillas para la especificación de sistemas.
- Capacidad de usar los resultados fuera del programa.
- Funciones que puedan usarse como argumento en otra función.
- Modularidad en los procedimientos.

El programa se desarrolla en scheme [Friedman (1995)], con el objetivo de explotar las características de la programación funcional. En específico el uso de funciones que devuelven funciones y éstas, a su vez, poder utilizarse como argumento en otras funciones.

El programa está seccionado en módulos y se describen los principales a continuación:

2.1 Reloj

El reloj ("clock") es el encargado de identificar todos los procedimientos necesarios para ser ejecutados al inicio de una simulación, los que se requieren para avanzar al siguiente estado y los que se ejecutaran al finalizar la simulación.

El "clock" almacena diferentes listas de procedimientos que se ejecutan al iniciar una simulación. Estas listas de procedimientos inicializan los diversos módulos para dar comienzo a la simulación. En cada paso de integración o "tic" del reloj se ejecutan los procedimientos para la actualización de todos los bloques.

En el momento de la creación de cualquier tipo de bloque, éste informa al reloj cuales son sus procedimientos de inicialización, actualización de avance al "tic" del reloj y los procedimientos que deberán de ejecutarse al finalizar una simulación. Durante una simulación el "clock" mantiene el tiempo de simulación "sim-time" y el paso de integración "dt".

Al iniciarse la simulación, el reloj recibe el mensaje "init-sim!" que ejecuta todos los procedimientos de inicialización. Después de iniciada una simulación, cada vez que el reloj recibe el mensaje "tic!" ejecuta todos los procedimientos necesarios para avanzar el estado del sistema al siguiente tiempo.

Hay un objeto que controla la simulación (sim). Este objeto se encarga de mandar los mensajes "init-sim!", "tic!" y "end-sim!" al reloj. El procedimiento (make-clock) crea un

objeto con todas las características descritas. El simulador sólo requiere de un reloj por lo que se define el objeto "sim-clock" es conocido en todo el programa.

2.2 Bloques de sistemas estáticos

Para crear un sistema estático "static-sys" se requiere especificar únicamente el número de entradas y de salidas denotadas por "n-in" y "n-out" respectivamente.

El comportamiento de un sistema estático se especifica con una lista de expresiones simbólicas ("s-expression"). En "la s-expression" pueden existir símbolos que denotan entradas y símbolos que denotan parámetros. Por ello es necesario especificar los símbolos para las entradas y los símbolos para los parámetros. Y se debe especificar los valores e los parámetros antes de iniciar una simulación.

Cuando se crea un sistema estático se crean "n-in" alambres de entrada y "n-out" alambres de salida. Inicialmente estos alambres son del tipo "null-wire" que posteriormente se sustituirán por alambres que provengan o vayan a otros bloques. Un "null-wire" es un alambre cuya señal siempre es cero.

Cada bloque de sistema estático admite mensajes para recuperar o asignar información general como: número de entradas, el número de salidas, alambres de entrada, alambres de salida, lista de símbolos de entradas, lista de símbolos para los parámetros, expresiones simbólicas, valor de los parámetros y establecer el alambrado con otros bloques.

2.3 Bloques de sistemas dinámicos

El procedimiento "make-dynsys" crea un sistema dinámico. Para ello es necesario pasarle el número de entradas y salidas.

Un sistema dinámico contiene todos los elementos y características de un sistema estático. Además un sistema dinámico debe mantener las expresiones para las derivadas de los estados "state-expr". Como consecuencia también es necesario especificar los símbolos que denotan los estados "state-symb" y antes de una simulación son necesarias las condiciones iniciales "init-cond".

La integración de los estados de un sistema dinámico se hace usando la biblioteca de ordinary differential equation proporcionada por [Williams (2002)] para dar solución a las ecuaciones diferenciales.

El procedimiento "update-output!" evalúa las expresiones que determinan la salida del sistema y actualiza la señal de los alambres de salida. Este procedimiento se ejecuta al iniciar la simulación y en cada "tic" del reloj.

2.4 Bloques de fuentes

El procedimiento "make-src" crea un bloque del tipo fuente. Para ello es necesario pasarle el número de salidas.

Los bloques de fuentes son como los sistemas estáticos pero no tienen alambres de entrada. Así, no incluyen todos los



datos y procedimientos de los sistemas estáticos que se refieren a las entradas.

Por ejemplo, en los bloques de fuentes las expresiones de salida no incluyen símbolos que denoten entradas. Dichas expresiones sólo dependen de símbolos que denotan parámetros y del símbolo “t” que denota el tiempo de simulación. El valor de este símbolo se obtiene del reloj.

2.5 Bloques de osciloscopio

Un bloque de osciloscopio se crea con el procedimiento “make-scope”. Dicho procedimiento recibe un número que especifica el número de entradas, siendo 1 por defecto.

A diferencia del resto de los bloques el osciloscopio no tiene expresiones que definan su comportamiento. El objetivo de este bloque es almacenar las señales de los alambres de entrada durante una simulación.

Durante una simulación los datos del osciloscopio “data” se almacenan en un vector que puede crecer.

El procedimiento “init-scope” limpia los datos almacenados en el osciloscopio (por si hubiera una simulación previa) y captura el valor de la señal de los alambres de entrada en el tiempo “t0”. El procedimiento “add-newdata” agrega los datos de entrada a los datos almacenados en el osciloscopio. Este procedimiento se ejecuta en cada “tic” del reloj. El procedimiento “add-data-to-results” transfiere los datos almacenados en el osciloscopio a un “almacén” de resultados de simulación. Este procedimiento se ejecuta al término de una simulación.

2.6 Alambres

El procedimiento “make-wire” crea un alambre. Un alambre es un objeto que mantiene un valor que se interpreta como el valor de una señal en un tiempo determinado.

Un alambre admite dos mensajes: “get-signal” que devuelve el valor de la señal y “set-signal” que recibe un valor y modifica el valor de la señal para que adquiera el valor recibido.

El procedimiento “make-wires” recibe “n” y crea una lista de “n” alambres.

Cuando los bloques se crean, no se sabe como van a ser conectados, sin embargo es conveniente crear en ese momento los alambres de entrada y salida. Para ello se crean alambres nulos “null-wire”. Un alambre nulo es un objeto cuyo valor siempre es cero. El procedimiento “make-null-wire” crea un alambre nulo y el procedimiento “make-null-wires” crea una lista de alambres nulos.

2.7 Conexiones

Un alambre realiza una conexión (“connection”) de un puerto (“pto”) de salida de un bloque a un puerto de entrada a otro bloque. Un puerto se representa con una lista de dos elementos: un bloque y un número. El número indica a cuál de las entradas o salidas del bloque se refiere.

La numeración de entradas y salidas de un bloque empieza de cero.

El procedimiento que realiza una conexión, esto es, conectar dos puertos se llama “wire-up!”. El procedimiento “wire-up!” recibe dos puertos, uno de salida de un bloque (oport) y otro de entrada a otro bloque (iport). “wire-up!” examina si ya existe un alambre que sale del “oport”, crea un alambre nuevo y realiza la conexión entre el “oport” y el “iport”. Si ya existiera un alambre que sale del “oport” entonces se utiliza el mismo alambre y solo se realiza la conexión al “iport”. En cualquier caso se agrega la “connection” a una lista de “connections” llamada “sim-graph”. El mantener esta lista permite saber si un “oport” ya ha sido conectado o no.

La conexión se realiza mandando a los bloques del “oport” e “iport” los mensajes de “set-out-connexion!” y “set-in-connexion!” respectivamente. Estos mensajes requieren que se especifique el alambre y el número de puerto.

El procedimiento “make-sim-graph” crea un objeto que mantiene una lista de conexiones “connections”. Este objeto admite dos mensajes: “add-connexion!” que agrega una conexión a la lista y “graph” que devuelve la lista de conexiones.

2.8 Procedimientos para el control de una simulación

Para realizar varias simulaciones ininterrumpidas es conveniente guardar los resultados de cada simulación. El procedimiento “make-sim-results” crea un objeto que puede agregar resultados de simulación conforme se vayan generando. Cada resultado de una simulación es un elemento de un vector que puede crecer, de ese modo al generarse un nuevo resultado de simulación se agregará al final del vector.

El procedimiento “make-sim-prmtr” crea un objeto que mantiene las variables, “init-time” (almacena el tiempo inicial de simulación), “end-time” (almacena el tiempo final de simulación), “dt” (guarda el paso de integración) e “int-method” que posee el algoritmo de integración.

El procedimiento “sim” realiza una simulación. Para ello extrae los datos de “sim-prmtr”. Manda el mensaje de inicialización al reloj y después manda un “tic” al reloj hasta que se alcance el tiempo final de simulación. Cuando el tiempo final es alcanzado se manda el mensaje de fin de simulación al reloj.

3. EJEMPLOS

3.1 Ejemplo 1

En este ejemplo se ilustra la conexión entre bloques, como se observa en el Código 1, primero se realiza la definición de la fuente, para este caso un PWM con: amplitud (-1,1), tiempo en alto de 2 segundos, tiempo en bajo 0.5 segundos y offset de 5; a continuación se crea un “scope” seguido del cableado del puerto de la fuente-pwm (pwmsource) con el osciloscopio (scope1), finalmente se procede a estipular el rango de la simulación y la ejecución de la misma.



Código 1. Definición de una Fuente-PWM conectada a Osciloscopio

```
(define pwmsource (make-pwm-src -1 2 .5 5))
(define scope1 (make-scope))
(wire-up! (pto pwmsource) (pto scope1))
(sim-prmtr 'set-interval! 0.0 8.0)
(sim)
(plot-matrix (scope1 'data))
```

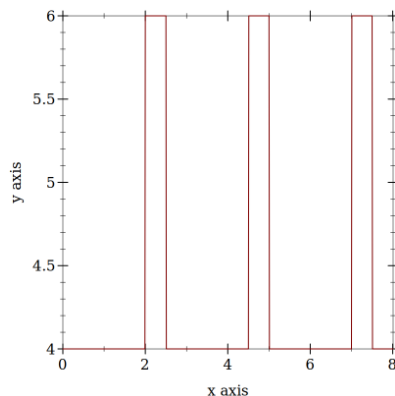


Fig. 1. Simulación de una fuente PWM.

El resultado de los datos del scope1 son mostrados en la gráfica de la Figura 1.

3.2 Ejemplo 2

La simulación de un sistema dinámico se caracteriza en que además de las características de un bloque estático deben de agregarse expresiones que representen a los estados, en el caso del ejemplo mostrado en el Código 2 se describen las expresiones de estado, que se añaden los 4 estados de un péndulo invertido, así como también los símbolos de los estados, de los parámetros y sus valores numéricos asignados.

El resultado mostrado en la Figura 2, muestra la simulación con condiciones iniciales en $[0 \ 0 \ 3.1415 \ 0]$, lo que representa el inicio del péndulo posicionado cerca de la parte superior y con velocidades nulas.

3.3 Ejemplo3

En la Figura 3 se muestra la simulación de una fuente senoidal en contraste con la misma fuente amplificada por el paso de una cascada de ganancias, en el Código 3 se muestra la metodología para crear dicha cascada.

La combinación de diversos sistemas con diferentes estructuras es posible debido a la independencia de los sistemas como bloques individuales. La posible interconexión en varias configuraciones deseables da un panorama extenso para la creación y ejecución de muchas pruebas y al automatizar las simulaciones pueden crearse decenas o miles de

Código 2. Expresiones de Estado de Péndulo Invertido

```
(sys 'set-state-expr! '(
(x2)
(/ (+ (- F (* b x2))
(* 1 mp (sin x3) x4 x4)
(* mp g (sin x3) (cos x3))
(/ (* d x4 mp (cos x3)) 1))
(- (+ Mc mp) (* mp (cos x3)(cos x3))))
(x4)
(/ (- 0.0 (+ (* g (sin x3))
(/ (* d x4) 1)
(* (cos x3) (/ (+ (- F (* b x2))
(* 1 mp (sin x3) x4 x4) (* mp g (sin x3)
(cos x3)) (/ (* d x4 mp (cos x3)) 1))
(- (+ Mc mp) (* mp (cos x3)
(cos x3)))))) 1)))
(sys 'set-out-expr! '(x3))
(sys 'set-state-symb!
'(x1 x2 x3 x4) )
(sys 'set-prmtr-symb!
'(mp Mc l b d g) )
(sys 'set-init-cond!
'(0.0 0.0 3.1415 0.0) )
(sys 'set-in-symb! '(F) )
(sys 'set-prmtr-val!
'(0.3 1.8 0.2 0.4 0.04 9.81) )
```

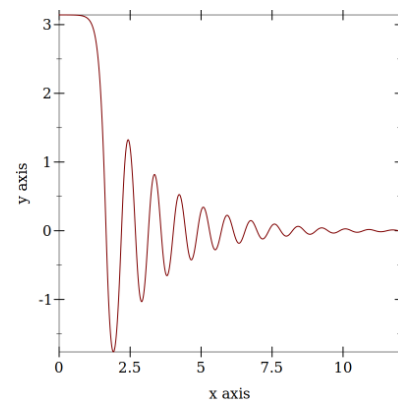


Fig. 2. Simulación de la posición angular de un péndulo invertido.

Código 3. Definición de una conexión en Cascada

```
(define src (make-sin-src))
(define scp (make-scope 2))
(define g0 (make-gain 1.2))
(define g1 (make-gain 2.7))
(define g2 (make-gain 1.5))
(define cascade-gain (cascade g0 g1 g2))
(wire-up! (pto src) (pto cascade-gain))
(wire-up! (pto src) (pto scp 0))
(wire-up! (pto cascade-gain) (pto scp 1))
(sim)
(plot-matrix (scp 'data))
```



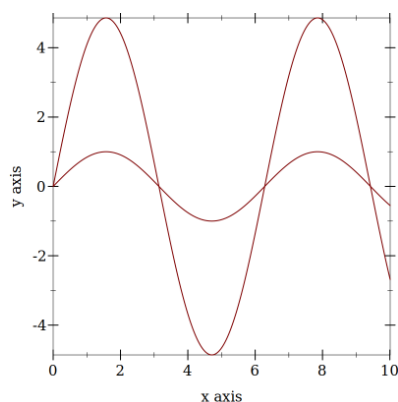


Fig. 3. Simulación de Fuente Senoidal con ganancias en cascada.

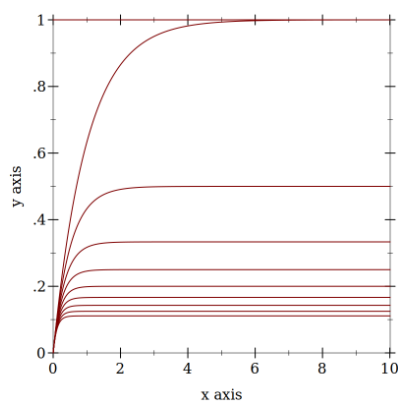


Fig. 4. Simulación de un sistema con variación iterativa de parámetros.

simulaciones con variación de parámetros como se observa en la Figura 4, donde se realiza la simulación de un sistema en lazo cerrado con la variación de parámetros de un control proporcional común.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se describe y precisa la primera versión de un simulador programable. La herramienta aún se encuentra en desarrollo, pero busca que el usuario pueda especificar de manera sencilla las pruebas que desea realizar y así, poder crear muchas simulaciones de manera automática sin supervisión, así mismo como programador se busca el que los módulos sean fáciles de escalar para poder crear modelos más complicados que sirvan como plantillas a proyectos futuros. Este simulador permite expresar un sistema dinámico, las entradas y las condiciones iniciales, y además permite interconectar sistemas de manera sencilla, para generar sistemas complejos a partir de sistemas simples. Asimismo, el simulador permite la especificación de una simulación con un gran número de entradas, variación de parámetros y condiciones iniciales. De esta forma es posible precisar de una sola vez todas las condiciones bajo

las que se busca simular un sistema para que, posteriormente, la computadora haga una a una cada simulación de manera automática. También se pretende que el simulador sea capaz de guardar solamente aquellas simulaciones que cumplan con un criterio preestablecido.

Las partes que hace falta desarrollar en el simulador son:

Módulo de Filtrado: Capaz de ser aplicado a las listas de simulaciones. De esta manera se podrá obtener “el sistema más rápido”, “el sistema con menor sobre impulso”, “el sistema que siga de manera más fiel una función de referencia”, etc.

Módulo de Optimización: Al poderse realizar varias simulaciones se busca que el usuario pueda especificar criterios de interés, también fungir como una herramienta intermedia la cual pueda tomar controladores generados por otras herramientas con diversas técnicas de optimización (Programación Genética, Optimización por enjambres de partículas, etc.), simularlos y así poder ser evaluados para dar un peso a cada simulación y ayudar a la elección de mejores controladores tanto en estructura como en elección de parámetros.

REFERENCES

- Abelson, H. and Sussman, G. J. (1996). *Structure and Interpretation of Computer Programs*.
- Dorf, R. C. and Bishop, R. H. (2005). *Sistemas de control moderno*.
- Ermentrout, B. (2002). *Simulating, Analyzing, and Animating Dynamical Systems*.
- Friedman, D. P., Felleisen, M., and Sussman, G. J. (1995). *The Little Schemer*. The MIT Press.
- Gaviño, R. H. (2010). *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*.
- Kirk, D. E. (2004). *Optimal control theory: An introduction*.
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático*.
- Tewari, A. (2002). *Modern Control Design With MATLAB and SIMULINK*.
- Vöth, S. (2006). *Dynamik schwingungsfähiger Systeme*.
- Williams, (2002). <https://planet.racket-lang.org/package-source/williams/science.plt/4/2/planet-docs/science/ode.html>.



Arreglo experimental de bajo costo para el análisis del comportamiento de un panel fotovoltaico en relación con la temperatura

Paulo Ángel Meza López*, Ricardo Marroquín Arreola**
Héctor Ricardo Hernández de León ***

* Departamento de posgrado, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, CP 29050 México, (e-mail: paulo_rolan@hotmail.com).

** Departamento de posgrado, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, CP 29050 México, (e-mail: marroquinarreola@gmail.com)

*** Departamento de posgrado, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, CP 29050 México, (e-mail: hhernandezd@ittg.edu.mx)

Resumen: En este trabajo se muestra los resultados obtenidos de la simulación de un panel solar de 36 celdas con la herramienta Quite Universal Circuit Simulator (QUCS). Se realizaron series de mediciones de corriente en corto circuito (ISC) y voltaje en circuito abierto (VOC) generadas por el panel solar, además de la medición de la temperatura del panel bajo diferentes condiciones de radiación. Se presenta el diseño de un sistema de medición de bajo costo que permite realizar la captura de las mediciones de ISC y VOC de forma autónoma y haciendo más rápida la toma de los datos en comparación con hacerlas de forma convencional con un multímetro.

Palabras clave: celdas solares, energía solar, panel solar, temperatura del panel, punto de máxima potencia.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la demanda de energía ha motivado una sobreexplotación de las fuentes de energía convencionales (Rus-Casas, 2014). Por tanto, el uso progresivo de la fuente de energía renovable se ha convertido en esencial. Así, la energía fotovoltaica (EF) juega un papel importante como una forma de energía limpia y eficiente de generar electricidad. Estimar la energía proporcionada por los generadores fotovoltaicos es importante para analizar su viabilidad, supervisar su funcionamiento y garantizar óptima recolección de energía. Un generador fotovoltaico (GF) puede ser definido como un conjunto de módulos interconectados eléctricamente en combinaciones paralelas (controlador de carga y convertidor cd-cd) (M.C, 2004). También incluye los cables y estructura que interconectan dichos módulos. La energía proporcionada por un GF depende de los parámetros atmosféricos, las características eléctricas del generador y su orientación e inclinación (Dubey, 2013). La recolección de energía de un GF es directamente proporcional a la irradiación global recibida en el plano del generador. Este valor no es real (P. 2012) (Khalifa, 2011) y deben tomarse en cuenta situaciones reales de pérdidas de energía producida, como las ocasionadas por la temperatura, desajuste, suciedad y polvo. Entonces, el cálculo de la recolección de energía de un GF no es trivial y requiere de la integración de métodos y algoritmos para su cálculo (Li, 2019).

En (Skoplaki, 2009) se presenta una breve discusión sobre la temperatura de operación de módulos / células solares basadas

en silicio de grado comercial de un sol y su efecto sobre el rendimiento eléctrico de las instalaciones fotovoltaicas. Se proporcionan tabulaciones adecuadas para la mayoría de las formas algebraicas conocidas que expresan la dependencia de la temperatura de la eficiencia eléctrica solar y, de manera equivalente, la energía solar. Finalmente, se discuten brevemente los aspectos térmicos de los principales métodos de clasificación de potencia / energía.

En (Beriber, 2013) se propone un estudio comparativo detallado de cuatro técnicas de seguimiento de potencia máxima: Perturbación y Observación (P&O), Conductancia Incremental (InC), técnica de seguimiento basada en lógica difusa y un método, menos conocido, que utiliza solo la medición de corriente fotovoltaica. El inconveniente de los tres métodos estudiados; P&O, InC y un algoritmo de sensor, es que, en estado estable, el punto de operación oscila alrededor del punto de máxima potencia, lo que genera el desperdicio de energía disponible del panel de salida. Los resultados de la simulación muestran que el controlador lógico difuso propuesto (FLC) puede proporcionar una potencia máxima de rastreo más rápida y estable en comparación con los otros métodos estudiados.

El trabajo realizado en (Rezk, 2015) tuvo como objetivo estudiar el comportamiento de diferentes técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) aplicadas a los sistemas fotovoltaicos. En este trabajo, se evalúan técnicas como el ascenso de pendientes (HC), la conductancia incremental (INC), la perturbación y la observación (P&O) y el controlador de



lógica difusa (FLC). Se simuló un modelo de módulo fotovoltaico y convertidor de refuerzo de CC / CC con las diferentes técnicas de MPPT utilizando el software PSIM y Simulink. La co-simulación entre los paquetes de software PSIM y Simulink se utiliza para establecer la técnica FLC MPPT. La co-simulación se realiza para aprovechar cada programa y manejar cierta parte del sistema.

Otros autores presentan una nueva técnica de MPPT basada en el control de FL y el algoritmo P&O. El método propuesto incorpora las ventajas del P & O-MPPT para tener en cuenta los cambios lentos y rápidos en la irradiancia solar y el tiempo de procesamiento reducido para que el FL-MPPT resuelva problemas complejos de ingeniería cuando las funciones de membresía son pocas (Al-Majidi, 2018). La prueba estándar EN 50530 se utiliza para calcular la eficiencia del método propuesto en diferentes condiciones climáticas. Los resultados de la simulación demuestran que la técnica propuesta rastrea con precisión el punto de máxima potencia y evita el problema de la deriva, al tiempo que alcanza eficiencias superiores al 99.6%.

2. METODOLOGÍA

Desde la perspectiva de un circuito, una célula solar puede ser modelada por una fuente de corriente ideal (I_{ph}) en paralelo con un diodo y una resistencia R_{SH} , y a la salida una resistencia en serie R_S como se observa en la Fig. 1. Tomando en cuenta que la dirección de la fuente de corriente se opone al flujo de corriente del diodo (Mamur, 2015).

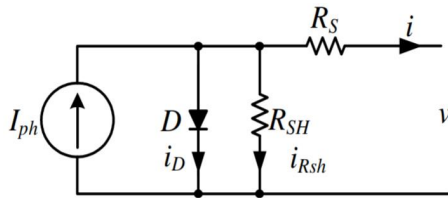


Fig. 1. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica utilizando el modelo exponencial.

Como se observa en la figura anterior, I_{ph} es la corriente fotogenerada en el Standard Test Condition (STC), i es la corriente de saturación oscura en STC, R_S es la resistencia de la serie de paneles, R_{SH} es la resistencia paralela del panel (derivación) (Subudhi, 2013).

La característica corriente-voltaje de un panel FV en el modelo exponencial es:

$$i = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{v+iR_S}{n_s v_t}} - 1 \right) - \frac{v+iR_S}{R_{sh}} \quad (1)$$

V_t es el voltaje térmico de la unión:

$$V_t = \frac{AKT_{stc}}{q} \quad (2)$$

La ecuación (1) puede escribirse para I_{sc} , I_{mpp} e I_{oc} :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{v+iR_S}{n_s v_t}} \right) - \frac{I_{sc}+R_S}{R_{sh}} \quad (3)$$

Para corriente en el mpp en STC (I_{mpp}):

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_S}{n_s v_t}} \right) - \frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_S}{R_{sh}} \quad (4)$$

Para corriente en circuito abierto (I_{oc}):

$$I_{oc} = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{V_{oc}}{n_s v_t}} \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (5)$$

Donde I_{sc} es la corriente de corto circuito en STC, V_{oc} es el voltaje de circuito abierto en STC, V_{mpp} es el voltaje en el punto de máxima potencia (MPP) en STC, n_s es el número de celdas en serie del panel, I_o es la corriente inversa de saturación del diodo, A es el factor de calidad del diodo (idealidad), K es la constante de Boltzmann, T_{stc} es la temperatura bajo condiciones estándar y q es la carga del electrón.

En la Fig. 2 se observa el circuito simulado en el programa Quite Universal Circuit Simulator "QUCS" del modelo de una célula solar fotovoltaica con los parámetros del panel SOLAREVER SE-156*156-150P-36 utilizado para el arreglo experimental.

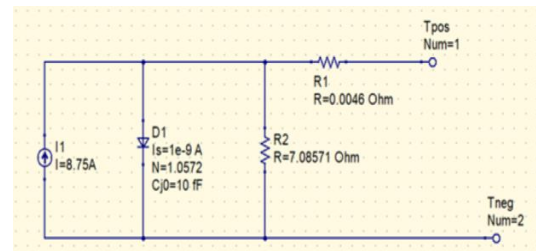


Fig. 2. Simulación de una célula solar fotovoltaica.

Siguiendo este arreglo y uniendo en serie una cantidad suficiente se puede formar y simular un panel solar fotovoltaico, como se observa en la Fig. 3.

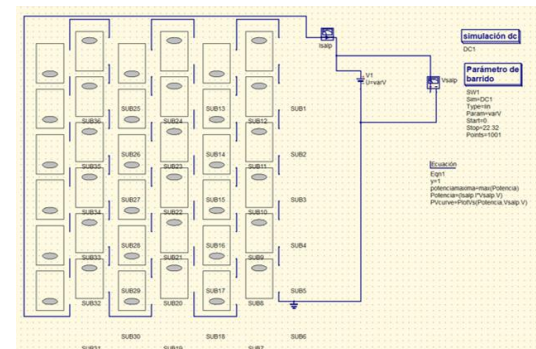


Fig. 3. Simulación del panel solar fotovoltaico.



Utilizando los parámetros adecuados del panel se obtuvieron las gráficas I-V, como se observa en la Fig. 4, en la cual se observa el comportamiento esperado de las curvas de potencia y corriente con respecto al voltaje del panel para un punto de máxima potencia (mpp) y con ello asegurar el correcto funcionamiento del sistema de recolección de energía en dicho punto.

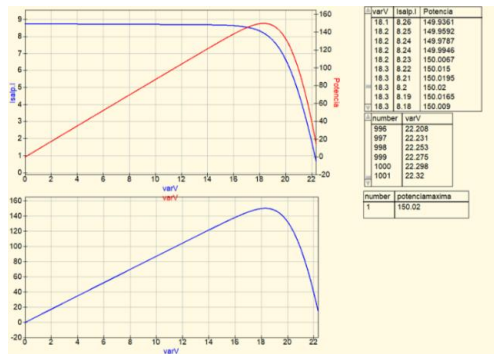


Fig. 4. Obtención e identificación del MPP por parámetros de barrido.

3. ARREGLO EXPERIMENTAL

En esta sección se describe cada uno de los elementos que se utilizaron en el arreglo experimental y las variaciones de este. El componente principal para el arreglo es un panel fotovoltaico, que se muestra en la Fig. 5. Las especificaciones de la celda solar se presentan en la Tabla 1.



Fig. 5. Panel solar del arreglo experimental.

Tabla 1. Especificaciones del panel del arreglo

STC	25 °C, 1 kW/m²
Maximum power	10 Wp
Optimum operating voltage	17.5 V
Optimum operating current	0.58 A
Short circuit current	0.64 A
Open circuit voltage	21.5 V
Maximum system voltage	1000 V

Con base en las especificaciones de la Tabla 1 es necesario obtener el valor de la corriente y el voltaje para generar las características I-V del panel, además de considerar el valor de la

temperatura del panel y del ambiente; los primeros dos parámetros se obtuvieron con el uso de un voltímetro y un amperímetro y el valor de la temperatura con sensores DHT11.

La adquisición de los datos para el caso de la corriente y voltaje se obtuvo de forma tradicional, el valor de la temperatura del panel y temperatura ambiente fue obtenida con dos sensores DHT11 con el uso del microcontrolador Arduino Uno; en este primer arreglo experimental el objetivo fue simular un panel instalado y obtener la respuesta del comportamiento del panel que fue situado en un lugar que garantizaba la exposición del panel al sol durante todo el día sin sombras o algo que impidiera la incidencia del sol al panel como se muestra en la Fig. 6.



Fig. 6. Instalación del panel solar al aire libre.

En una segunda adquisición y con la idea de disminuir o anular la incidencia de las corrientes de aire sobre el arreglo se cambió la ubicación del panel, ahora el panel se situó en un lugar donde sólo estaba expuesto directamente al sol por cierto tiempo debido a que existían factores que provocaban que en un determinado horario el panel estuviera en la sombra. Es importante mencionar que la ubicación del panel no es arbitraria para ello se debe tomar en cuenta que los módulos solares del hemisferio norte estén dirigidos hacia el sur. Mientras que, en las regiones que son parte del hemisferio sur, se recomienda que los paneles solares se encuentren dirigidos al norte. Para los grados de inclinación a los que el panel debe inclinarse se obtiene de acuerdo al grado de latitud de la ubicación en donde se encuentra situado.

Para este caso fue de 19°.



Fig. 7. Instalación del panel solar en espacio cerrado.



4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las gráficas son un promedio de las mediciones que fueron obtenidas durante 5 días. En el primer caso el arreglo experimental fue expuesto en un horario de 8:00 am a 7:00 pm debido a que en esta última hora ya había oscurecido. El tiempo entre cada medición fue de 15 minutos en el que el panel se encontraba al aire libre.

Las gráficas de V_{oc} , I_{sc} , $T_{ambiente}$, T_{panel} , ΔT_{emp} y P que se aprecian de la Fig. 8 a la Fig. 13 el V_{oc} prácticamente se mantiene a excepción de un pico a las 10 am con valor de 21.1 V, si observamos las gráficas de $T_{ambiente}$ y T_{panel} para esta hora las temperaturas aún comenzaban a subir y para las 10:30 am la $T_{ambiente}$ y T_{panel} habían aumentado y la P disminuye, un efecto parecido pero inverso sucede entre las 4 y 4:30 pm.

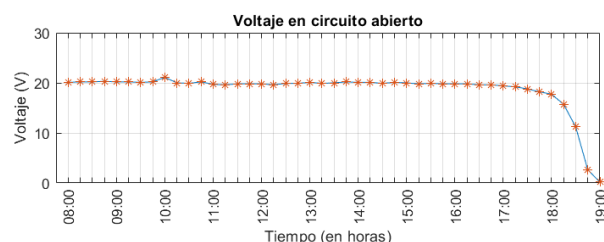


Fig. 8. Gráfica de voltaje en circuito abierto (V_{oc}) al aire libre.

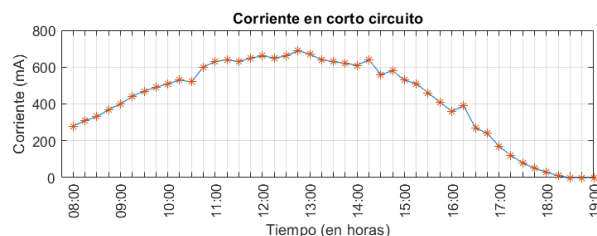


Fig. 9. Gráfica de corriente en corto circuito (I_{sc}) al aire libre.

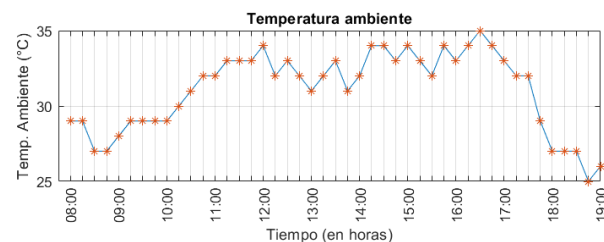


Fig. 10. Gráfica de temperatura al aire libre.

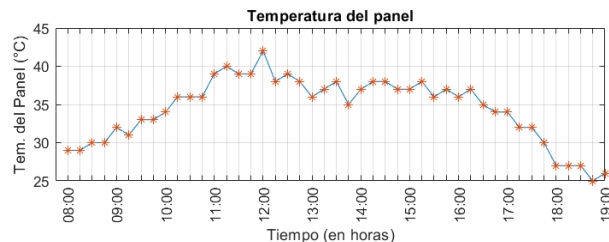


Fig. 11. Gráfica de temperatura del panel al aire libre.

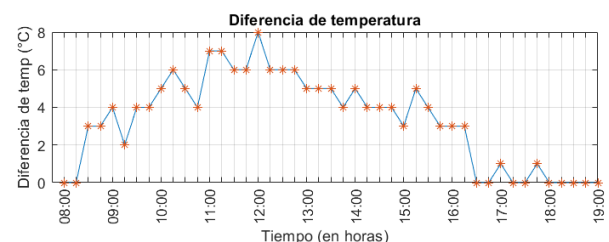


Fig. 12. Gráfica de diferencia de temperatura aire libre.

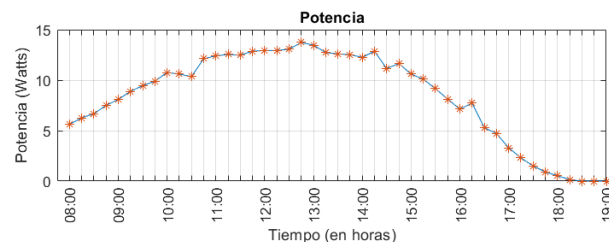


Fig. 13. Gráfica de potencia (P) al aire libre.

En el segundo caso en el que el panel se encontraba en condiciones en las que no incidía flujo de aire en el panel se obtuvieron de nuevo las gráficas de V_{oc} , I_{sc} , $T_{ambiente}$, T_{panel} , ΔT_{emp} y P que se observan de la Fig. 14 a la 19. El tiempo en que se hizo la medición fue un periodo más corto, de 11:00 am a 3:00 pm debido a que antes y después de esas horas el panel se encontraba en condiciones de sombreado. Estas mediciones se adquirieron con tiempo de 15 minutos entre cada muestra.

Los valores pico de V_{oc} ocurren a las 11:30 am con valor de 19.84 V y a la 12:45 pm con 19.25 V el primer pico sucedió de manera natural, en ese momento la $T_{ambiente}$ era de 32°C y la T_{panel} de 38.7°C, para el momento de la siguiente medición el valor de ambas temperaturas incrementó para $T_{ambiente}$ a 33°C y al observar la Fig. 18 existe una diferencia de más de 6°C teniendo T_{panel} 38.7 °C.



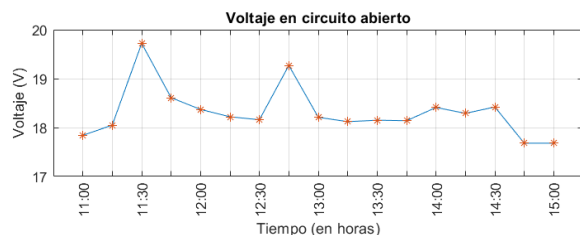


Fig. 14. Gráfica de V_{oc} en espacio cerrado (4 paredes).

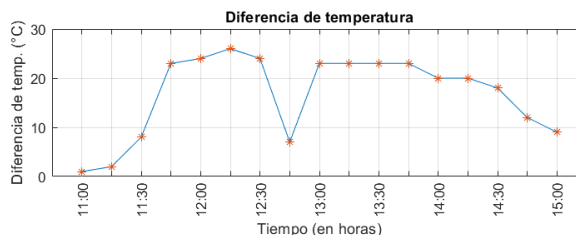


Fig. 18. Gráfica de diferencia de temperatura en espacio cerrado

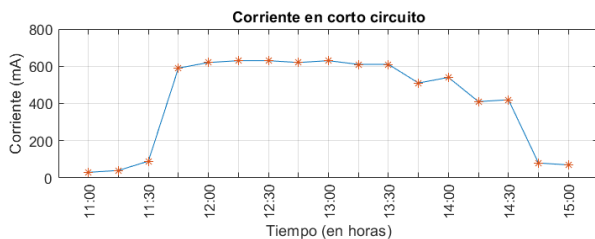


Fig. 15. Gráfica de I_{sc} solar en espacio cerrado.

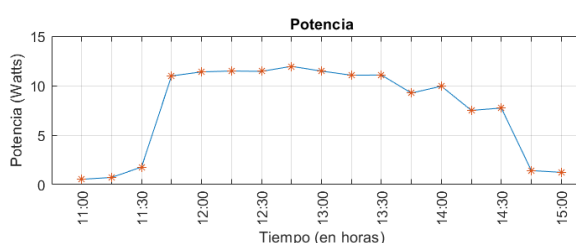


Fig. 19. Gráfica de potencia (P) en espacio cerrado.

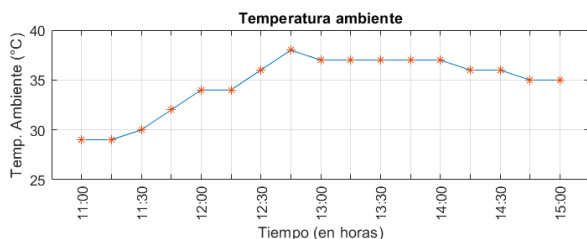


Fig. 16. Gráfica de temperatura ambiente en espacio cerrado.

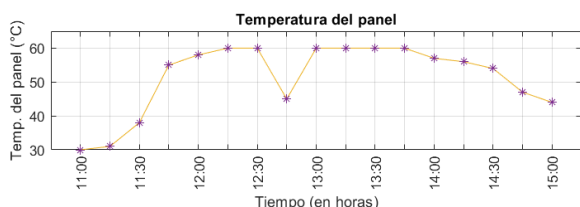


Fig. 17. Gráfica de temperatura del panel en espacio cerrado.

Con base en los datos obtenidos en los dos casos del arreglo, en donde se puede apreciar mejor la influencia de la temperatura en la potencia de salida del generador fotovoltaico es en la Fig. 19 debido a que no existía una corriente de aire sobre el panel provocando que se calentara considerablemente, es posible ver un incremento en la gráfica de diferencia de temperatura, utilizando este fenómeno después de obtener las mediciones de las 12:30 se incidió sobre el panel una corriente de aire con la ayuda de un ventilador con el objetivo de disminuir la temperatura del panel y adquirir el valor del voltaje y corriente en ese momento.

Además de ello, también se realizaron pruebas de enfriamiento del panel solar fotovoltaico para observar la mejora en la producción de energía cuando el panel no se calienta demasiado y mantiene una temperatura adecuada para su correcto funcionamiento. En la Fig. 14 se observa la gráfica de comportamiento del V_{oc} del panel cuando este se calienta por efecto propio de la radiación a la cual es expuesto, también se observa la mejora del comportamiento del V_{oc} cuando el panel es enfriado para obtener una mejora en la producción del mismo con lo que se comprueba el efecto negativo que presenta el calentamiento del panel para su correcto funcionamiento.



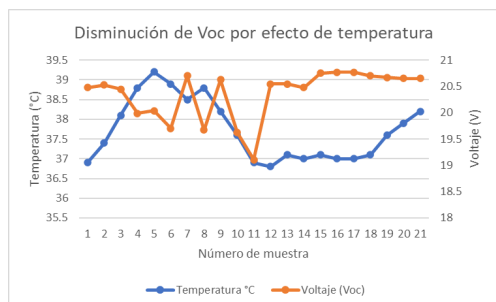


Fig. 20. Disminución del V_{oc} por efecto de la temperatura.

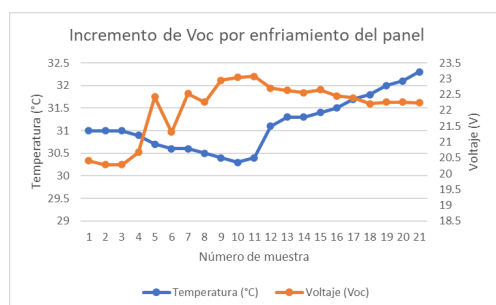


Fig. 21. Incremento del V_{oc} por enfriamiento del panel.

5. CONCLUSIONES

Las simulaciones realizadas que parten desde el circuito equivalente de una celda fotovoltaica y el cálculo de cada uno de los componentes eléctricos arrojaron resultados que se acercan a las especificaciones de potencia del fabricante y además permiten una aproximación a datos que no presenta el fabricante como la R_s y la R_{sh} , los experimentos demuestran que para una operación óptima del panel y generar la máxima potencia lo ideal es tener la mayor cantidad de irradiancia posible y una temperatura ambiente baja o mantener frío el panel mediante algún método. Como se muestra en la Fig. 21, al presentarse una disminución en la temperatura del panel el voltaje aumenta lo que resulta en un aumento en la potencia, mejorando la cantidad de recolección de energía del sistema en general.

6. AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado fue realizado gracias al apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), así como a los investigadores pertenecientes al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG).

REFERENCIAS

- A. J. N. Khalifa, "On the effect of cover tilt angle of the simple solar still on its productivity in different seasons and latitudes", *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, n.o 1, pp. 431-436, ene. 2011.
- Al-Majidi, S. D., Abbod, M. F., & Al-Raweshidy, H. S. "A novel maximum power point tracking technique based on fuzzy logic for photovoltaic systems". *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(31), 14158-14171, 2018.
- Alonso, M. C. "El generador fotovoltaico. In Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica" Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT, 2004.
- Beriber, D., & Talha, A. "MPPT techniques for PV systems". In *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Fourth International Conference on* (pp. 1437-1442), mayo 2013.
- C. Rus-Casas, J. D. Aguilar, P. Rodrigo, F. Almonacid, y P. J. Pérez-Higueras, «Classification of methods for annual energy harvesting calculations of photovoltaic generators», *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, n.o Supplement C, pp. 527-536, feb. 2014.
- Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. "Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review". *Energy Procedia*, 33, 311-321, 2013.
- Li, H., Yang, D., Su, W., Lü, J., & Yu, X. "An Overall Distribution Particle Swarm Optimization MPPT Algorithm for Photovoltaic System Under Partial Shading". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 265-275, 2019.
- Mamur, H. & Ahiska, R. "Application of a DC-DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators", *Energy Conversion and Management* 97, 265–272, 2015.
- P. Rodrigo, C. Rus, F. Almonacid, P. J. Pérez-Higueras, y G. Almonacid, "A new method for estimating angular, spectral and low irradiance losses in photovoltaic systems using an artificial neural network model in combination with the Osterwald model", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 96, n.o Supplement C, pp. 186-194, ene. 2012.
- Rezk, H., & Eltamaly, A. M. "A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems". *Solar energy*, 112, 1-11, 2015.
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations". *Solar energy*, 83(5), 614-624, 2009.
- Subudhi, B. & Pradhan, R. "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems", *Sustainable Energy*, IEEE Transactions on 4(1), 89–98, 2013.



Uso de la espectroscopia de impedancia eléctrica para determinar la madurez del plátano

Zuleyma.-L España-Ruiz* John.-J Cabrera-Lopez*
José.-F Gómez-Aguilar*

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado
Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.

** La Universidad Autónoma de Occidente, Calle 25, Vía Cali-Puerto
Tejada ##115-85Km 2, Jamundí, Cali, Valle del Cauca, Colombia.

Abstract: La técnica de espectroscopia de impedancia eléctrica (EIS) se utilizó para determinar las propiedades eléctricas del plátano. Esta técnica es fácil de usar, no invasiva y de bajo costo económico, lo cual es favorable para determinar la madurez que se presenta en el plátano. En este caso particular, se utilizó medidas EIS del plátano durante un período de 18 días. Para mejorar el índice de ajuste y en consecuencia la caracterización eléctrica del material biológico, se describen modelos eléctricos mediante ecuaciones diferenciales de orden no entero y fraccionario. Para obtener los valores iniciales se utilizaron un software EIS. Para ajustar los parámetros de los modelos eléctricos fraccionarios (FEM) a las medidas experimentales del EIS, se utilizaron algoritmos de optimización de búsqueda de cuco y recocido simulado. Como resultado, se obtuvo que los modelos eléctricos que mejor representan las medidas del plátano, fueron el modelo Cole y el simplificado de Hyden de orden fraccionario.

Keywords: bio-impedancia, caracterización, estimación de parámetros, diagramas de Nyquist.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe un gran interés de las empresas de alimentos por asegurar la calidad de las materias primas, procesos y productos terminados. En el caso de los alimentos, se han diseñado técnicas que permiten monitorear en tiempo real las diferentes etapas de madurez y degradación que presentan (Lasia, 2002). Existen varias técnicas para evaluar la descomposición de los alimentos, tales como la cromatografía, espectrofotometría, electroforesis, entre otros. Estos son procedimientos complicados, de lenta respuesta y que precisan diferentes ensayos. Las técnicas empleadas, son elevadamente costosas y protocolarias, por lo cual, no son eficientes para la industria.

La Espectroscopia de Impedancia Eléctrica (EIS, por sus siglas en inglés) es una técnica que es usada recientemente para la caracterización de tejidos biológicos. Consta de analizar las propiedades eléctricas que contiene el tejido biológico, ya que se considera que los tejidos biológicos son conductores y sus resistencias varían con la frecuencia (Barsukov and Macdonald, 2002). Esta técnica tiene la ventaja de no ser invasiva, evita experimentos de laboratorio complejos y que no consumen mucho tiempo. En esta investigación se utilizará dicha técnica para identificar el grado de madurez que tiene el plátano. Con esta aportación se podrá precisar el grado de madurez de los productos, mejorando su calidad y será posible conservarlos para procesos industriales o exportaciones (Lopes et al., 2017).

Uno de los factores que influye de manera decisiva en la calidad y conservación de la fruta, es el grado de maduración en el momento de su recolección. Para predecir el tiempo de madurez que tiene la fruta o el vegetal, se requiere, nuevas tecnologías no invasivas como es el método EIS.

En las investigaciones recientes (Cabrera-Lopez, Velasco-Medina, 2019) se propone un acercamiento hacia la caracterización eléctrica del tejido vegetal, basado en estructuras algorítmicas, un micro sistema de Espectroscopia de Impedancia (IS, por sus siglas en inglés) y modelos de orden fraccionario. Se trabajó con cinco modelos fractales en tres distintos frutos: manzana, plátano y pepino. Su prototipo de algoritmo BioZ-s, permite las lecturas de bio-impedancia correctamente sobre un espectro ensanchado, para lo cual se utilizaron modelos de orden entero y fraccionario (Cabrera-López and Velasco-Medina, 2019). Para esta investigación se trabajó con cuatro modelos eléctricos, entre ellos los modelos eléctricos de Hayden simplificado (Hayden-S) y Cole que son los circuitos equivalentes más comunes. Estos modelos se presentan en la Fig.(5), así como los modelos de doble dispersión de Cole y Hyden.

Estos modelos son ampliamente utilizados para las caracterizaciones eléctricas. Generalmente, la Función de Transferencia (TF, por sus siglas en inglés) de cada modelo utiliza ecuaciones diferenciales de orden entero eso se puede obtener aplicando las leyes de Kirchhoff al circuito analizado o el concepto de impedancia.



2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

En esta sección, presentamos conceptos sobre EIS y la formulación de las funciones de transferencia.

La impedancia es la relación entre el voltaje y la corriente, la espectroscopia de impedancia (IS) es un método muy poderoso para la caracterización de propiedades eléctricas de los materiales y sus interfaces con electrodos de conducción electrónica (Lasia, 2002). La técnica EIS consiste en excitar una muestra (en este caso el plátano) con señales sinusoidales eléctricas de frecuencia variable y registrar la respuesta del sistema. El voltaje $v(t)$ y la corriente $i(t)$ a través de la muestra en estado estacionario son funciones sinusoidales de tiempo dadas por

$$v(t) = V \cos(\omega t + \theta_V)$$

$$i(t) = I \cos(\omega t + \theta_I)$$

en el dominio de la frecuencia

$$V(j\omega) = V \cdot e^{j\theta_V}$$

$$I(j\omega) = I \cdot e^{j\theta_I}$$

donde, V, I son las amplitudes de voltaje y corriente, θ_V, θ_I denota el cambio de fase, $\omega = 2\pi f$ representa la frecuencia angular y f la frecuencia. Para analizar el comportamiento de las funciones de transferencia en el dominio de la frecuencia, una forma muy conveniente e informativa de representar el comportamiento de impedancia de los circuitos "RC" son trazando los componentes imaginarios (Z'') versus los componentes reales (Z') del vector de impedancia (Z) por un rango de frecuencia, ω , en los diagramas de Nyquist o los diagramas de argumento representados en un plano complejo. Como se muestra en la figura (1). El diagrama de Cole para un dieléctrico con pérdida tiene la forma de un semicírculo, interceptando el eje de valores reales en dos puntos críticos (Loo, 1968) (Lasia, 2002).

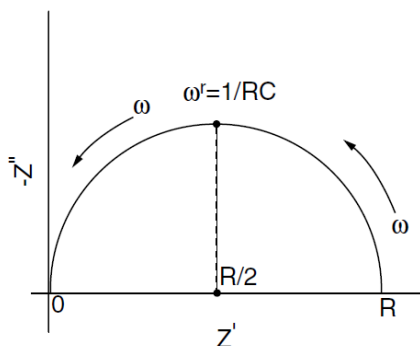


Fig. 1. Diagrama en el plano complejo, Nyquist para el espectro de impedancia de un circuito RC paralelo simple, que muestra la frecuencia característica del punto superior $\omega^* = 1/RC$

Un procedimiento útil, complementario para trazar componentes reales e imaginarios de impedancia en el plano complejo, es el uso de los llamados gráficos de bode. [Dion and Lasia (1999)] En tales representaciones, el vector de impedancia general, Z , en rotación diagramas vectoriales, está relacionado con el ángulo de fase correspondiente ϕ . Z

está relacionado con los componentes reales e imaginarios a través de una relación de Pitágoras.

$$Z = \sqrt{(Z'')^2 + (Z')^2}$$

recordando que la parte imaginaria $Z'' = Z \sin \omega t$ y la parte real $Z' = Z \cos \omega t$

Para un circuito RC, tendrá algunos valores intermedios, dependiendo de ω . Los diagramas de Bode representan Z y ϕ representados frente a ω , generalmente en un amplio rango de ω , en una escala logarítmica. Los diagramas de Nyquist en altas frecuencias tienden a agruparse hacia $\omega \rightarrow \infty$ intercepta en el eje Z' . En el gráfico de ángulo de fase, un acercamiento hacia un comportamiento capacitivo hacia bajas frecuencias puede ser identificado por $\phi \rightarrow -90$. Desviaciones de tal comportamiento limitante indica que la respuesta de voltaje alternativo (AV) no es de un capacitor puro tal que el comportamiento de ser modelado en términos de un elemento de fase constante, (CEP) para tejido biológico (Barsukov and Macdonald, 2002).

Los circuitos equivalentes (como el modelo de Cole) son diseñados con el propósito de proporcionar el mejor ajuste de los datos de impedancia mientras minimiza su complejidad (es decir, el número de componentes), al tiempo que simplifica la explicación biológica de la salida de impedancia. Además, se sabe que en las mediciones de un barrido AC de alta frecuencia da como resultado una reducción de la difusión de iones, junto con un aumento de concentración de iones en la interfaz (Yúfera et al., 2011). Por el cual, a bajas frecuencias, la membrana celular, al tener una alta impedancia, actúa como un circuito abierto que obliga a la corriente a pasar alrededor de las células en el fluido extracelular, modelado por la resistencia en paralelo (R_p). A altas frecuencias la membrana celular actúa como un corto circuito, dejando que la corriente fluya por todas partes en los fluidos intracelulares, modelado por la resistencia en serie (R_s), que presenta una mayor concentración de electrolitos en comparación con el extracelular. Como se muestra en la figura (2)

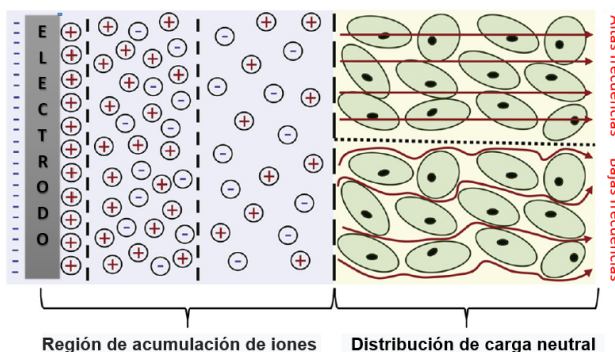


Fig. 2. La región de acumulación de iones en la fruta del sensor interfaz, mientras que el lado derecho representa el flujo de corriente en la región distribuida de carga neutra, a frecuencias altas y bajas. (Ibba et al., 2020)

De esta manera, la interfaz electrodo-fruta se puede comparar con una doble capa eléctrica, que contiene iones contrarios (con carga opuesta a el electrodo) y co-iones (con la



misma carga que el electrodo). Esta doble capa eléctrica se caracteriza por un espesor finito, que representa el límite de la influencia electrostática del electrodo en su proximidad y depende en gran medida de la concentración y el tamaño de la iónica especies (la fruta o vegetal) presentes en el medio(Bohinc et al., 2001).

3. OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE ORDEN FRACCIONARIO

En esta sección, se presenta antecedentes teórico sobre las funciones de transferencias fraccionarias.

3.1 Descripción breve sobre el cálculo fraccionario

El calculo fraccionario (FC) proporciona modelos más precisos de los sistemas físicos que el cálculo ordinario. Para el análisis del comportamiento dinámico de un sistema fraccionario es necesario usar una definición apropiada. Para este artículo, se empleo la derivada fraccionaria de Caputo ${}_0^C D_t^\alpha$.

Caputo La definición de Caputo es la más utilizada hoy en día porque, a comparación de las otras definiciones, la derivada de una constante es cero y las condiciones iniciales se describen de la misma forma que en las ecuaciones diferenciales de orden entero(IO). La derivada fraccionaria Caputo (C), está definida como se observa en la ecuación (1)(Podlubny, 1999).

$${}_0^C D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_a^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad (1)$$

si el método de transformada de Laplace se usa con el operador fraccionario de acuerdo con la definición de Caputo (1), se obtiene la ecuación (2):

$$\mathcal{L}\{{}_0^C D_t^\alpha f(t)\} = s^\alpha F(s) - s^{\alpha-1} f(0) \quad (2)$$

donde, se deduce que las condiciones iniciales toman la misma forma de las ecuaciones diferenciales enteras, por lo tanto, el problema del valor inicial utiliza condiciones en $t = 0$ que se han conocido interpretaciones físicas. Además, considerando que $n = 1$, eso es $0 < \alpha \leq 1$.

4. METODOLOGÍA

En esta sección llevaremos a cabo la metodología para la obtención de las funciones de transferencia de los modelos utilizados.

Generalmente, la función de transferencia (TF) de cada modelo utiliza ecuaciones diferenciales de orden entero eso se puede obtener aplicando las leyes de Kirchhoff al circuito analizado o el concepto de impedancia.

4.1 Obtención de impedancia del modelo de Cole

Método clasico La figura 3 ilustra un ejemplo de un circuito RC, el cual consiste en una resistencia R_s conectada en serie con una resistencia R_1 , que a su vez, está conectada en paralelo con un capacitor C_1 .

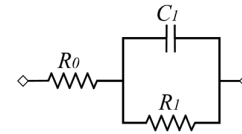


Fig. 3. Modelo de Cole

Para determinar la ecuación equivalente, la impedancia se puede obtener por la ley de Ohm por la siguiente ecuación:

$$Z(s) = \frac{V(s)}{I(s)} \quad (3)$$

Aplicando las leyes de Kirchhoff para el circuito de la figura (3), se tiene:

$$V = R_0 i + V_{c1} \quad (4)$$

Se obtiene:

$$i = \frac{V_{c1}}{R_1} + C_1 \frac{dV_{c1}}{dt} \quad (5)$$

Aplicando la transformada de Laplace en (4) y (5)

$$V(s) = R_0 I(s) + V_{c1}(s) \quad (6)$$

$$I(s) = \frac{V_{c1}(s)}{R_1} + C_1 s V_{c1}(s) \quad (7)$$

Se sustituye (6) y (7) en (3) se obtiene:

$$Z(s) = \frac{R_0 I(s) + V_{c1}(s)}{\frac{V_{c1}(s)}{R_1} + C_1 s V_{c1}(s)} \quad (8)$$

por una manipulación algebraica se tiene como resultado, la función de transferencia del modelo de Cole. Ecuación (9)

$$Z(s) = R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 s} \quad (9)$$

Método con sentido de Caputo Los modelos de orden fraccionario consisten en ecuaciones diferenciales de orden arbitrario, y usualmente tienen una mayor capacidad para capturar el comportamiento dinámico de la impedancia de frutas y vegetales.

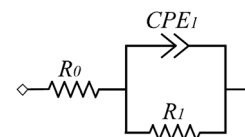


Fig. 4. Modelo de Cole

Este modelo, como se muestra en la Fig.(4) está formado por tres elementos hipotéticos del circuito. Un resistor de alta frecuencia R_s , una resistencia R_1 , y un CPE¹

Utilizando el CPE (con el término s^α) implica la derivada fraccionaria de Caputo donde el orden de $0 < \alpha < 1$ con una relación de corriente de voltaje para este componente definido como:

$$i_{CPE} = C_{cpe} \frac{d^\alpha V_{cpe}}{dt^\alpha} \quad (10)$$

obteniendo lo siguiente:

$$V = R_0 i + V_{cpe} \quad (11)$$

¹ elemento de fase constante



$$i = \frac{V_{cpe}}{R_1} + C_{cpe} \frac{d^\alpha V_{cpe}}{dt^\alpha} \quad (12)$$

A la ecuación (11) y (12) se aplica la transformada de Laplace, se sustituye en la ecuación (3) se obtiene lo siguiente:

$$Z(s) = R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 s^\alpha} \quad (13)$$

Siguiendo la misma metodología del ejemplo anterior y usando las ecuaciones (1) nuevamente, se puede obtener el orden entero y de orden fraccionario de otros modelos eléctricos, que se presentan en la Tabla (5).

Modelos eléctricos	Función de transferencia	FO modelo eléctrico	FO Función de transferencia $^C Z(s)$	
Cole		$Z(s) = R_s + \frac{R_p}{1 + R_p C_p s}$		$Z(s) = R_s + \frac{R_p}{1 + R_p C_p s^\alpha}$
Hyden Simplificado		$Z(s) = \frac{R_s}{1 + \frac{R_s C_p s}{1 + R_p C_p s}}$		$Z(s) = \frac{R_s}{1 + \frac{R_s C_p s^\alpha}{1 + R_p C_p s^\alpha}}$
Doble dispersión de Cole		$Z(s) = R_s + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 s} + \frac{R_2}{1 + R_2 C_2 s}$		$Z(s) = R_s + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 s^\alpha} + \frac{R_2}{1 + R_2 C_2 s^\alpha}$
Hyden		$Z(s) = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_p + \frac{1}{C_p s}}}$		$Z(s) = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_p + \frac{1}{C_p s^\alpha}}}$

Fig. 5. Circuito equivalente con sus respectivas funciones de transferencia, lado izquierdo modelos de orden entero, lado derecho modelos de orden fraccionario con sentido de Caputo

5. RESULTADOS

Para la obtención de datos de impedancia, se realizó una estancia a la universidad autónoma de occidente (UAO) de Cali, Colombia, estos datos experimentales se obtuvieron utilizando el dispositivo CoreBioZ-S y un protocolo de medición desarrollado para cada material vegetal (Cabrera-López and Velasco-Medina, 2019). Para esta caracterización, los modelos eléctricos (EM) se utilizan como se presenta en la Fig. (5), que se describen utilizando ecuaciones diferenciales de orden entero (clásico) u orden fraccionario (sentido de Caputo). En este caso, se utilizan diferentes algoritmos de optimización para los ajustes de los parámetros obtenidos de las mediciones de EIS.

5.1 Medición de bioimpedancia

Los plátanos se cosecharon durante la semana 14 después de la floración y se compraron directamente de un local, granja (La Villanueva, Palmira, Valle del Cauca, Colombia). Se seleccionaron los racimos, se lavaron con agua corriente y se etiquetaron al azar, y luego se almacenaron bajo condiciones controladas en una cámara ambiental a una temperatura de $20 \pm 0.15^\circ\text{C}$ y $75 \pm 2\%$ humedad relativa. Posteriormente, se seleccionó un subconjunto de 10 plátanos para llevar a cabo el EIS mediciones durante 18 días consecutivos de las pruebas experimentales.

Las mediciones de EIS de los 10 plátanos se realizaron con el dispositivo CoreBioZ-S, y en cada prueba se adquirieron cinco espectros con 10 puntos por década dentro del ancho de banda de 100 Hz a 100 kHz. Un total de 4 electrodos fue colocado sobre la fruta a una distancia de 3 cm entre sí. Los cuatro electrodos $\text{Ag} - \text{Ag}/\text{Cl}$ no invasivos se encuentran en la superficie del plátano siguiendo la configuración tetrapolar, y se muestra en el esquema de Figura (6) La corriente i_i se inyecta en el plátano y fluye a través de los electrodos marcados $I^{(+)}$ y $I^{(-)}$ el diferencial de voltaje Δv_{e1} generado por esta corriente se adquiere a través de electrodos marcados $V^{(+)}$ y $V^{(-)}$.

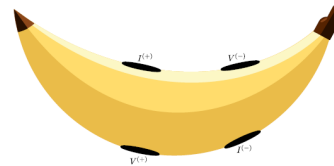


Fig. 6. Configuración de electrodos tetrapolares para medidas de EIS en plátanos.

Teniendo en cuenta el protocolo mencionado anteriormente, los diagramas de Nyquist obtenidos durante 18 días de pruebas experimentales que utilizan medidas EIS en plátanos se muestran en la Figura (7). Estas gráficas muestra promedio diario de los parámetros complejos, resistencia y reactancia de la impedancia del plátano en diferentes frecuencias, y se observa que los cambios de los parámetros polares tienen tendencias similares con cada uno durante los días de la prueba experimental.

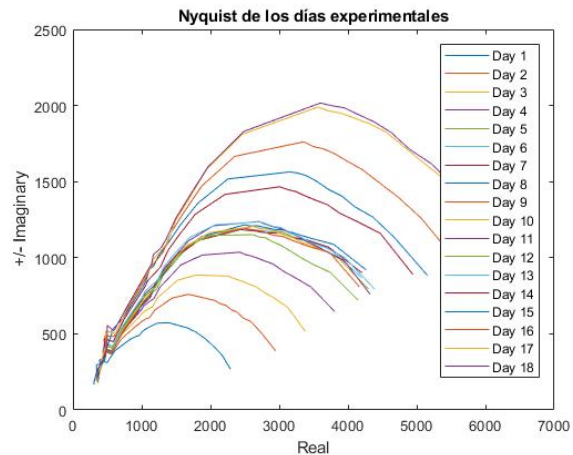


Fig. 7. Diagrama de Nyquist de los datos de impedancia del plátano de 18 días de lectura.

La estimación paramétrica de los modelos eléctricos se realiza utilizando un software EIS, donde obtenemos datos iniciales. Para mejorar el ajuste a los datos se utiliza distintos algoritmos de optimización llamado cuckoo search y recorrido. Estos algoritmos permiten obtener los parámetros de los modelos enteros y fraccionarios considerando sus medidas de función de transferencia y EIS. Los valores de los parámetros de los modelos eléctricos que utilizan derivadas fraccionarias de Caputo permiten logrando un alto grado de optimización que se ajusta a las medidas EIS



del plátano, y por lo tanto estos valores son descriptores exactos del comportamiento eléctrico de esta fruta. En la Figuras (8 y 9) son los valores de resistencias de los modelos de Cole y Hyden simplificado. Las figuras (10 y 11) se presenta los valores del elemento de fase constante con su respectiva α .

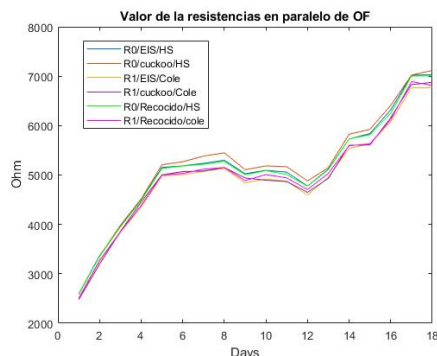


Fig. 8. Resistencia en paralelo

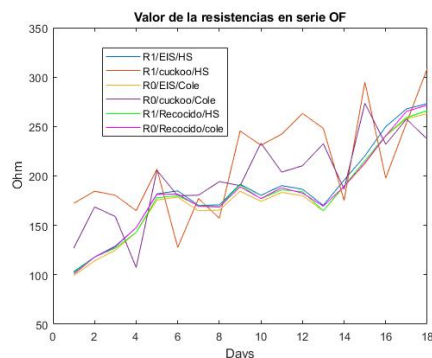


Fig. 9. Resistencia en serie

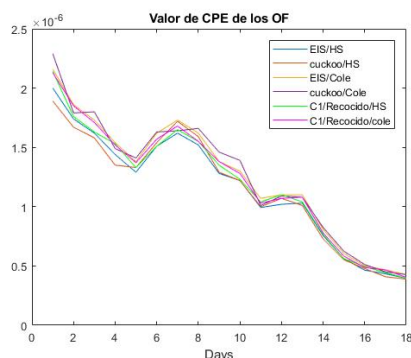


Fig. 10. Elemento de fase constante

Por otro lado, con el fin de establecer correlaciones entre los valores de los parámetros de Modelos de Cole y Hyden simplificado con las propiedades fisicoquímicas de los plátanos, los gráficos de la Fig.(8, 9,10 y 11) se construyen, que muestran el comportamiento de los parámetros de los 18 días de pruebas. De los resultados presentados en los gráficos anteriores, se observa en general que los diferentes

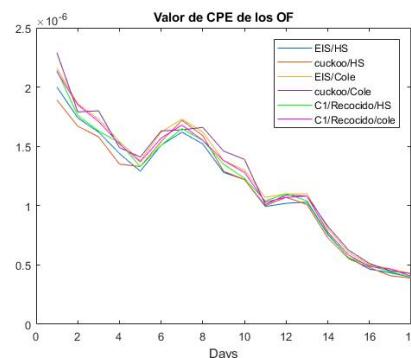


Fig. 11. Valores de α

parámetros para cada Función de transferencia en sentido de Caputo, exhibe curvas con las mismas tendencias durante cada día. Asimismo, también se observa que los valores de los parámetros resistivos R_s y R_p , aumentan proporcional y similarmente entre ellos, observando que los valores para el modelo de Cole tienen un escala distintiva.

Para los gráficos de los valores de los parámetros CPE y α en la Fig.(10 y 11) parecen superposición en cada caso. Es decir, los valores optimizados de CPE y α tienen un comportamiento similar independientemente del FT utilizado. Por tanto, y teniendo en cuenta los dos parámetros que modelan un elemento fraccionario CPE que describen las heterogeneidades o no linealidades de diferentes biológicos materiales.

Se puede concluir que CPE y α parámetros que describen la estructura macroscópica comportamiento del material biológico, relacionado con interacciones no locales y no lineales, y permiten lograr la buena optimización encajando con las Funciones de transferencia fraccionarias. Además, estudios a diferentes escalas podría determinar que estos parámetros también estaban relacionados con algunas propiedades fisicoquímicas de esta fruta u otras que se estudien mediante la técnica EIS.

6. CONCLUSIONES

Finalmente, se concluye que los resultados obtenidos de caracterización eléctrica utilizando la tecnica de EIS, proporcionan valores de parámetros para modelos FEM que tienen una correlación directa con la bioimpedancia y las medidas fisicoquímicas del plátano, y por tanto, estos valores podrían utilizarse para determinar el estado de madurez de esta fruta. Adicionalmente, Al mismo tiempo, desde Estos resultados podemos concluir que la técnica EIS produce resultados confiables y se puede utilizar para la caracterización eléctrica de otros frutos, con el fin de determinar su fisicoquímica y propiedades fisiológicas.

REFERENCES

- Barsukov, Y. and Macdonald, J.R. (2002). Electrochemical impedance spectroscopy. *Characterization of materials*, 1–17.
- Bohinc, K., Kralj-Iglič, V., and Iglič, A. (2001). Thickness of electrical double layer. effect of ion size. *Electrochimica Acta*, 46(19), 3033–3040.



- Cabrera-López, J.J. and Velasco-Medina, J. (2019). Structured approach and impedance spectroscopy microsystem for fractional-order electrical characterization of vegetable tissues. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.
- Dion, F. and Lasia, A. (1999). The use of regularization methods in the deconvolution of underlying distributions in electrochemical processes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 475(1), 28–37.
- Ibba, P., Falco, A., Abera, B.D., Cantarella, G., Petti, L., and Lugli, P. (2020). Bio-impedance and circuit parameters: An analysis for tracking fruit ripening. *Postharvest Biology and Technology*, 159, 110978.
- Lasia, A. (2002). Electrochemical impedance spectroscopy and its applications. In *Modern aspects of electrochemistry*, 143–248. Springer.
- Loor, G.d. (1968). Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water. *Journal of Microwave Power*, 3(2), 67–73.
- Lopes, A.M., Machado, J.T., and Ramalho, E. (2017). On the fractional-order modeling of wine. *European Food Research and Technology*, 243(6), 921–929.
- Podlubny, I. (1999). Fractional differential equations, vol. 198 of mathematics in science and engineering.
- Yúfera, A., Olmo, A., Daza, P., and Cañete, D. (2011). Cell biometrics based on bio-impedance measurements. *Advanced biometric technologies*, 17, 343–66.



Convertidor Sepic como CFP aplicando la estrategia de control OCC

Rafael Trujillo Morales*, Jaime E. Arau Roffiel*, Dante Miraglia Nuñez*

*Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México,
(rafael.trujillo19ee@cenidet.edu.mx, jarau@cenidet.edu.mx, dantemiraglia16e@cenidet.edu.mx)

Resumen: El presente artículo demuestra la viabilidad de uso de la técnica conocida como Control de un Ciclo (OCC por sus siglas en inglés), aplicada a un convertidor tipo Sepic de 50 W para realizar la función de corrección del factor de potencia (CFP) en la primera etapa de un sistema de alimentación monofásico. La necesidad de encontrar soluciones sencillas y de bajo costo para realizar la función de CFP en sistemas de alimentación conmutados, ha llevado a la propuesta de soluciones para mejorar el desempeño de soluciones conocidas como “Control por Multiplicador” o “Seguidor de Tensión”, entre las que se han propuesto la conocida como OCC aplicada al convertidor Elevador o *Boost*. El artículo demuestra la viabilidad de aplicar la técnica OCC en el convertidor Sepic, de tal manera que se pueda conseguir un adecuado desempeño en términos del FP y bajo contenido armónico en la etapa de entrada de una fuente de alimentación. El estudio evalúa la sensibilidad de parámetros tales como el FP, THD (Distorsión Armónica Total por sus siglas en inglés), así como la capacitancia requerida en salida en el convertidor, ante variaciones de la ganancia de voltaje del convertidor de potencia. Los resultados demuestran que la técnica OCC puede ser utilizada con ventaja contra soluciones tradicionales en la función de CFP en sistemas de alimentación conmutados.

Palabras clave: Corrección del Factor de potencia (CFP), Control de un Ciclo (OCC), Convertidor Sepic, Distorsión Armónica Total (DAT), estrategias de control para CFP

1. INTRODUCTION

Las fuentes de alimentación conmutadas son usadas en diferentes tipos de aplicaciones y dependiendo de estas, pueden ser conectadas ya sea a una fuente de CA o CD. Para el caso de los equipos electrónicos la mayoría de estos equipos se conectan a la línea de CA, en los cuales frecuentemente sus fuentes de alimentación de CA-CD son diseñadas para tener salida de voltaje regulada, aislamiento o múltiples salidas de voltaje, sin embargo, estas fuentes son generadoras de armónicos no deseados que son inyectados a la red eléctrica (Mohad, N. et al., 2009).

Con el objeto de hacer un buen uso de la energía eléctrica, se han creado normas como la IEEE-519 (Duffey, C. K., et al 1989), la cual mide los armónicos inyectados en el punto de conexión común o como la norma IEC-61000-3-2 (EMC, 2009), la cual se encarga de medir y limitar los armónicos a cada equipo individual que se conecte a la red eléctrica.

En la literatura se han presentado soluciones con el objetivo de tener un alto FP y baja THD, las cuales en esencia se pueden clasificar como soluciones de una o dos etapas. En la solución de dos etapas como se muestra en la Fig. 1 se le destina la función de CFP a una primera etapa después del puente de diodos, siendo la misión de una segunda etapa el asegurar la regulación de voltaje y mejorar la dinámica lenta que tradicionalmente presenta la etapa previa de CFP (Fernández, A., et al 2005).

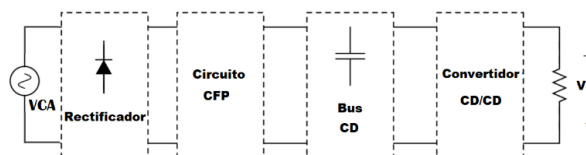


Fig. 1. Esquema tradicional de dos etapas para CFP

La solución de dos etapas en principio resulta ser más costosa, aunque mejor en desempeño en términos de CFP y la segunda etapa es la encargada de dar la dinámica y regulación a la tensión de salida, por lo que la selección del convertidor para la primera etapa y la estrategia para alcanzar un adecuado FP es muy importante.

Diferentes soluciones relacionadas con la primera etapa del CFP se han implementado en la literatura, tales como el “Emulador de resistencia”, realizada a través del control conocido como “Multiplicador” (debido a que utiliza un multiplicador analógico para realizar la función) mostrado en la Fig. 2a, que si bien presenta ventajas como cumplir la norma IEC 61000-3-2 sin dificultad al conformar una señal senoidal casi perfecta, presenta como desventajas la necesidad de usar sensores de corriente y voltaje (en entrada y salida), así como el alto costo de los circuitos integrados especiales que se requieren para hacer la función de CFP (Sebastian, J., 2016).



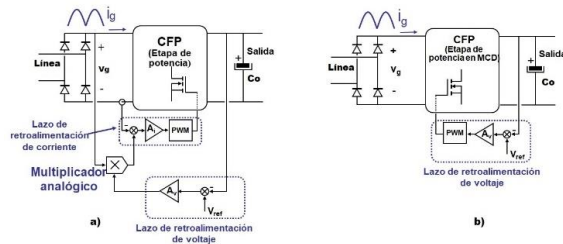


Fig. 2. Estrategias tradicionales para CFP en sistemas de alimentación, a) Control por multiplicador, b) Control por Seguidor de tensión.

Otra estrategia es la conocida como “Seguidor de tensión” mostrada en la Fig. 2b, la cual ofrece conformar la señal senoidal de corriente de entrada al comportarse como un emulador de resistencia por naturaleza. Esta estrategia ofrece ventajas tales como no requerir de un multiplicador analógico (lo cual significa un ahorro en el costo del circuito de control) ni sensor de corriente, sin embargo, las desventajas que presenta son el tener grandes pérdidas en los dispositivos de potencia al estar trabajando el convertidor en Modo de Conducción Discontinua-DCM (Hernández, M. et al., 1995).

Una estrategia de control que se ha propuesto en la literatura para resolver el problema de CFP antes mencionado, es la técnica conocida como “One Cycle Control” o Control de un Ciclo (OCC por sus siglas en inglés) propuesta por la Dra. Keyue Smedley en (Smedley, K. 1995), la cual simplifica bastante el problema ya que no necesita un multiplicador analógico, además mantiene diversas ventajas de dicha solución al funcionar en Modo de Conducción Continua-MCC, tales como bajas pérdidas en el interruptor activo y menor costo de la implementación del control.

Sin embargo, solo resulta atractivo para el convertidor Boost, ya que, si se aplica a otro tipo de convertidor de la familia reductora-elevadora, se tiene la desventaja de requerir una doble integración para mejorar el desempeño de la solución (Zheren, L., et al, 1998) y, además, como se sigue requiriendo de un sensor de corriente, ya no resulta ser una solución tan atractiva. Las soluciones propuestas para la primera etapa parten en principio de que el convertidor Boost es la topología más interesante para realizar la función de CFP. Si bien es cierta esta aseveración, es también un hecho que, si se usa una topología Boost como CFP, la tensión de salida de la primera etapa será siempre mayor que la tensión pico de entrada, pudiendo variar entre 350 y 450 VCD o más, dependiendo de si es tensión americana o europea y del valor de FP que se quiere alcanzar. Manejar las tensiones antes mencionadas es un hecho que provoca un esfuerzo adicional en tensión para los elementos de la segunda etapa que termina “pagándose” con un mayor precio de la fuente de alimentación.

Analizando el convertidor Buck-Boost como opción para la primera etapa de CFP, es importante resaltar que requiere un filtro LC en la entrada dado el carácter pulsante de dicha corriente, además de tener el transistor flotado de la tierra del

convertidor. Por otro lado, el convertidor Cúk tiene ventajas interesantes sobre el Buck-Boost como se muestra más a detalle en (Cuk, S., et al, 1977), sin embargo, el convertidor Cúk tiene el inconveniente de tener el voltaje de salida invertido con respecto a la tensión de entrada y tener un capacitor de acoplamiento que debe soportar el voltaje de entrada más el voltaje de salida y circula sobre él la corriente del convertidor.

Para el caso de convertidor Zeta (Martins, D. C., et al, 1996) se tiene la desventaja de no tener inductor en la entrada lo cual provoca tener corriente pulsante, además de tener el transistor flotado con respecto a la tierra de la topología. Finalmente, el convertidor Sepic tiene la ventaja de tener su transistor referido a tierra, poseer un inductor a la entrada y no tener un voltaje de salida invertido como ocurre con el convertidor Cúk, por lo que resulta ser un convertidor apto para realizar la función de CFP cuando se busca tener un voltaje de salida mucho menor que el convertidor Boost.

Por las razones antes mencionadas, esta investigación se centra en realizar el análisis de la estrategia de control OCC aplicada a un convertidor Sepic, realizando un estudio comparativo de diferentes voltajes de salida que permitan observar la tendencia del FP y THD. La estrategia de control antes mencionada será aplicada a un convertidor Sepic y el estudio comprende el análisis teórico y simulaciones de la etapa de potencia y de control con el objetivo de que el equipo cumpla los límites de armónicos individuales bajo la norma europea IEC 61000-3-2 con valores aceptables de THD y FP, ofreciendo un control sencillo y de bajo costo, en comparación con las soluciones tradicionales.

2. PROPUESTA DE SOLUCIÓN ANALIZADA

2.1. Principio de funcionamiento del convertidor Sepic

El convertidor Sepic es una topología reductora-elevadora de cuarto orden (dado que tiene dos inductores y dos capacitores), en la que una de sus principales ventajas para ser utilizada como CFP es que la corriente de entrada no es pulsante debido a la ubicación del inductor en la entrada. En la Fig. 3 se muestra la estructura de dicho convertidor en la cual a la entrada del convertidor se tiene normalmente un voltaje senoidal rectificado ya que, en este tipo de aplicaciones de CFP, se traslada el capacitor de filtrado a la salida del convertidor que realiza la función de CFP

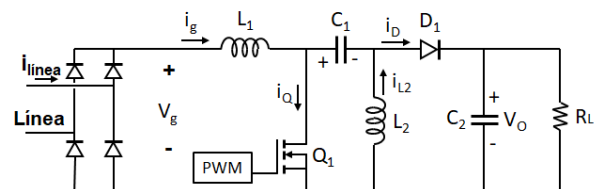


Fig. 3. Estructura del convertidor Sepic

Cuando el convertidor Sepic funciona en lo que se conoce como Modo de Conducción Continua (MCC) -que se refiere al hecho

de que la corriente en los inductores nunca llega a cero-, el convertidor pasa por dos estados de operación referidos a los tiempos en los que el transistor principal de la topología (Q_1) se encuentra encendido (T_{on}) y apagado (T_{off}), los cuales se presentan en la Fig. 4a y 4b respectivamente. Aplicando el análisis de LVK y LCK (Leyes de Voltaje y Corriente de Kirchhoff) a la topología se pueden obtener las ecuaciones para el dimensionamiento de los componentes para su correcto funcionamiento como se muestra en la Tabla 1.

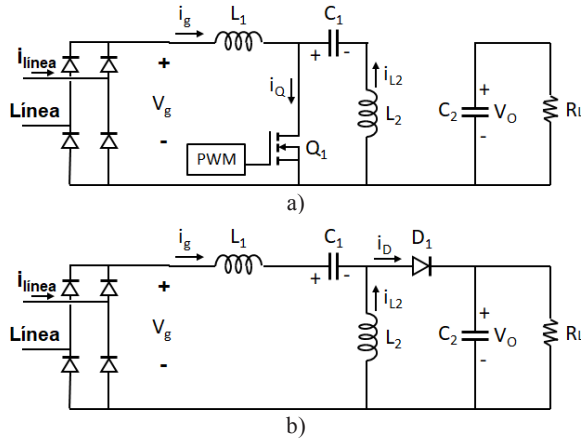


Fig. 4. Circuitos equivalentes del convertidor Sepic en MCC para el tiempo de encendido (a) y apagado (b) de Q_1 .

Tabla 1. Ecuaciones típicas para el diseño del convertidor Sepic

Componente	Ecuación
$L_1 = L_2$	$\frac{V_{gp} Sen(\omega t) V_o}{\Delta_{ic} F_s (V_{gp} Sen(\omega t) + V_o)}$
C_1	$\frac{I_o V_o}{(V_{gp} Sen(\omega t) + V_o) \Delta_{ic} F_s}$
C_2	$\frac{2P_o \Delta_t}{V_o^2 - V_{o, min}^2}$

Donde V_{gp} es el voltaje pico de entrada, V_o el voltaje de salida, F_s la frecuencia de conmutación, Δ_{ic} el rizo de corriente del inductor, I_o la corriente de salida, Δ_{vc1} el rizo de voltaje del capacitor de acoplamiento, P_o la potencia de salida, Δ_t el tiempo que el capacitor de salida proporcionara la energía a la siguiente etapa (en una fuente de alimentación con CFP en dos etapas).

2.2 Principio de Funcionamiento de la Estrategia OCC

La estrategia de control OCC puede ser implementada para CFP y está se basa en el modo de control de corriente el cual implementa dos lazos de control (un lazo externo de voltaje y un lazo interno de corriente). El interruptor Q_1 se enciende al inicio de cada periodo de conmutación de frecuencia constante por la frecuencia de reloj que es puesta en una de las entradas del biestable y es apagado cuando el voltaje de error del amplificador V_{ea} es interceptado con el voltaje integrado $v + (t)$ (que este dado por la suma de la corriente instantánea del inductor i_L y el V_{ea}) a través del comparador.

La Fig. 5 muestra el diagrama de control de la estrategia OCC, en la cual V_1 tiene como entrada V_{ea} y V_2 tiene como entrada a la suma de voltaje $i_L + V_{ea}$. En la Fig. 6 se muestran las principales formas de onda de la Fig. 5, en la cual la frecuencia de reloj marca el inicio de cada periodo, así como el inicio del crecimiento de la rampa lineal para que al ser interceptado con V_{ea} se apague el interruptor Q_1 .

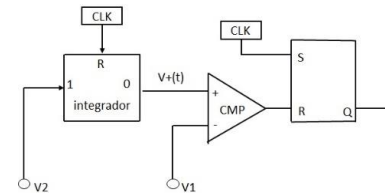


Fig. 5. Esquema de control de la estrategia de control OCC para el Convertidor Sepic sensando en $i_{L1}(t)$

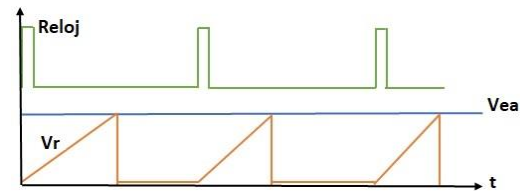


Fig. 6. Principales formas de onda del esquema de control OCC para CFP

De la igualación de $V_1 = V + (t)$, se obtiene que:

$$i_{s2} = \frac{V_{ea}}{R_s} \frac{(1-d)}{d} \quad (1)$$

Donde i_{s2} es el valor pico de la corriente del inductor L_1 cuando está conduciendo, R_s es la resistencia equivalente de sensado, V_{ea} es el voltaje de error y d es el ciclo de trabajo.

En este caso el convertidor se encuentra operando en MCC, aplicando la ley de Faraday al transistor cuando está conduciendo se obtiene:

$$v_g = L \cdot F_s \frac{i_{s2} - i_{s1}}{d} \quad (2)$$



donde i_{s1} es el valor de la corriente en el transistor cuando este inicia a conducir, F_s es la frecuencia de conmutación, V_g es el voltaje de entrada, d es ciclo de trabajo y L el valor del inductor.

La corriente promedio $i_{promedio}$ está definida por:

$$i_{prom} = \frac{i_{s2} + i_{s1}}{2} \quad (3)$$

y de (1)-(3), se obtiene la corriente promedio definido como:

$$i_{prom} = \left(\frac{V_{ea}(1-d)}{R_s} - \frac{V_g V_o}{2LF_s(V_g + V_o)} \right) \frac{V_o}{V_g + V_o} \quad (4)$$

Si i_{s1} llega a cero es decir entre MCC y MCD el voltaje de la rampa crítico es:

$$V_{r.crit} = \frac{V_{gp} \cdot V_o \cdot R_s}{(V_{gp} + V_o)2L \cdot F_s (1-d)} \quad (5)$$

El parámetro adimensional K se utiliza para estudiar los límites entre MCC y MCD

$$K = \frac{2L \cdot F_s \cdot V_{ea}}{R_s \cdot V_{gp}} \quad (6)$$

donde V_{gp} es el valor pico del voltaje de entrada en el convertidor y está definido por:

$$V_g = V_{gp} |\text{sen}(\omega t)| \quad (7)$$

También se establece otro parámetro dimensional M definido como:

$$M = \frac{V_o}{V_{gp}} \quad (8)$$

de (5)-(8) se puede obtener el valor de K_{crit} definida como:

$$K_{crit} = \frac{2M \cdot |\text{Sen}(\omega t)|}{M + |\text{Sen}(\omega t)|} \cdot \frac{M}{(M + |\text{Sen}(\omega t)|) \cdot \left(\frac{M}{M + |\text{Sen}(\omega t)|} - 1 \right)} \quad (9)$$

K_{crit} tendrá diferentes valores dependiendo el valor instantáneo del voltaje de línea en el que se encuentre. Por lo tanto, sus valores $K_{crit.min}$ y $K_{crit.max}$ están definidos como:

$$K_{crit.min} = \frac{2M^2}{M+1} \quad (10)$$

$$K_{crit.max} = 2M \quad (11)$$

El CFP opera entonces en MCC para todo el semiciclo de la línea de CA, si $K > K_{crit.max}$, y en MCD si $K < K_{crit.min}$.

En la Fig. 7 se muestra la evolución del FP y THD en función de M , donde se aprecia que mientras mayor sea el valor de M el FP y THD mejoran.

De la Fig. 7 se pueden obtener los valores teóricos en los cuales se aprecie mejor la sensibilidad de los parámetros THD en función de la variación de M . Esto se muestra en la Fig. 8, dicha gráfica muestra la tendencia del THD en función de M , esto mismo hace relación el FP, conforme crezca el valor de M mejores resultados de FP se obtendrán.

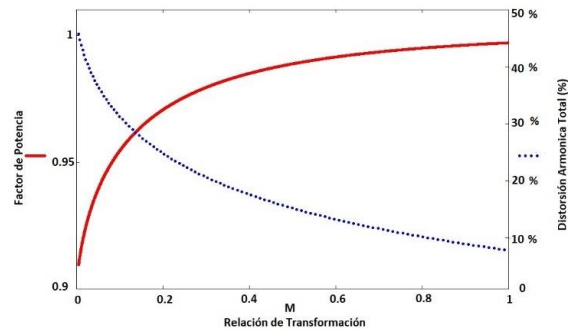


Fig. 7. FP y THD en función de la relación de transformación (M)

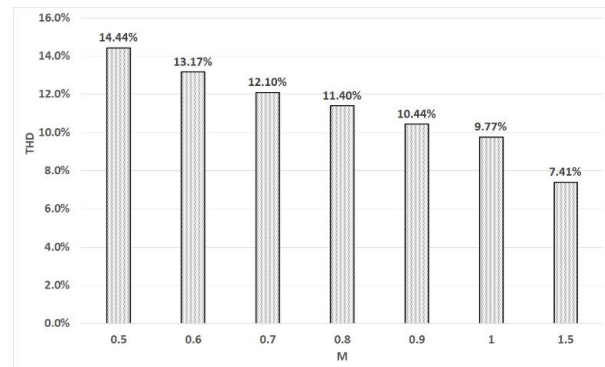


Fig. 8. Sensibilidad del THD a las variaciones de M

3. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

Para el diseño de la etapa de potencia a 50 W se utilizan las ecuaciones de la Tabla 1 y se definen los parámetros V_{in} , V_o y F_s mostrados en la Tabla 2. Los valores son elegidos de acuerdo con una relación de M en 0.7, lo cual hace trabajar al convertidor como reductor en la búsqueda de disminuir la tensión de salida, sin sacrificar el desempeño del CFP. Los valores de los componentes seleccionados en la etapa de potencia se aproximan a valores comerciales



Tabla 2. Parámetros de diseño de la etapa de potencia

Parámetro	Valor
V_{in}	220 V
V_o	218 V
F_s	100 kHz
$L_1 = L_2$	15 mH
C_1	68 nF
C_2	240 μ F

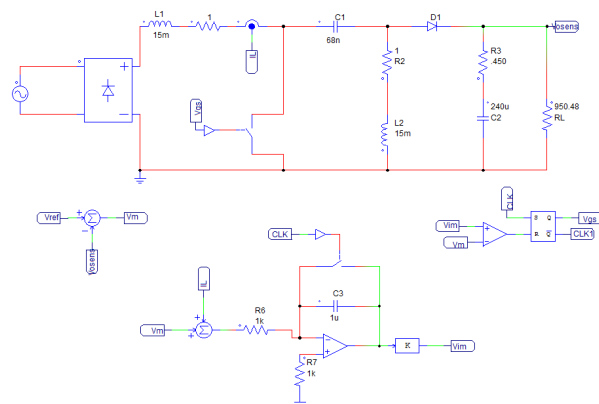


Fig. 9. Esquema de simulación del convertidor Sepic y OCC con Psim®

En la Fig. 9 se muestra el diagrama de simulación utilizado, el cual comprende la etapa de potencia (convertidor Sepic) y la etapa de control (estrategia de control OCC). Para la implementación de dicha estrategia utiliza un integrador con acción de reset, un sensor de voltaje en la salida del convertidor y un sensor de corriente el cual sensa la corriente del inductor L_1 , además de un biestable.

La corriente i_{L1} (voltaje $i_{L1}R_S$) se suma a el voltaje de error V_{ea} para después ser integrada, dicho voltaje entrada en la parte no-inversora del comparador. Por otra parte, el V_{ea} entra en la parte inversora del comparador. Dichas señales en el comparador se genera la señal para encender el interruptor Q_1 .

La Fig. 10 y Fig. 11 muestran la conformación de la corriente de entrada, tanto a plena y mitad de la carga, lo cual verifica el correcto funcionamiento de la estrategia OCC aplicada como CFP.

En la Fig. 12 se muestra el contenido armónico de la corriente de entrada presentada en la Fig. 10, en la cual se muestran dichos armónicos, comparados con los armónicos permitidos por la norma europea IEC 61000-3-2 para clase D. Se aprecia que los armónicos individuales cumplen sin ningún problema dicha norma en clase D.

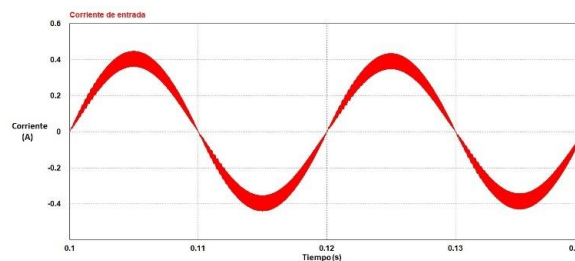


Fig. 10. Corriente de línea a plena carga (50 W)

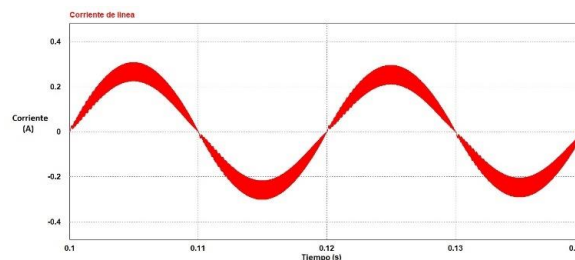


Fig. 11. Corriente de línea a mitad de la carga (25 W)

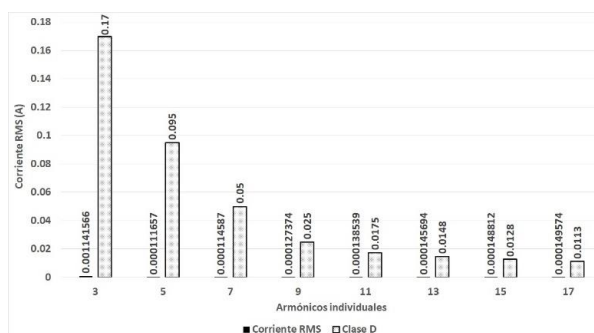


Fig. 12. Contenido armónico obtenido en simulación vs armónicos permitidos en clase D.

Se realizaron simulaciones para evaluar la variación de los armónicos individuales ante variaciones del parámetro M desde 0.5 hasta 1.5. La Fig. 13 muestra los resultados de esta evaluación, comparando los resultados con los armónicos correspondientes de la norma europea antes mencionada para una potencia de 50 W.

Los armónicos individuales mostrados en la Fig. 13 son evaluados para diferentes valores de M y estos cumplen sin ningún problema la norma IEC 61000-3-2 para clase D, sin embargo, si bien se aprecia que los resultados mejoran para valores más altos de M , hay que tomar en cuenta que esto supone un aumento de los esfuerzos de voltaje para la segunda etapa de la fuente de alimentación con CFP en dos etapas.

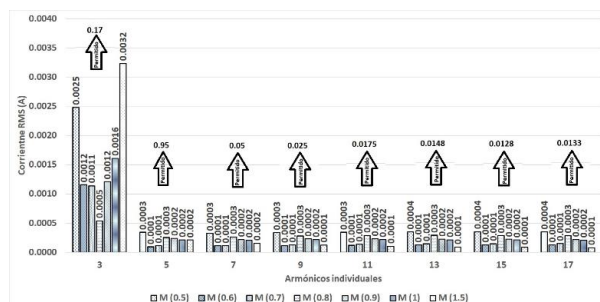


Fig. 13. Armónicos individuales con diferentes valores de M

La Fig. 14 muestra el voltaje de salida (218 V) en estado estable, que presenta un muy bajo rizado. Dicho rizado podría permitirse que creciera mucho más, dado que tenemos una segunda etapa en la fuente de alimentación que se encarga de mejorar la respuesta dinámica de toda fuente de alimentación (permitiendo que el capacitor de salida tenga un valor mucho menor).

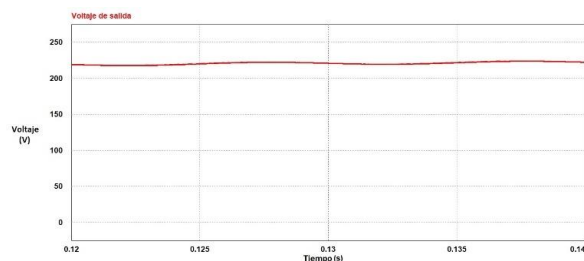


Fig. 14. Voltaje de salida en estado estable para una M de 0.7

4. CONCLUSIONES

La necesidad de encontrar soluciones sencillas y de bajo costo para realizar la función de CFP en sistemas de alimentación conmutados, ha llevado a la propuesta de soluciones para mejorar el desempeño de soluciones tradicionales conocidas como “Control por Multiplicador” o “Seguidor de Tensión”. En este artículo, se demuestra la viabilidad de usar la estrategia de Control de un Ciclo (OCC por sus siglas en inglés) en un convertidor Sepic de 50 W, para realizar la etapa de CFP en una fuente de alimentación de dos etapas. Tanto el análisis teórico y simulado presentaron resultados de FP cercano a la unidad y THD menor al 15% para una M de 0.7. Así como armónicos individuales que permiten cumplir con la normatividad aplicable sin contratiempos. La estrategia de control OCC es una solución de fácil análisis y aplicación para implementar la CFP en comparación con otras soluciones tradicionales como el “Control por Multiplicador” o “Seguidor de Tensión”. Sin embargo, es importante reconocer que el hecho de sensar la corriente en el inductor requiere de un mayor número de componentes (si bien dicho sensado también se puede realizar en el Mosfet, este requiere aplicar una doble integración en la etapa de control, para mantener resultados similares).

El FP y THD (así como desde luego los armónicos individuales) mejoran conforme se permite tener un mayor voltaje en la salida, lo cual representa trabajar como elevador el convertidor como se mostró en la Fig. 7. Si bien este comportamiento es interesante, se debe asumir un importante compromiso de diseño ya que una mayor tensión de salida representaría un problema para la segunda etapa ya que se vería sometida a mayores esfuerzos de tensión.

5. REFERENCIAS

- Cuk, S., & Middlebrook, R. D. (1977). *A new optimum topology switching DC-to-DC converter*. 1977 IEEE Power Electronics Specialists Conference. doi:10.1109/pesc.1977.7070814
- Duffey, C. K., & Stratford, R. P. (1989). *Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems*. IEEE Transactions on Industry Applications, 25(6), 1025–1034. doi:10.1109/28.44238
- Electromagnetic compatibility (EMC)-part 3: Limits section 2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current<16A per phase), IEC 61000-3-2 Document, 2006.
- Fernandez, A., Sebastian, J., Villegas, P., Hernando, M. M., & Lamar, D. G. (2005). *Dynamic Limits of a Power-Factor Preregulator*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 52(1), 77–87. doi:10.1109/tie.2004.841136
- Hernandez, M., Aguilar, C., Arau, J., Sebastian, J., & Uceda, J. (n.d.). *Comparative analysis of boost and buck-boost derived topologies used as power factor correctors*. IV IEEE International Power Electronics Congress. Technical Proceedings. CIEP 95. doi:10.1109/ciep.1995.535927
- Martins, D. C., de Souza Campos, F., & Barbi, I. (n.d.). *ZETA converter with high power factor operating in continuous conduction mode*. Proceedings of Intelec'96 - International Telecommunications Energy Conference. doi:10.1109/intlec.1996.572387
- Mohan N. et al, (2009). *Electrónica de Potencia Convertidores, aplicaciones y diseño*, pp 265-266. McGraw-Hill, México.
- Sebastian, J., Castro, I., Lamar, D. G., Vazquez, A., & Martin, K. (2016). *High power factor modular polyphase AC/DC converters with galvanic isolation based on Resistor Emulators*. 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). doi:10.1109/apec.2016.7467847
- Smedley, K. M., & Cuk, S. (1995). *One-cycle control of switching converters*. IEEE Transactions on Power Electronics, 10(6), 625–633. doi:10.1109/63.471281
- Zheren Lai, & Smedley, K. M. (1998). *A family of continuous-conduction-mode power-factor-correction controllers based on the general pulse-width modulator*. IEEE Transactions on Power Electronics, 13(3), 501–510. doi:10.1109/63.668113



Control basado en observador para el desplazamiento de estructuras con retardo en la señal de control

F. Ramírez-Rasgado* R-R. Galaz-Palma***
O. Hernández-González** C.-M. Astorga-Zaragoza*
G. Valencia-Palomo*** M.E. Guerrero-Sánchez**
B. Targui****

* 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.

**** Laboratoire d'Automatique de Caen, 6 Boulevard du Marechal Jun, 14050, Caen Cedex, France.

Resumen: Este trabajo presenta un control proporcional-derivativo (PD) basado en un observador de estados para reducir las oscilaciones en una estructura civil donde la señal de control presenta un retardo desconocido y la salida del sistema solo está disponible en instantes de tiempo. El observador se diseña utilizando el enfoque de alta ganancia, el cual considera la señal con el retardo máximo para su diseño. Posteriormente, ajustando las ganancias de un control PD se logra reducir las oscilaciones presentadas por el sistema. El esquema de control basado en observador se valida para una estructura de dos pisos ante distintos tiempos de muestreo y retardos inciertos.

Keywords: Sistema lineal, Salidas muestreadas, Observador de alta ganancia, Retardo incierto, Retardo variable.

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras civiles enfrentan diversos tipos de daños durante su funcionamiento; como causa principal de estos daños han sido fenómenos naturales eventualmente por terremotos (Morales-Valdez et al., 2019). Por esta razón este tema es emergente de considerar para poder prevenir fallas estructurales pudiendo ser fatales para la población. Muchas aportaciones se han establecido en el análisis de las vibraciones como lo presenta (Das et al., 2016).

Las técnicas utilizadas para desarrollar los diseños de control se basan en el análisis de estabilidad de Lya-punov, donde se asumen los parámetros conocidos de resorte, amortiguador y masa para representar el modelo matemático (Jiménez, 2004). La estabilidad de un sistema de control con retardo en tiempo continuo, la cual se evaluó mediante la inspección de los valores propios (Ariba and Gouaisbaut, 2020).

Para algunas aplicaciones de control es necesario conocer todas las variables de estado del sistema, sin embargo, esto representa un alto costo en la instrumentación. Por lo tanto, se recurre a los observadores de estado, los cuales a partir de las señales disponibles reconstruyen las que no lo están. La estimación simultánea de estados y parámetros con mediciones muestreadas tienen un problema práctico

para los sistemas físicos que están en tiempo continuo y sus parámetros están sujetos a incertidumbres (Ahmed-Ali et al., 2019). También existe un problema para reconstruir variables de estado no medibles, las cuales son necesarias para estabilizar el sistema mediante las mediciones de la salida con retardo (Battilotti, 2020).

Los retardos se pueden presentar en diferentes partes de los sistemas: variables estados, entradas, salidas, etc. Estas son debidas a diferentes causas como lo son; las redes de comunicación, inercias no modeladas, medición de los sensores, etc. Algunos ejemplos se muestran en (Abd et al., 2017; Qi et al., 2018; Guo et al., 2019). Considerando esto, algunos observadores han sido diseñados (Cacace et al., 2014; Ghanes et al., 2013).

En (Jian et al., 2009), analiza la relación entre la vulnerabilidad y la intensidad sísmica, con una respuesta de aceleración como entrada sísmica y en (Xu et al., 2020) otorga una propuesta para estabilizarlas; considerando esto se propone el esquema de solución que se abordará a continuación.

Este artículo presenta una solución para reducir los desplazamientos de una estructura tipo edificio donde la medición de salida solo está disponible en instantes de tiempo (t_k) y la señal de control presenta un retardo desconocido ($\tau(t)$), el cual es variante en el tiempo (Sección



2). La principal contribución de este artículo es el diseño de un control *PD* basado en observador de estados considerando señales en instantes de tiempo y retardos en la señal de control. Se propone un observador que proporciona la señal continua. Este observador logra brindar la señal incluso cuando el retardo en la señal de control es variante y desconocido, debido a que en su diseño se considera la cota máxima del retardo que pueda presentar (Sección 3). Para el diseño del observador se tiene que reescribir el sistema (Sección 4). Una vez diseñado el observador se propone la ley de control para el sistema estructural. El esquema de control es puesto a prueba en simulación considerando una estructura de 2 pisos ante la simulación del sismo de México en 1985 (Sección 5), por último, se presenta la conclusión (Sección 6).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Normalmente hay ciudades donde, a través de los tiempos ha crecido territorialmente, pero obteniendo limitantes de crecimiento en área; se ha ido edificando estructuras con n pisos para poder solventar y aumentar la ocupación de personal. En áreas terrestres se han detectado movimientos tectónicos los cuales generan sismos que afectan directamente a las estructuras edificadas. Este tipo de efectos naturales han puesto en marcha a que el conocimiento científico ayude a minimizar el impacto de estos acontecimientos. Varias de estas investigaciones utilizan modelos matemáticos (Rodríguez Torres et al., 2020) que representen el sistema (Fig. 1):

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} \\ l \end{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \\ y = [I_{n \times n} \ 0_{n \times n}] z(t) \end{cases} \quad (1)$$

donde M , C_s y K son matrices dadas respectivamente por la masa, constante de amortiguamiento y constante de resorte; las cuales están definidas como:

$$m = \text{diag}[m_1 \ m_2 \ \dots \ m_n] > 0 \quad (2)$$

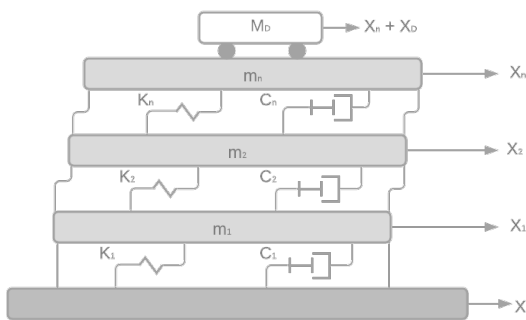


Fig. 1. Modelo de edificación

$$C_s = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \dots & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & 0 & \dots & -c_n & c_n \end{bmatrix} \geq 0 \quad (3)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & \dots & -k_n & k_n \end{bmatrix} \geq 0 \quad (4)$$

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, estas definen las características de la estructura del edificio.

Mientras que el vector l permite distribuir la señal escalar $\ddot{x}_g$ que representa el disturbio en cualquier nivel del vector:

$$l = [1, 1, 1, \dots, 1]^T \in \mathbb{R}^{n \times 1} \quad (5)$$

Definiendo las variables de estado $z(t) = [z_1(t), z_2(t)]^T = [x(t), \dot{x}(t)]^T$, el sistema (1) pudiese ser comparado con la siguiente forma:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (6)$$

donde E es un vector que ancla los disturbios a ciertos estados del sistema. Como las mediciones del sistema están disponible solamente en instantes de tiempo, se reescribe de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau) + Ed(t) \\ y(t_k) = Cx(t_k) \end{cases} \quad (7)$$

Sustituyendo (1) en (7) obtenemos el modelo descrito (8).

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}I \end{bmatrix} u(t - \tau) \\ \quad + \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} \\ -l \end{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \\ y(t_k) = [I_{n \times n} \ 0_{n \times n}] z(t_k) \end{cases} \quad (8)$$

3. DISEÑO DEL OBSERVADOR

Para estimar los estados del sistema en presencia de la señal de control con retardo se busca llevar el sistema a la siguiente forma:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau(t)) + \varphi(x(t), u(t), d(t)), \\ y(t_k) = Cx(t_k) = x^1(t_k). \end{cases} \quad (9)$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el estado del sistema, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ es la entrada, $y(t_k) \in \mathbb{R}^p$ es la salida muestreada del sistema, la cual está disponible en instantes de muestreo que satisface $0 \leq t_0 < \dots < t_k < t_{k+1} < \dots$ con los intervalos de muestreo definidos como $\Delta_k = t_{k+1} - t_k$ y $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta_k = +\infty$, $d(t)$ representa un disturbio en el sistema,



$x_{\tau(t)} = x(t - \tau(t))$ y $u_{\tau(t)} = u(t - \tau(t))$ son respectivamente los estados y la entrada con retardo desconocido, con:

$$x = (x_1 \dots x_q)^T, \quad x_{\tau(t)} = (x_{1\tau(t)} \dots x_{q\tau(t)})^T, \\ A = \begin{bmatrix} 0_{(n-1)p,p} & I_{(n-1),p} \\ 0_p & 0_{p,(q-1)p} \end{bmatrix}, \quad C = [I_p, \dots, 0_p]$$

donde B es una matriz de elementos constantes de dimensiones apropiadas, $x_{i,\tau(t)} = x_i(t - \tau(t))$, para $i = 1, \dots, n$ y I_{n-1} es una matriz identidad de dimensión $n - 1$. Se define $\tau(t)$ como una función desconocida que describe el retardo variable que afecta a los estados y a la entrada. Se denotará como a la cota máxima del valor del retardo a τ^* , ésta debe de considerarse como conocida. La función φ se define como:

$$\varphi(u(t), x(t)) = \begin{pmatrix} \varphi_1(u(t), x_1(t)) \\ \varphi_2(u(t), x_1(t), x_2(t)) \\ \vdots \\ \varphi_{n-1}(u(t), x_1(t), \dots, x_{q-1}(t)) \\ \varphi_n(u(t), x(t), d(t)) \end{pmatrix}$$

donde las no linealidades que conforman $\varphi(x(t), u(t), d(t))$ cumplen con la estructura triangular con respecto a $x_1, \dots, x_i$ y $x_{1,\tau(t)}, \dots, x_{i,\tau(t)}$. Considerando la estructura de φ y el hecho que (A, C) está en la forma canónica observable, entonces el sistema mostrado en (9) es uniformemente observable para cualquier entrada y entrada retrasada. Se considera que el sistema y el retardo cumplen con la suposición:

A1 El retardo variante satisface la siguiente propiedad:

- $\exists \tau^* > 0$, tal que $\sup_{t \geq 0} \tau(t) \leq \tau^*$.
- $\exists \beta > 0$, tal que $1 - \dot{\tau}(t) \geq \beta$.

Considerando esto, es posible diseñar un observador basándose en el enfoque de alta ganancia considerando la salida muestreada, siguiendo lo propuesto por

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t - \tau^*) + \varphi(\hat{x}(t), u(t), d(t)) \\ \quad - \theta \Delta_\theta^{-1} S^{-1} C^T \eta(t) \\ \dot{\eta}(t) = -\theta C S^{-1} C^T \eta(t), \quad t \in [t_k, t_{k+1}), k \in \mathbb{N} \\ \eta(t_k) = C\hat{x}(t_k) - y(t_k), \quad t = t_k \\ \hat{y}(t) = \hat{x}_1(t) \end{cases} \quad (10)$$

donde $\hat{x} = [x_1, \dots, \hat{x}_q]^T$ son los estados estimados y la matriz Δ_θ se define como

$$\Delta_\theta = \text{diag}(I_p, 1/\theta I_p, \dots, 1/\theta^{q-1} I_p) \quad (11)$$

con $\theta > 0$ que es el parámetro de ajuste del observador y S es una matriz simétrica que es la única solución para:

$$S + A^T S + S A - C^T C = 0. \quad (12)$$

considerando esto se propone el siguiente teorema.

Teorema 1. Considerando el sistema (9), el cual satisface las suposiciones necesarias. Entonces, existe un $\theta_0 > 0$ tal que para cada $\theta \geq \theta_0$, existe un $\chi_\theta > 0$ tal que si la cota máxima del diámetro de partición de la muestra Δ_M tal que

$$\Delta_M < \chi_\theta \quad (13)$$

entonces el estado del observado de (10) convergerá exponencialmente a una región circular con radio $r > 0$.

Prueba del Teorema 1. Definiendo el error de convergencia como $\tilde{x} = \hat{x} - x$ y $\tilde{x} = \Delta_\theta \tilde{x}$ y considerando la siguiente función candidata de Lyapunov-Krasovskii:

$$V(\tilde{x}) = \tilde{x}^T S \tilde{x} + \int_{t-\tau(t)}^t e^{\frac{-\alpha}{2\tau^*}(t-\sigma)} \tilde{x}^T(\sigma) e(\sigma) d\sigma \quad (14)$$

donde α es una constante positiva. Procediendo de igual manera del análisis convergencia propuesto en Hernández González et al. (2019) se asegura que el error de observación convergerá a una región circular con radio $r > 0$ si el retardo variante es menor al retardo máximo $\tau(t) < \tau^*$, por otro lado, si ambos son iguales $\tau(t) = \tau^*$ convergerá a cero.

4. APLICACIÓN AL MODELO ESTRUCTURAL

Aplicando los valores para una estructura de dos pisos a lo que equivale a $n = 2$ y con los datos de las masas de los pisos, las constantes de resorte y amortiguador de cada piso se muestran en la siguiente Tabla 1 (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

Sustituyendo los valores de la tabla anterior en (2-4), se obtiene:

$$M = \begin{bmatrix} 3.17 & 0 \\ 0 & 4.609 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} 16731.462 & -7531.628 \\ -7531.628 & 7531.628 \end{bmatrix}, \\ C_s = \begin{bmatrix} 14.222 & -6.834 \\ -6.834 & 6.834 \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones (7) y (8) se reescriben de la forma (9), quedando:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{p,p} & I_{p,p} \\ 0_{p,p} & 0_{p,p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{p,p} \\ M^{-1} I_{p,p} \end{bmatrix} u(t - \tau(t)) \\ \quad + \begin{bmatrix} 0_{p,p} \\ -M^{-1} K z_1 - M^{-1} C_s z_2 + I_{p,(p-1)} d(t) \end{bmatrix} \\ y(t_k) = [I_{p,p} \quad 0_{p,p}] z(t_k) \end{cases} \quad (15)$$

donde $p = 2$, se considera como $z_1 = [x]^T = [x_1 \quad x_2]^T$ y $z_2 = [\dot{x}]^T = [\dot{x}_1 \quad \dot{x}_2]^T$, las salidas del sistema son las posiciones $z_1 = [x_1 \quad x_2]^T$, el sistema es perturbado por una función $d(t) = \sin(wt)$, la cual representa las oscilaciones externas.

4.1 Ley de control

Este sistema lineal puede ser establecido por el controlador PD

$$u = -k_p(x - x_d) - k_d(\dot{x} - \dot{x}_d) \quad (16)$$

donde x_d es la posición deseada. Para el control de vibración se considera $x_d(t) = 0$, entonces $\dot{x}_d(t) = 0$ (Rodríguez Torres et al., 2020). El objetivo principal de este control es para que el sistema no presente movimiento cuando una señal sísmica perturbe el sistema, 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.

5. SIMULACIONES

A continuación se validará el sistema en lazo cerrado (Fig. 2) propuesto en simulación utilizando un paso de integración $\Delta t = 0.5ms$. Asumiendo una señal de control con un retardo, la cual tiene la siguiente dinámica:

$$\tau(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t \in [0, a]s \\ \tau_{M_i}((t-a)/0.5) & \text{si } t \in (a, b]s \\ \tau_{M_i} & \text{si } t > b s \end{cases} \quad (17)$$

con $a = 2, b = a + 0.5, \tau_{M_1} = 10ms$ y $\tau_{M_2} = 5ms$, los valores propuestos de retardo máximo en la señal son considerando lo permitido debido a la dinámica del sistema estructural. La señal de salida es muestreada considerando los siguientes periodos $\Delta_{max_1} = 0.1s$ y $\Delta_{max_2} = 10ms$. El sistema es perturbado con una señal externa que representa el sismo, para este caso se utilizaron datos reales, proporcionados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes del sismo detectado en la ciudad de México en 1985. Los valores de la ley de control son: $k_p = 2116.8$ y $k_d = 255.285$, los cuales fueron obtenidos siguiendo la metodología presentada por Rodríguez Torres et al. (2020), estos hacen que el controlador reduzca considerablemente los desplazamientos de la estructura. El parámetro de ajuste del observador es $\theta = 2.5$, las condiciones iniciales del sistema original son $z(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$ y del observador $\hat{z}(0) = 5 \times 10^{-5}[1 \ 1 \ 0]^T$.

En la Fig. 3 y la Fig. 4 se muestran las oscilaciones presentadas en x_1 y x_2 por el sistema en lazo abierto y lazo cerrado, estos son denotados por $(\cdot)_{LA}$ y $(\cdot)_{PD}$, respectivamente. Para esta simulación se considera el caso más demandante con τ_{M_1} y Δ_{max_1} . Se observa que el sistema en lazo cerrado logra reducir las oscilaciones en comparación con el sistema en lazo abierto, incluso en presencia de retardos en la señal de control y medición en la señal. En la Fig. 5 se muestra la señal continua (no disponible), la señal muestreada (disponible) en un periodo de Δ_{max_1} y la señal continua dada por el observador, dicha señal es utilizada para obtener la ley de control del sistema.

La norma del error de observación se define como $\|\hat{z}(t)\|$ mostrada en la Fig. 6. Se muestran tres casos diferentes para ver cómo afecta el tiempo de muestreo y el retardo máximo. En el caso más demandante τ_{M_1} y Δ_{max_1} , se presenta la mayor cota del error y el mayor tiempo de convergencia, sin embargo, al considerar un Δ_{max_2} se presenta un tiempo de convergencia menor. Por otro lado, al considerar un retardo máximo menor como es el caso de τ_{M_2} y Δ_{max_1} presenta una cota menor en el error pero un tiempo de convergencia mayor. De igual forma se muestra un error de observación acotado para un $t \leq 2.5 s$, posteriormente se convergerá exponencialmente a cero debido a que $\tau(t) = \tau^*$.

6. CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó un control PD basado en un observador con el enfoque de alta ganancia considerando señales de medición solo disponibles en instantes de tiempo y la señal de control presenta un retardo variable y desconocido. El control logra reducir considerablemente

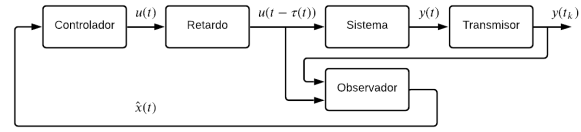


Fig. 2. Diagrama a bloques del sistema en lazo cerrado.

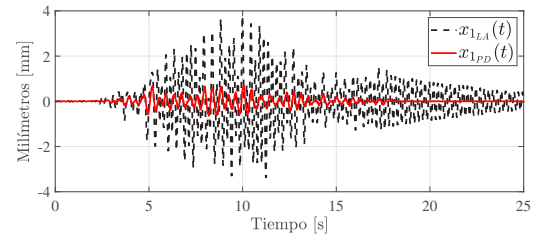


Fig. 3. Comparación de las oscilaciones de la estructura (x_1).

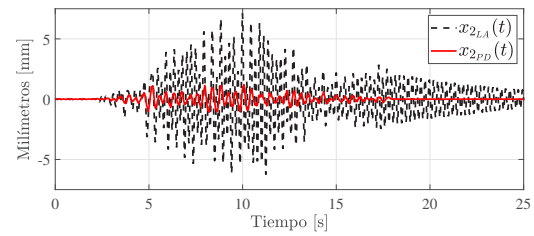


Fig. 4. Comparación de las oscilaciones de la estructura (x_2).

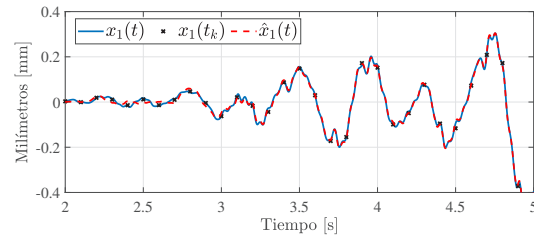


Fig. 5. Medición de la posición x_1 y la señal obtenida por el observador.

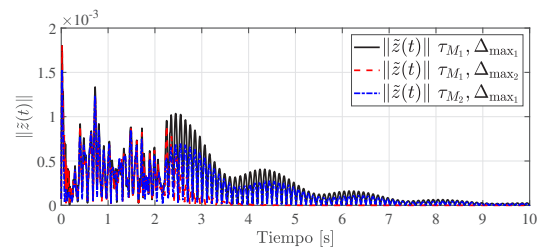


Fig. 6. Norma del error de observación $\|\hat{z}(t)\|$.



los desplazamientos presentados en la estructura debido a las oscilaciones sísmicas incluso en presencia de un retardo desconocido para la ley de control.

REFERENCIAS

- Abd, M.H., Tahir, F.R., Al-Suhail, G.A., and Pham, V.T. (2017). An adaptive observer synchronization using chaotic time-delay system for secure communication. *Nonlinear Dynamics*, 90(4), 2583–2598.
- Ahmed-Ali, T., Tiels, K., Schoukens, M., and Giri, F. (2019). Sampled-data adaptive observer for state-affine systems with uncertain output equation. *Automatica*, 103, 96–105.
- Ariba, Y. and Gouaisbaut, F. (2020). Technical Note : Performance analysis for time-delay systems and application to the control of an active mass damper. Technical Report Rapport LAAS N° 20060, LAAS - CNRS ; ICAM.
- Battilotti, S. (2020). Continuous-time and sampled-data stabilizers for nonlinear systems with input and measurement delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 65(4), 1568–1583.
- Cacace, F., Germani, A., and Manes, C. (2014). Predictor-based control of linear systems with large and variable measurement delays. *International Journal of Control*, 87(4), 704–714.
- 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.
- Ghanes, M., De Leon, J., and Barbot, J.P. (2013). Observer design for nonlinear systems under unknown time-varying delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 58(6), 1529–1534.
- 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., Guerrero, M.E., Pérez-Gómez, A., Astorga-Zaragoza, C., and Moreno-Vazquez, J.d.J. (2019). Continuous-discrete observer for nonlinear systems with sampled measurements: Application to a 1-dof helicopter. In *Congreso Nacional de Control Automático 2019*, 2594–2492. IFAC.
- 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.
- Jiménez, René y Alvarez-Icaza, L. (2004). Observador adaptable para edificios basado en mediciones de fuerza y aceleración. *Journal of Vibration and Control*, 318–323.
- 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.
- Qi, W., Kao, Y., Gao, X., and Wei, Y. (2018). Controller design for time-delay system with stochastic disturbance and actuator saturation via a new criterion. *Applied Mathematics and Computation*, 320, 535–546.
- 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*.
- 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.



Estudio comparativo de convertidores multinivel con número reducido de interruptores

Eduardo Madrigal Mendez* Rodolfo Amalio Vargas Méndez** Jesus Aguayo Alquicira***

*Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, (e-mail: eduardo.madrigal19ea@gmail.com.mx)

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, (e-mail: rodolfo.vm@cenidet.tecnm.mx)

***Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, (e-mail: jesus.aa@cenidet.tecnm.mx)

Resumen: En este artículo se presenta un estudio comparativo de los convertidores multinivel con número reducido de interruptores. El estudio consiste en analizar diferentes topologías comparando parámetros como THD, número de fuentes de CD, cantidad de interruptores y niveles en la señal de salida del convertidor. El concepto elemental de un convertidor multinivel para lograr mayor potencia es utilizar una serie de interruptores de semiconductores de potencia con varias fuentes de corriente continua de menor voltaje para realizar la conversión de potencia sintetizando una onda de voltaje en forma de escalera. Sin embargo, al tener un mayor número de niveles, da como resultados armónicos más pequeños, pero por otro lado tiene más componentes y es más complejo de controlar. Hoy en día, la mejora de su rendimiento es uno de los retos más importantes y ha dado lugar a muchos estudios sobre su topología y sistema de control.

Palabras clave: Inversor multinivel, convertidor, conmutación, tensión, interruptores, fuentes.

1. INTRODUCCIÓN

Los convertidores de corriente directa (CD) a corriente alterna (CA), también conocidos como inversores, forman parte esencial de los sistemas eléctricos y tienen muchas aplicaciones, tales como: compensadores de energía reactiva, variadores de velocidad, fuentes de alimentación ininterrumpida y vehículos eléctricos. Los inversores convencionales producen una señal de salida de onda cuadrada con dos niveles de voltaje positivos y negativos. Los voltajes de conmutación de los interruptores de potencia, y los esfuerzos de tensión de los inversores convencionales son considerables.

Para resolver dichos problemas se han introducido los inversores multinivel con más de tres niveles en la señal de salida. Los inversores multinivel presentan las siguientes ventajas: una alta calidad de potencia, un menor contenido armónico y menores pérdidas de conmutación. (Prasad et al., 2013). Las topologías clásicas de los convertidores multinivel son: Diodos de enclavamiento (NPC), Capacitor flotante (FC), y Puente H en Cascada (CHB).

La calidad de un inversor multinivel se establece por el número de niveles que tiene a su señal de salida. Sin embargo, el aumento del número de niveles en la señal

de salida requiere un aumento del número de dispositivos semiconductores, por lo que se genera un aumento de la complejidad del control y del funcionamiento del inversor multinivel. (Sravani E. and Reddy N., 2015). En este sentido el número de dispositivos semiconductores debe reducirse.

Los inversores en cascada de varios niveles se componen de una conexión en serie de múltiples inversores monofásicos. Los inversores multinivel en cascada se dividen en dos tipos: Si el valor de todas las fuentes de tensión de CD es del mismo valor, se denominan inversores simétricos y en caso de que el valor de las fuentes de tensión de CD son todas diferentes y regularmente establecidas en múltiplos, se denominan inversores asimétricos. Muchas topologías se basan en los inversores CHB. Algunos de ellos utilizan fuentes de voltaje simétricas y la mayoría utiliza fuentes de voltaje asimétricas para minimizar el número de interruptores. (Ahmad M. et al., 2015).

En este trabajo se revisa el estudio y el análisis de las topologías multinivel con un número reducido de interruptores.



2. TOPOLOGÍAS PRINCIPALES DE UN CONVERTIDOR MULTINIVEL

Para dimensionar el gran impacto que ha tenido el estudio de nuevas topologías multinivel con una reducción de elementos semiconductores. Se puede observar en la Tabla 1 el número de interruptores usados en las topologías clásicas. (Prasad et al., 2013). En esta tabla se observa que la conexión en cascada tiene un menor uso de elementos semiconductores.

En la Fig. 1. se puede comprobar que, al incrementar el número de niveles en la señal de salida, el contenido armónico disminuye considerablemente. (Derakhshanfar M., 2010).

Tabla 1. Comparativa de topologías principales de un convertidor multinivel.

Tipo de inversor	Número de interruptores	Número de capacitores	Número de diodos
2 nivel	12	3	0
5-nivel diodo anclado	24	12	36
5-nivel capacitor flotante	24	30	0
5-nivel en cascada	24	6	0
9-nivel diodo anclado	48	24	72
9-nivel capacitor flotante	48	60	0
9-nivel en cascada	48	12	0

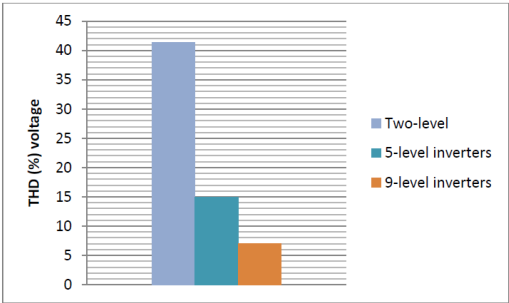


Fig. 1. Contenido armónico de las principales topologías de convertidores multinivel.

La distorsión de voltaje armónico en sistemas de energía de 69 kV e inferiores está limitada a un 5% de distorsión armónica total con cada distorsión armónica individual limitada al 3%. Los límites armónicos actuales varían en función de la fuerza del sistema en el que se inyectan. Esencialmente, cuanto más

capaz es el sistema de manejar las corrientes armónicas, más se le permite inyectar. (IEEE Std 519.,2014).

3. COMPARACIÓN DE TOPOLOGÍAS CON NÚMERO REDUCIDO DE INTERRUPTORES

El objetivo principal de la comparación de topologías es analizar las estructuras utilizadas para aumentar el número de niveles en la señal de salida, disminuyendo el número de elementos utilizados.

Para verificar el rendimiento de las topologías se consideran los siguientes criterios: el número de interruptores, el contenido armónico y el número de fuentes de voltaje de CD. Las topologías que se utilizan para esta comparación se denominan (R1-R7). Estas topologías son enfocadas a un número pequeño de niveles.

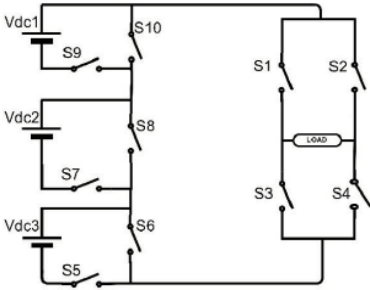


Fig. 2. Topología R1.

En la topología R1 se divide en dos secciones teniendo en la parte izquierda la generación de niveles en la señal de salida y en la parte derecha se tiene la configuración puente H. (Wale S. and Patil S.,2017).

En la Tabla 2 se describen las combinaciones necesarias en los interruptores para obtener el mayor número de niveles en la señal de salida.

Tabla 2. Estados de conmutación de los interruptores topología R1.

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	Señal de salida
ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	Vdc1
ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	Vdc1 + Vdc2
ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	Vdc1 + Vdc2 + Vdc3
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	0
OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	-Vdc1
OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	-Vdc1 - Vdc2
OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	-Vdc1 - Vdc2 - Vdc3



configuración puente H. (Nilkar M. et al., 2012). El inconveniente de la topología R2 es que al disminuir un interruptor se afecta la cantidad de niveles en la señal de salida, restando dos niveles en comparación de la topología R1.

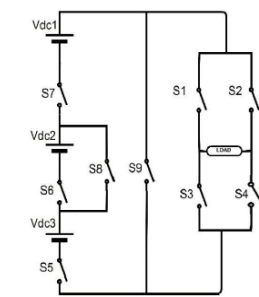


Fig. 3. Topología R2.

En la Tabla 3 se representan las combinaciones necesarias en los interruptores para alcanzar el mayor número de niveles en la señal de salida.

Tabla 3. Estados de conmutación de los interruptores topología R2.

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	Señal de salida
ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	Vdc1 + Vdc2
ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	Vdc1 + Vdc2 + Vdc3
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	0
OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	-Vdc1 -Vdc2
OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	-Vdc1 -Vdc2 -Vdc3

La topología R3 de la Fig.4. se divide en dos secciones, en la parte izquierda se tiene la generación de niveles en la señal de salida y en la parte derecha se tiene la configuración puente H. (Nilkar M. et al., 2012). Una ventaja de la topología R3 en comparación con la topología R2, es el uso de la misma cantidad de interruptores para obtener una señal de salida con un incremento de dos niveles.

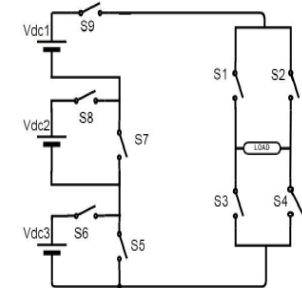


Fig. 4. Topología R3.

En la comparación antes mencionada se puede deducir que la estructura de conexión de los interruptores puede favorecer en gran medida al número de niveles en la señal de salida.

Tabla 4. Estados de conmutación de los interruptores topología R3.

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	Señal de salida
ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	Vdc1
ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	Vdc1 + Vdc2
ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	ON	Vdc1 + Vdc2 + Vdc3
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	0
OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	-Vdc1
OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	-Vdc1 -Vdc2
OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	-Vdc1 -Vdc2 -Vdc3

La topología R4 de la Fig.5. en la parte izquierda se tiene la generación de niveles en la señal de salida y en la parte derecha se tiene el control de polaridad en la carga. (Nilkar M. et al., 2012).

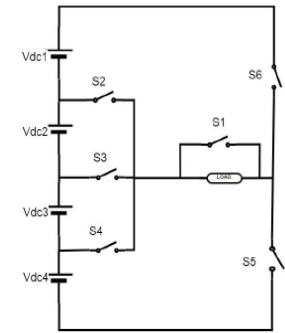


Fig. 5. Topología R4.

La topología R4 en comparación con las topologías R1, R2 y R3, presenta una diferencia significativa en el número de interruptores, al tener solo seis interruptores y alcanzar el mismo número de siete niveles en la señal de salida. En la Tabla 5 se muestran las secuencias de conmutación.

Tabla 5. Estados de conmutación de los interruptores topología R4.

S1	S2	S3	S4	S5	S6	Señal de salida
OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	Vdc4
OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	Vdc3 + Vdc4
OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	Vdc2 + Vdc3 + Vdc4
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	0
OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	-Vdc1
OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON	-Vdc1 -Vdc2
OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON	-Vdc1 -Vdc2 -Vdc3



La topología R5 de la Fig.6. se tiene la generación de niveles en la señal de salida en combinación con el puente H, de esa forma controlan los niveles y la polaridad en la carga. (Prakash G. et al., 2014).

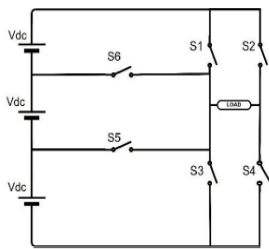


Fig. 6. Topología R5.

La ventaja que presenta la topología R5 en comparación a la topología R4 es obtener una señal de siete niveles con la misma cantidad de interruptores y con la reducción de una fuente de CD. Se puede apreciar que la topología R5 está dentro de la categoría de inversores simétricos.

Tabla 6. Estados de conmutación de los interruptores topología R5.

S1	S2	S3	S4	S5	S6	Señal de salida
OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	Vdc
OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON	2Vdc
ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	3Vdc
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	0
OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	-Vdc
OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	-2Vdc
OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	-3Vdc

La topología R6 de la Fig.7. se divide en dos secciones, en la parte izquierda se tiene la generación de niveles en la señal de salida y en la parte derecha se tiene la configuración puente H. (Khan A. et al., 2019).

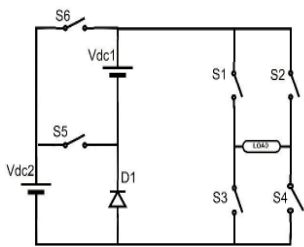


Fig. 7. Topología R6.

De las topologías R1 a R6 se tiene que la R6 es la que tiene menor cantidad de interruptores y fuentes de CD para la generación de siete niveles en la señal de salida. Dicha topología tiene como características el uso de un diodo, el cual se comporta como un interruptor no controlado. El funcionamiento del diodo se establece por la señal eléctrica que recibe en sus dos terminales al conmutar los interruptores.

Tabla 7. Estados de conmutación de los interruptores topología R6.

S1	S2	S3	S4	S5	S6	Señal de salida
ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	Vdc1
ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	Vdc2
ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	Vdc1 + Vdc2
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	0
OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	-Vdc1
OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	-Vdc2
OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	-Vdc1 -Vdc2

La topología R7 de la Fig.8. se divide en dos secciones, en la parte izquierda se tiene la generación de niveles en la señal de salida y en la parte derecha se tiene la configuración puente H. (Tarmizi et al., 2019).

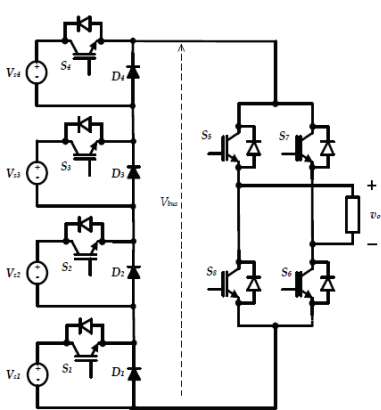


Fig. 8. Topología R7.

La topología R7 es un convertidor que logra generar una señal de salida de 31 niveles. En comparación con la topología R2, se obtiene un incremento muy significativo al sumar 26 niveles más a la señal de salida con el uso de las mismas fuentes de CD y la reducción de un interruptor.



Tabla 8. Estados de conmutación de los interruptores topología R8.

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Señal de salida
ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	Vdc1 +Vdc2 +Vdc3 +Vdc4
OFF	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	Vdc2 +Vdc3 +Vdc4
ON	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	Vdc1 +Vdc3 +Vdc4
OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	Vdc3 + Vdc4
ON	ON	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	Vdc1 +Vdc2 +Vdc4
OFF	ON	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	Vdc2 + Vdc4
ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	Vdc1 + Vdc4
OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	Vdc4
ON	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF	OFF	Vdc1 +Vdc2 +Vdc3
OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF	OFF	Vdc2 + Vdc3
ON	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	OFF	Vdc1 + Vdc3
OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	OFF	Vdc3
ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	Vdc1 + Vdc2
OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	Vdc2
ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	Vdc1
OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	0
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	-Vdc1
OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	-Vdc2
ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	-Vdc1 -Vdc2
OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	-Vdc3
ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	-Vdc1 -Vdc3
OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	-Vdc2 -Vdc3
ON	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	-Vdc1 -Vdc2 -Vdc3
OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	ON	-Vdc4
ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	ON	-Vdc1 -Vdc4
OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	ON	ON	-Vdc2 -Vdc4
ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	ON	ON	-Vdc1 -Vdc2 -Vdc4
OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	-Vdc3 -Vdc4
ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	-Vdc1 -Vdc3 -Vdc4
OFF	ON	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	-Vdc2 -Vdc3 -Vdc4
ON	ON	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	-Vdc1 -Vdc2 -Vdc3 -Vdc4

Tabla 9. Comparativa de las topologías R1-R7.

Topologia	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Interruptores	10	9	9	6	6	6	8
Fuentes DC	3	3	3	4	3	2	4
Niveles de salida	7	5	7	7	7	7	31

Como se observa en la Tabla 9 las topologías R6 y R7 son las que mejor rendimiento presentan de acuerdo con el uso de interruptores y fuentes de CD, aunque la cantidad de niveles son diferentes, cada uno represente la forma más reducida conforme a las topologías clásicas de los convertidores multinivel.

4. SIMULACIÓN TOPOLOGÍA R6

En este apartado se presentan los resultados de simulación de la topología asimétrica R6, usando la técnica de modulación SPWM. La simulación se realizó en el software PSpice, utilizando las siguientes características: Para fuentes simétricas un valor de 85V y para fuentes asimétricas Vdc1= 57V, Vdc2= 114V y diferentes índices de frecuencia (25,50 y 75), para comparar el efecto en el contenido armónico en la señal de salida.

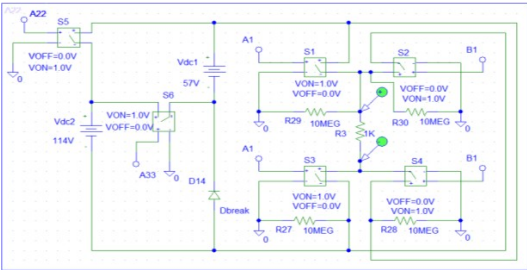
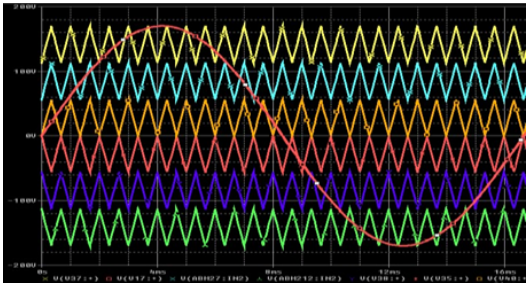


Fig. 9. Diagrama eléctrico de la topología R6 en el software PSpice.

Para la simulación de la topología R6 se consideró el uso de componentes semiconductores ideales, tal como se ve en la Fig. 9.



En la Fig.11 se observa los 6 patrones generados por las señales descritas en la Fig.10.

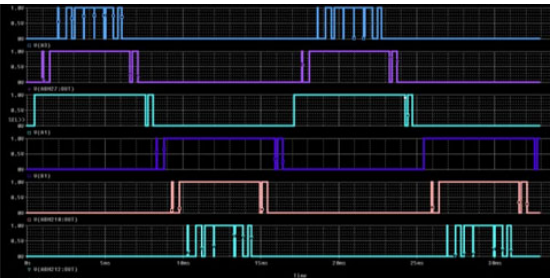


Fig. 11. Pulsos de control generados por la SPWM.



Fig. 12. Señal de salida de la topología R6 contra la señal moduladora de referencia.

En la Fig.12 se puede observar que la señal verde representa la señal de salida de la topología R6 a un índice de frecuencia de 25 contra la señal moduladora de color rojo.

En la Tabla 10 se observan los resultados obtenidos en la simulación del THD, al usar diferentes índices de frecuencia y fuentes asimétricas y simétricas.

Tabla 10. Valor del contenido armónico a diferentes índices de frecuencia.

Tabla 10. Valor del contenido armónico a diferentes índices de frecuencia.

Técnica de modulación SPWM	Índice de frecuencia	THD con fuentes simétricas	THD con fuentes asimétricas
PD	25	24.54%	16.47%
	50	22.80%	14.77%
	75	21.82%	13.84%
POD	25	24.67%	16.50%
	50	22.68%	14.64%
	75	21.75%	13.85%
APOD	25	24.54%	16.40%
	50	22.78%	14.74%
	75	21.77%	13.87%

5. CONCLUSIONES

Para aumentar el número de niveles en la señal de salida de un convertidor multinivel, es necesario conectar varias unidades básicas en serie. En las topologías descritas se muestra que el uso de conexiones en cascada son la base principal para el diseño de nuevas topologías con un menor número de interruptores y esto se debe, a la gran ventaja de su funcionamiento básico y repetitivo.

En las tablas correspondientes de cada topología revisada, se puede definir que una correcta estructura del diagrama eléctrico puede generar ventajas significativas, como es la reducción de interruptores y fuentes DC, además en los resultados obtenidos en la simulación se puede observar el impacto que tiene el uso de fuentes simétricas y asimétricas en el contenido armónico total.

También se comprueba que el uso de un índice de frecuencia y técnica de modulación correcta ayuda en la reducción de la THD.

6. REFERENCIAS

Prasad K. N. V; Kumar G. R; Kiran T. V. and Narayana G. S. (2013). "Comparison of different topologies of cascaded H-Bridge multilevel inverter". International Conference on Computer Communication and Informatics, Coimbatore.

Derakhshanfar M. (2010). "Analysis of different topologies of multilevel inverters". Master of Science Thesis.

Tarmizi, T; Taib, S. and Desa, MKM. (2019). "Design and Verification of Improved Cascaded Multilevel Inverter Topology with Asymmetric DC Sources". JOURNAL OF POWER ELECTRONICS.

Sravani E. and Reddy N. R. S. (2015). "Performance analysis of a multilevel inverter topology with reduced switches". International Conference on Computer, Communication and Control (IC4), Indore.

IEEE Std 519. (2014). "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," Revision of IEEE Std 519-1992.

Ahmad M; UIMehmood M; Nawaz R; Umair M; Hussian Q. and AhmedRaza M. (2018). "A Multilevel Inverter Topology with Reduced Switches". IEEE 21st International Multi-Topic Conference (INMIC), Karachi.

Wale S. and Patil S. (2017). "A developed single phase cascaded multilevel inverter with reduced number of power switches"Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT).

Prakash G., B. M and U. S. (2014). "A New Multilevel Inverter with Reduced Number of Switches", International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS).

Khan A; Ahmad M; Bhatti M. A; Ijaz M. A. and Ullah

S. (2019). "A Comparative Study of Multilevel Inverter Typologies with Reduced Switches". International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), Lahore, Pakistan.

Nilkar M; E. Babaei E; and Sabahi M. (2012). "A new single-phase cascademultilevel inverter topology using four-level cells", 20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012).



Cinemática del diseño de un prototipo rehabilitador de tobillo de tres grados de libertad.

Agustín Barrera Sánchez*, Wilberth Melchor Alcocer Rosado*, Miguel Ángel García Velarde*, Andrés Blanco Ortega*, Arturo Abúndez Pliego*, Jorge Colin Ocampo*.

*Tecnológico Nacional de México / CENIDET. Av. Palmira esq. Apatzingán s/n. Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos, México. C.P. 62490. E-mail: agustin.barrera19me@cenidet.edu.mx

Resumen: En este trabajo se presenta el análisis cinemático utilizado para validar la funcionalidad del diseño y construcción de un prototipo rehabilitador de tobillo de tres grados de libertad de movimiento pasivo continuo, capaz de realizar los movimientos básicos del tobillo, flexión/extensión, supinación/pronación y abducción/aducción. Se realiza la síntesis de dos cadenas cinemáticas, utilizando las ecuaciones de cierre de circuito y de Euler, que permiten determinar las longitudes, velocidades y aceleraciones de los actuadores lineales del mecanismo para cumplir con las posiciones y movimientos de la plataforma móvil del rehabilitador. Los perfiles de trayectoria para los movimientos de la plataforma del rehabilitador se basaron en polinomios 4-5-6-7.

Palabras clave: cinemático, rehabilitador, flexión/extensión, supinación/pronación, abducción/aducción, cadenas cinemáticas, efector final, movimiento.

1. INTRODUCCION

El tobillo es una articulación que desempeña un rol importante en la vida de las personas porque permite la movilidad y desplazamiento en su actividad cotidiana. Esta articulación es fundamental para soportar el peso y equilibrar la carga del cuerpo humano.

Debido al movimiento que realiza el tobillo, frecuentemente sufre lesiones físicas que, dependiendo del grado y la fase de recuperación, requieren de tratamientos no solo analgésicos sino de índole fisioterapeuta para su recuperación. El tratamiento adecuado para la recuperación del tobillo, ayuda a prevenir la aparición de la inestabilidad crónica y aumenta la amplitud de movimiento, así como la resistencia de los músculos y ligamentos, controla la motricidad, mejora la propiocepción y las condiciones de pacientes con enfermedades neuromusculares [1, 2, 3, 4].

En la rehabilitación existen dispositivos auxiliares para realizar terapias físicas (Figura 1), en los cuales es evidente su gran limitación sobre la variedad de ejercicios necesarios para lograr su objetivo, además de no permitir hacer un correcto diagnóstico del avance del paciente. Los ejercicios para la rehabilitación, se realizan en rutinas o series de repeticiones que requieren de tiempo, son tediosas y algunas de ellas complicadas. Se requieren dispositivos que permitan ejercicios precisos y adecuados para la rehabilitación del paciente. Por lo tanto, es necesario introducir a los procesos de rehabilitación dispositivos mecatrónicos, que faciliten el trabajo a los terapeutas y permitan reducir los tiempos de atención a los pacientes [5, 6]. Así como,

brindar una correcta y oportuna rehabilitación y ofrecer terapias personalizadas sin (o con menos) supervisión [7, 8].



Figura 1. Dispositivos de rehabilitación simple.

Se recomienda que se realicen ejercicios con movimiento pasivo, es decir, que sea un terapeuta/dispositivo quien ejerza la fuerza para mover el pie del paciente, y que se realicen ejercicios en los 3 planos anatómicos (Figura 2), así como movimientos combinados para asegurar una mejor recuperación. Los dispositivos que se encuentran propuestos en centros de investigación, en universidades e incluso los desarrollados por particulares en su gran mayoría, se observa que algunos son redundantes y/o sobreactuados o no proveen los 3 tipos de movimiento del pie y aquellos que los proveen resultan demasiado costosos con mantenimientos complicados.



Plano	Movimiento	RDM (grados)
Sagital (y)	Plantarflexión	30
	Dorsiflexión	50
Frontal (x)	Inversión	52
	Eversión	52
Transverso (z)	Aducción	45
	Abducción	45

Figura 2. Movimientos angulares y rangos máximos del tobillo.



Se propone un *prototipo* orientado a la rehabilitación del tobillo en movimiento pasivo continuo (MPC) y proveerá los tipos de movimientos básicos y combinados. El mecanismo está basado en un robot paralelo, con 2 actuadores lineales y uno rotativo. Validado a través de los métodos de lazo vectorial y la identidad de Euler, para obtener los modelos matemáticos que facilitan determinar la posición del efector final [1].

2. PROTOTIPO REHABILITADOR DE 3 GDL

2.1 Sistema mecánico.

Se considera que el mecanismo cumpla con los movimientos básicos del pie, con una configuración de robot paralelo de 2RPS+1R-1S (2 actuadores lineales con una articulación de revoluta, una prismática y una esférica; más la base giratoria con una articulación de revoluta; y el poste de soporte con una articulación esférica). También debe soportar cierta carga generada por el paciente al estar sentado, con el pie a rehabilitar apoyado en el efector final del mecanismo (Figura 3).

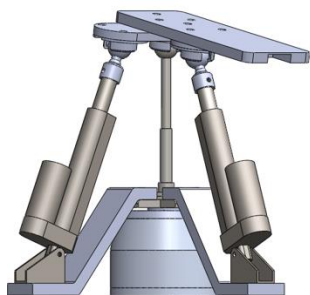


Figura 3. Prototipo rehabilitador de 3 gdl.

El prototipo está constituido por tres principales partes: una base fija, una base giratoria y el efector final: a) La base fija, es la parte del rehabilitador donde se aloja el actuador rotativo para realizar los movimientos de abducción/aducción y está formada por: la tapa de motor, un alojamiento de motor, el motor NEMA 23HS7628, un anillo de retención, un alojamiento de rodamiento, un rodamiento y el eje de base giratoria; b) La base giratoria, donde se colocan los actuadores lineales JS-TGS-U1 que proveerán los movimientos de Plantarflexión/Dorsiflexión y Supinación/Pronación y consta de: un cubo que se fija al eje de base giratoria, un poste y dos brazos los cuales se atornillan al cubo, dos soportes de actuador que se fijan a la parte inferior de cada brazo, dos actuadores lineales que se colocan en cada soporte, dos esferas sujetadas a los pistones de cada actuador lineal; c) El efector final, donde se coloca el tobillo del paciente y está constituido por: tres cuencas inferiores que se colocan tanto en las esferas como la parte superior del poste, un alojamiento sencillo que se fija a una cuenca inferior de uno de los dos actuadores, un alojamiento doble que se coloca en dos cuencas inferiores, de las cuales, una está en el poste y la otra en

el segundo actuador y una plataforma que se atornilla a los alojamientos (Figura 4)



Figura 4. a) Base fija, b) Base giratoria y c) Efector final.

Para el peso del pie se consideró a un ciudadano promedio, el cual pesa 74.8 kilogramos [9], y el peso del pie relativo al cuerpo, por la posición en la que se consideró al paciente [10] el pie y la pierna representan el 6.1% del peso corporal, aproximadamente 4.5628 kg. También es importante considerar la longitud del efector final del mecanismo, es decir, la plataforma móvil sobre la cual se apoyará el pie; de acuerdo a [11] se estableció que ésta sea de 30 cm.

Para definir los perfiles de movimiento y establecer una velocidad angular máxima, al igual que un perfil de aceleración, Syrseloudis [12] menciona haber empleado un sensor para medir la velocidad angular con varios pacientes sanos. La máxima velocidad registrada fue de 9.3 rad/s. Ya que en el proceso de rehabilitación se recomiendan movimientos lentos, se consideró una velocidad máxima de 0.93 rad/s.

2.2 Instrumentación del sistema.

Para el manejo de las señales y control de cada uno de los actuadores se utilizó la tarjeta con el integrado TB6560 para el actuador rotativo, la tarjeta controladora L298N para los actuadores lineales y una tarjeta Arduino UNO ver Figura 5.

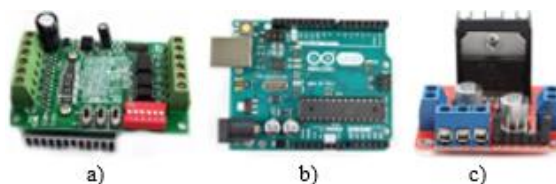


Figura 5. a) Tarjeta TB6560, b) Arduino UNO y c) Tarjeta L298N

2.3 Análisis cinemático.

El análisis de movimiento del mecanismo, se realizó a través de la síntesis de la cadena cinemática que producirá los movimientos en el plano frontal con un método gráfico. Ya que se emplearon actuadores lineales comerciales, fue necesario consultar las dimensiones de aquellos disponibles para tomarlas en cuenta en la síntesis como se muestra en la Figura 6. De la Figura 6, se obtiene el modelo matemático del movimiento de entrada, para que el efector final del prototipo tenga como resultado el movimiento de supinación/pronación, el cual, es realizado por el actuador lineal que se ubica en el plano frontal,



esto es considerando que se conocen físicamente las dimensiones de los elementos que constituyen el circuito vectorial de la cadena.

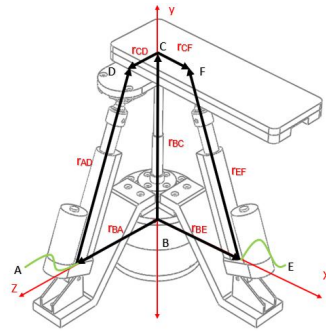


Figura 6. Cadena cinemática del mecanismo primer octante, vista isométrica y posición neutral.

En el análisis de circuito vectorial los eslabones r_{BA} , r_{BC} y r_{CD} están definidos (carrera y longitudes del actuador totalmente retraído y totalmente extendido), así como, los ángulos θ_{BA} y θ_{BC} , ya que son distancias y ángulos que se forman por puntos establecidos en el prototipo rehabilitador, considerando que el valor de θ_{CD} es variable se obtiene una ecuación de cierre para el eslabón de entrada r_{AD} que representa la longitud del actuador lineal.

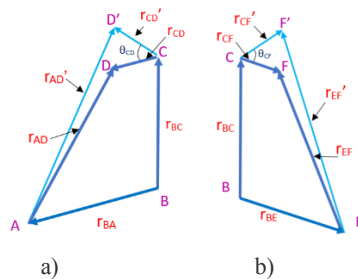


Figura 7. Esquema de cadena cinemática para a) plano frontal y b) plano sagital.

Considerando el esquema de la Figura 7, se realizó el método de lazo vectorial:

$$r_{BC} + r_{CD} = r_{BA} + r_{AD}$$

Aplicando Euler

$$r_{BC}e^{i\theta_{BC}} + r_{CD}e^{i\theta_{CD}} = r_{BA}e^{i\theta_{BA}} + r_{AD}e^{i\theta_{AD}}$$

Resolviendo se obtiene la siguiente ecuación.

$$r_{AD} = [r_{BA}^2 + r_{BC}^2 + r_{CD}^2 + 2r_{BC}[(\cos\theta_{CD})r_{BA} + (\sin\theta_{CD})r_{BC}]]^{1/2} \quad \text{Ec. 1}$$

De forma análoga se obtuvo la ecuación matemática para definir la longitud del eslabón de entrada en el plano sagital, r_{EF} , en función del parámetro de salida, θ_{CF} . Tomando como referencia el esquema de la Figura 7.

$$r_{EF} = [r_{BE}^2 + r_{BC}^2 + r_{CF}^2 + 2r_{CF}[(\cos\theta_{CF})r_{BE} + (\sin\theta_{CF})r_{BC}]]^{1/2} \quad \text{Ec. 2}$$

2.4 Perfil de movimiento.

En el diseño del movimiento de mecanismos, es necesario considerar el seguimiento de algún perfil de desplazamiento, velocidad y/o aceleración. Es esencial tener el conocimiento del comportamiento de algunas funciones matemáticas, ya que, pueden existir varias funciones que cumplan con el movimiento requerido, pero es posible que no cumplan con los requisitos de velocidad o aceleración. Las funciones polinomiales son muy versátiles, no se limitan a aplicaciones de simple o doble detenimiento y pueden ajustarse a muchas especificaciones. La forma general de una función polinomial es:

$$s = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4x^4 + c_5x^5 + \dots + c_nx^n \quad \text{Ec. 3}$$

Se realizó el análisis del seguimiento de trayectorias definido por la función del polinomio 4-5-6-7 [13], por sus exponentes, ya que este modelo genera una curva suave para el perfil de aceleración, de esta manera obtener movimientos lentos y controlados, para los tres actuadores que proveen de movimiento al prototipo rehabilitador, evitando cambios bruscos de aceleración que conlleven a una lesión del tobillo, se obtiene de la Ec. 3 al limitar la función de golpeteo a cero y considerando las condiciones de frontera, lo cual nos lleva al polinomio de séptimo grado mostrado en la Ec. 4. De [13] se tiene el modelo matemático para calcular la velocidad máxima y el polinomio 4-5-6-7.

$$w_{\max} = \frac{2.188h}{\beta} \quad \text{en donde:}$$

h es el desplazamiento máximo
 β es el periodo.

$$y = h \left[35 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 - 84 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 + 70 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^6 - 20 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^7 \right] \quad \text{Ec. 4}$$

El análisis para el desplazamiento de flexión-extensión se realizó de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{2.188(h)}{w_{\max}} \text{ seg.}; \quad w_{\max} = 0.93 \text{ rads/seg}$$

Para el movimiento de flexión se toma el desplazamiento máximo de 30° , se convierte en radianes y se calcula el periodo.

$$h = 30^\circ = \frac{30 \times \pi}{180} = 0.52360; \quad \beta = \frac{2.188(0.52360)}{0.93} = 1.2319 \text{ seg.}$$

Considerando que “y” es el desplazamiento con respecto al tiempo $y(t) = \theta_{FE}(t)$; $\theta = t$, se sustituyen estos términos y el periodo en el polinomio 4-5-6-7, teniendo como resultado el siguiente modelo matemático para cada intervalo de tiempo.

$$\theta_{FE}(t) = \begin{cases} 30 \left[35 \left(\frac{t}{1.2319} \right)^4 - 84 \left(\frac{t}{1.2319} \right)^5 + 70 \left(\frac{t}{1.2319} \right)^6 - 20 \left(\frac{t}{1.2319} \right)^7 \right]; & 0 \leq t \leq 1.2319 \\ 30 - 80 \left[35 \left(\frac{t-1.2319}{3.2051} \right)^4 - 84 \left(\frac{t-1.2319}{3.2051} \right)^5 + 70 \left(\frac{t-1.2319}{3.2051} \right)^6 - 20 \left(\frac{t-1.2319}{3.2051} \right)^7 \right]; & 1.2319 < t \leq 4.517 \\ (-50) + 50 \left[35 \left(\frac{t-4.517}{2.0531} \right)^4 - 84 \left(\frac{t-4.517}{2.0531} \right)^5 + 70 \left(\frac{t-4.517}{2.0531} \right)^6 - 20 \left(\frac{t-4.517}{2.0531} \right)^7 \right]; & 4.517 < t \leq 6.5701 \end{cases}$$

Ec. 5



Análogamente se definieron los siguientes polinomios 4-5-6-7 para los movimientos en los planos frontal y transversal, respectivamente:

$$\theta_{sp}(t) = \begin{cases} 52 \left[35 \left(\frac{t}{2.1352} \right)^4 - 84 \left(\frac{t}{2.1352} \right)^5 + 70 \left(\frac{t}{2.1352} \right)^6 - 20 \left(\frac{t}{2.1352} \right)^7 \right]; & 0 \leq t \leq 2.1352 \\ 52 - 104 \left[35 \left(\frac{t-2.1352}{4.2704} \right)^4 - 84 \left(\frac{t-2.1352}{4.2704} \right)^5 + 70 \left(\frac{t-2.1352}{4.2704} \right)^6 - 20 \left(\frac{t-2.1352}{4.2704} \right)^7 \right]; & 2.1352 < t \leq 6.4056 \\ (-52) + 52 \left[35 \left(\frac{t-6.4056}{2.1352} \right)^4 - 84 \left(\frac{t-6.4056}{2.1352} \right)^5 + 70 \left(\frac{t-6.4056}{2.1352} \right)^6 - 20 \left(\frac{t-6.4056}{2.1352} \right)^7 \right]; & 6.4056 < t \leq 8.5408 \end{cases}$$

Ec. 6

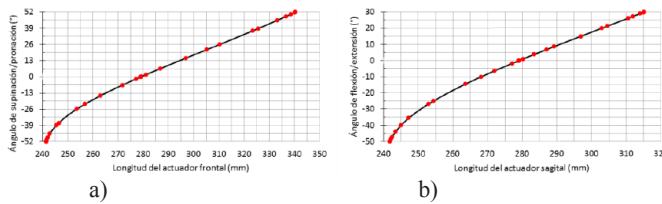
$$\theta_{aa}(t) = \begin{cases} 45 \left[35 \left(\frac{t}{1.8478} \right)^4 - 84 \left(\frac{t}{1.8478} \right)^5 + 70 \left(\frac{t}{1.8478} \right)^6 - 20 \left(\frac{t}{1.8478} \right)^7 \right]; & 0 \leq t \leq 1.8478 \\ 45 - 90 \left[35 \left(\frac{t-1.8478}{3.6956} \right)^4 - 84 \left(\frac{t-1.8478}{3.6956} \right)^5 + 70 \left(\frac{t-1.8478}{3.6956} \right)^6 - 20 \left(\frac{t-1.8478}{3.6956} \right)^7 \right]; & 1.8478 < t \leq 5.5434 \\ (-45) + 45 \left[35 \left(\frac{t-5.5434}{1.8478} \right)^4 - 84 \left(\frac{t-5.5434}{1.8478} \right)^5 + 70 \left(\frac{t-5.5434}{1.8478} \right)^6 - 20 \left(\frac{t-5.5434}{1.8478} \right)^7 \right]; & 5.5434 < t \leq 7.3912 \end{cases}$$

Ec. 7

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis del perfil de movimiento.

Una vez establecidos los perfiles de desplazamiento para los movimientos frontales y sagitales, se trazaron los diagramas que relacionan la longitud del actuador lineal y la posición angular del movimiento correspondiente, para ello se utilizó una ecuación (gráfica con puntos) y la simulación con SolidWorks Motion (línea continua). En la Figura 8 se muestra la comparación de la ecuación 1 y el resultado de la simulación de SolidWorks Motion del movimiento frontal. La comparación de la ecuación 2 y el resultado de la simulación del movimiento sagital.



a) Figura 8. a) Gráficas de la ecuación 1 y la simulación del movimiento frontal. b) Gráficas de la ecuación 2 y la simulación del movimiento sagital.

En la Figura 9 se muestran los diagramas de velocidad de los actuadores sagital y frontal. En estos se aprecia que alcanzan una rapidez máxima de 65 mm/s aproximadamente. Por lo que es deseable que los actuadores físicos alcancen una velocidad superior a los 65 mm/s.

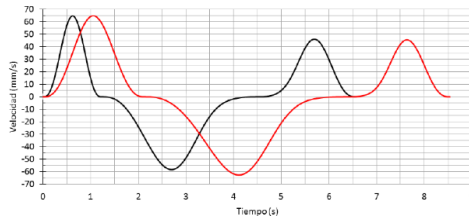


Figura 9. Velocidades lineales de los actuadores sagital (línea negra) y frontal (línea roja).

Para el actuador rotativo que proporciona el movimiento de abducción/aducción, definido por el perfil de la ecuación 7 se realizó un análisis similar al empleado para los actuadores lineales. Se introduce la ecuación en SolidWorks Motion para obtener $\alpha_{aa}(t)$ y se calcula, con el mismo complemento a I_{yy} . Luego se calcula T_{at} . En la Figura 10 se muestra el comportamiento del torque, donde se aprecia que el torque máximo es de 3.8 kg·cm aproximadamente, por lo que el motor debe ser capaz de proveer uno mayor.

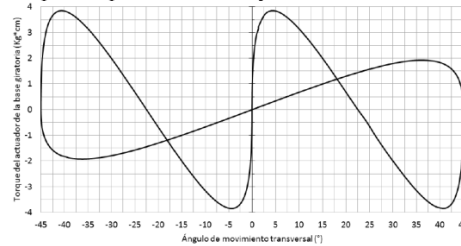


Figura 10. Torque del actuador rotativo.

3.2. Validación del prototipo virtual.

En la Figura 11 se aprecia que el mecanismo cumple con los rangos de movimiento requeridos y establecidos con el perfil de movimiento en las ecuaciones 5, 6 y 7; en la Figura 12 se observa que la velocidad angular máxima es de 0.93 rad/s, como se estableció; en la Figura 13 se muestran los perfiles de aceleración angular. Observe que estas curvas para los tres tipos de movimiento son suaves, tal como se definió desde el inicio.

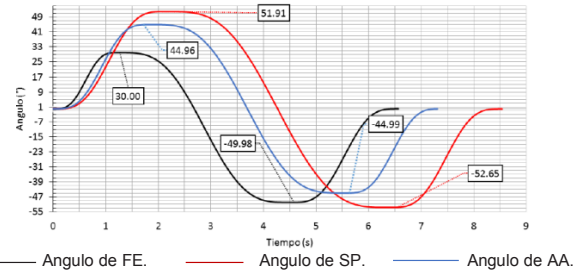


Figura 11. Diagramas de desplazamiento angular, perfiles de trayectorias para los movimientos de la plataforma del rehabilitador.

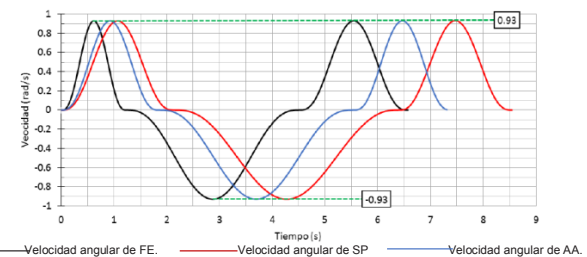


Figura 12. Diagramas de velocidad angular



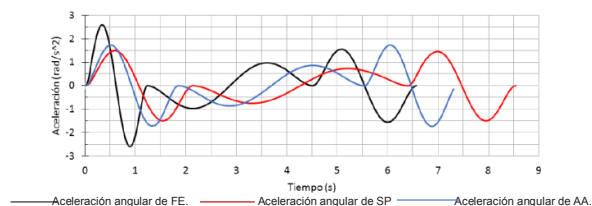


Figura 13. Diagramas de aceleración angular.

3.3. Pruebas al prototipo.

Se realizaron las pruebas de movimiento al prototipo sin carga para validar los rangos de movimiento (RDM) del rehabilitador. Los ángulos en los planos sagital y frontal se midieron con un software instalado en un dispositivo móvil (software *Angle meter* [14]). En las Figuras 14 y 15 se muestra el rehabilitador en las posiciones extremas, y sus mediciones, de los movimientos sagital y transversales, respectivamente.

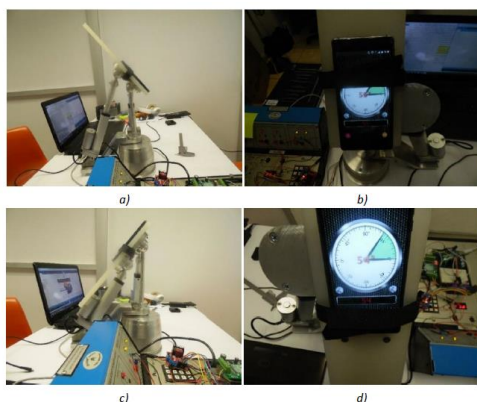


Figura 14. En a y b mecanismo en posición de flexión y la medición del ángulo máximo que alcanza. En c y d mecanismo en posición de extensión y la medición del ángulo máximo.

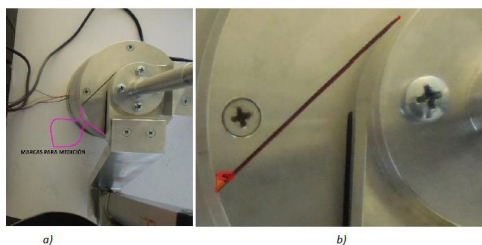


Figura 15. a) Marcas para realizar las mediciones de los ángulos y b) Medición del ángulo con avance de motor a 25 pasos.

En la Tabla 1 se comparan los resultados obtenidos de las pruebas con el prototipo físico contra los resultados esperados.

Los movimientos en el planos sagital y frontal muestran resultados de RDM mayores a los establecidos. Para el movimiento transversal no existe un límite mecánico para evitar que el ángulo pase de los 45° establecidos, el mecanismo puede girar hasta 360° en el plano transversal. Sin embargo, en el programa se estableció que el motor sólo avance 25 pasos [1], lo que equivale a 45°. Puede observarse que los rangos para los cuales se diseñó el mecanismo se cumplen.

Tabla 1 Resumen de los resultados de las pruebas sobre el prototipo físico para validar rangos de movimiento.

Movimiento	RDM establecido (°)	RDM obtenido (°)	Tolerancia* (%)
Flexión	30	55	83.33**
Extensión	50	54	8
Extensión del actuador frontal	52	54	3.85
Retracción del actuador frontal	52	52	0
Rotación en el plano transversal en dirección 1	45	44	-2.22
Rotación en el plano transversal en dirección 2	45	44	-2.22

* La tolerancia se toma respecto al RDM establecido. Un valor positivo (negativo) indica un RDM mayor (menor) al establecido.

** Esto se debe a, como se explicó en el párrafo previo a la tabla, las consideraciones del diseño.

Se realizaron pruebas con carga. Se contó con tres personas sanas, una de 48, una de 68 y una de 85 kg, además de una carga de prueba de 4.5 kg. Para las pruebas, se sujetó el pie al efector final mediante una cinta de velcro, Figura 16, y se le solicitó a la persona no ejercer fuerza en el pie. El movimiento se lleva a cabo sin dificultades. Se limitó el RDM durante la prueba para evitar daño al sujeto.



Figura 16. Pruebas con carga.

4. CONCLUSIONES

Se realizó el diseño de un mecanismo rehabilitador de tobillo de movimiento pasivo continuo que permite realizar los 3 tipos de movimientos básicos del pie, flexión/extensión, abducción/aducción, supinación/pronación, y algunos movimientos combinados.

Es común que los robots paralelos sean sobreactuados, esto aumenta su complejidad tanto desde el punto de vista cinemático y cinetostático, como también su costo. Según su aplicación, pueden ser redundantes. Es decir que, presentan más GDL de los necesarios. La configuración de este diseño presenta una ventaja importante: permite controlar 3 coordenadas generalizadas con tres actuadores. Para los movimientos sagitales y frontales, una de las cadenas cinemáticas debe ser pasiva, y se destaca la

adición de un actuador rotativo que permite desacoplar sus movimientos con respecto a los movimientos de los actuadores lineales. Tal configuración permitió obtener un robot paralelo que, a diferencia de otros rehabilitadores de tobillo capaces de realizar los 3 tipos de movimientos básicos del pie, no es redundante [15, 16, 17].

Otro punto importante del proyecto es el análisis cinemático del mecanismo para relacionar la longitud del actuador lineal con respecto a la posición angular del efector final en cada movimiento, así como, el diseño de los polinomios que definen los movimientos de salida. Aunque en el presente documento no se hace mención y no se implementa una ley de control, para cuestiones de diseño fue necesario aplicar estos polinomios y hacer simulaciones de movimiento del mecanismo para determinar y definir las trayectorias que recorre el prototipo. Se aprecia que el mecanismo está diseñado para cumplir con los rangos de movimiento establecidos, con la velocidad máxima definida y, un aspecto de suma importancia en la rehabilitación, no presentar cambios bruscos de aceleración. En las pruebas con el prototipo físico, se obtuvo que los rangos de movimiento del prototipo superan los rangos establecidos [1].

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Conacyt y del Tecnológico Nacional de México a través del proyecto 9213.20-P, para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] Miguel Ángel García Velarde, Prototipo Rehabilitador de Tobillo de Tres Grados de Libertad, Tesis de maestría, Departamento de ingeniería mecánica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Cuernavaca, Mor, Méx, 2019.
- [2] Wilberth Melchor Alcocer Rosado, Diseño y Construcción de una Máquina de Rehabilitación de Tobillo con Sistema de Control de Impedancia, Tesis de Doctorado, Departamento de ingeniería mecánica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Cuernavaca, Mor, 2016.
- [3] W. M. A. Rosado, A. B. Ortega, L. G. V. Valdés, J. R. Ascencio, C. D. G. Beltrán, «Active Rehabilitation Exercises With a Parallel Structure Ankle Rehabilitation Prototype,» *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 15, n° 5, pp. 786-794, 2017.
- [4] C Zöch, V Fialka-Moser, M Quittan, «Rehabilitation of ligamentous ankle injuries: a review of recent studies,» *Br J Sports Med*, vol. 37, n° 4, p. 291-295, 2003.
- [5] Wilberth Alcocer, Luis Vela, Andrés Blanco, José González, Marco Oliver, «Principales tendencias en el desarrollo de dispositivos de rehabilitación para tobillo,» *Dyna*, vol. 79, n° 176, pp. 45-55, 2012.
- [6] F A G Becerra, «Diseño y construcción de un mecanismo para la rehabilitación de tobillo basado en una mesa X-Y,» Tesis de maestría, Departamento de ingeniería mecatrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Cuernavaca, Mor, Méx, ene 2013
- [7] Muhammad Nazrin Shah, Shafriza nisha Basah, Khairunizam Wan, Shahrman Abu bakar, «Conceptual design for robot-aided ankle rehabilitation device,» *Jurnal Teknologi*, vol. 76, n° 12, pp. 45-52, 2015.
- [8] Camilo, José A. Santana, «Control numérico en una máquina de rehabilitación para tobillos,» Tesis de maestría, Departamento de ingeniería mecánica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Cuernavaca, Mor, Méx, 2018.
- [9] Animal Político (2012, feb 8). ¿Cuánto pesamos l@s mexican@s? Accedido dic 25, 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.animalpolitico.com/2012/02/cuanto-pesamos-ls-mexicans/>
- [10] R F Batista et al, «Modelo de sistema de control de prótesis de rodilla transfemoral para un ciclo de marcha,» *RIELAC*, vol. 33, no. 2, pp. 42-49, 2012.
- [11] Consulta Mitofsky (2010, feb 10). El tamaño del calzado de los mexicanos. Accedido dic 25, 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.consulta.mx/index.php/estudios-e-investigaciones/mexico-opina/item/610-eltamano-del-calzado-de-los-mexicanos>
- [12] C E Syrseloudis et al, «Design of a simple and modular 2-dof ankle physiotherapy device relying on a hybrid serial-parallel robotic architecture,» *Appl Bionics Biomech – Assistive Rehab Robotics*, vol. 8, no. 1, pp. 101-114, ene 2011
- [13] Diseño de Maquinaria, Robert L. Norton, Segunda edición, Ed. Mc Graw Hill.
- [14] *Angle meter*. Software libre en sistema *Android* de los dispositivos móviles.
- [15] Rutgers: Tele-Rehabilitation Institute (2011, oct 14). Rutgers Ankle. Accedido sep 25, 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.ti.rutgers.edu/RutgersAnkle.php>
- [16] M Zhang et al, «Adaptive patient-cooperative control of a compliant ankle rehabilitation robot (CARR) with enhanced training safety,» *IEEE Trans Ind lectronics*, vol. 65, no. 2, pp. 1398-1407, feb 2018
- [17] C Wang et al, «Design and kinematical performance analysis of a 3-RUS/RRR redundantly actuated parallel mechanism for ankle rehabilitation,» *J Mechanisms Robotics*, vol. 5, no. 4, pp. 041003-1-041003-11, nov 2013



Efecto del voltaje de electrodeposición sobre la vida a fatiga de aluminio recubierto con carbono

Isaac Gutiérrez Rojas*, Arturo Abúndez Pliego*, Yael González López*, Jan Mayén Chaires**, Germán Alfonso Rosas*, Miriam Siqueiros Hernández***, Benjamín González Vizcarra***.

*Tecnológico Nacional de México / CENIDET. Av. Palmira esq. Apatzingán s/n. Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos, México. C.P. 62490. E-mail: isaac.gutierrez19ma@cenidet.edu.mx

**CONACYT-CIATEQ, Unidad San Luis Potosí. Eje 126 No. 225, Zona Industrial. San Luis Potosí, S.L.P. C.P. 78395, México

*** Universidad Autónoma del Estado de Baja California/ FCITEC. Blvd. Universitario #1000. Unidad Valle de las Palmas. Tijuana, Baja. CP. 21500

Resumen: En este trabajo se presenta la evaluación del efecto que tiene el voltaje durante el proceso de electrodeposición sobre la vida útil de la aleación de aluminio 6061 T6. La aleación se recubrió con una película delgada de carbono utilizando ácido acético (CH_3COOH) con concentración de 0.24% v/v como electrolito. El voltaje suministrado para el proceso de electrodeposición se varió para cada muestra depositada entre 8 y 30 V. Las probetas recubiertas 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 estadístico de los resultados experimentales, se obtuvo un modelo empírico de regresión lineal múltiple, el cual permite estimar la vida útil a fatiga de la aleación de aluminio 6061-T6 en función del voltaje aplicado durante el proceso de electrodeposición. Los resultados muestran que se puede obtener un incremento en la vida útil de hasta 109.59% con un voltaje de 8 V respecto al material sin recubrimiento.

Palabras clave: Carbono, Electrodeposición, fatiga, recubrimientos, aluminio, voltaje, flexión rotativa.

1. INTRODUCCIÓN

Fatiga es un fenómeno de degradación de las propiedades mecánicas o debilitamiento del material, la cual provoca daños progresivos y localizados en el sustrato cuando se somete a cargas repetitivas. Generalmente, en fatiga de altos ciclos (HCF, por sus siglas en inglés) las fallas se originan en la superficie de los materiales por imperfecciones. Esto produce nucleación de grietas en materiales metálicos que comúnmente inician en la superficie de la pieza y se propagan al interior del material; como una consecuencia del crecimiento de las grietas, los materiales se fracturan.

Las aleaciones de aluminio son, sin duda, materiales esenciales con muchas aplicaciones en la industria, principalmente en dos campos: la aeroespacial y automotriz. Dichas aleaciones exhiben algunas propiedades superiores a aquellas del acero, como la densidad y la resistencia a la corrosión. Sin embargo, sus propiedades mecánicas como el comportamiento a la fatiga, la resistencia al desgaste, la dureza superficial y la capacidad de carga son a menudo inferiores. Para mejorar sus propiedades mecánicas y disminuir la diferencia con aquellas propiedades del acero de construcción tradicional, se aplica un recubrimiento duro [1]. En la industria, los

componentes mecánicos fallan frecuentemente por diversos motivos, tales como: cargas extremas, errores en el uso, propiedades superficiales insuficientes, entre otros. Por esta razón, se aplican recubrimientos duros en los sustratos para aumentar la vida a fatiga de esos componentes [2].

Existen diferentes técnicas para aplicar recubrimientos duros en un material base (ver Fig.1.1). Entre las técnicas más comunes utilizadas en las investigaciones, se puede encontrar: a) deposición física de vapor (PVD por sus siglas en inglés), b) deposición química de vapor (CVD por sus siglas en inglés) y c) procesamiento láser de haz de iones. Sin embargo, una técnica en particular, nombrada electrodeposición (ver Fig. 1.2), es simple, sostenible y de bajo costo para la aplicación de películas de carbono tipo diamante (DLC por sus siglas en inglés) [3], [4]. De acuerdo a la investigación de Mayén *et al.* [3] y Melgar *et al.* [5], ellos utilizaron ácido acético obtenido del jugo de caña de azúcar (CH_3COOH) como electrolito sostenible para realizar la electrodeposición. Además, se añadió un gramo de bicarbonato de sodio (NaHCO_3), para aumentar la conductividad y producir tasas de deposición más rápidas a bajo voltaje. De acuerdo con la ecuación (1.1), los grupos metilo se transportan al cátodo hasta que la superficie del aluminio está saturada con una alta



concentración de radicales CH_3^+ e iones 2H^+ como se muestra en la Fig. 1.2.

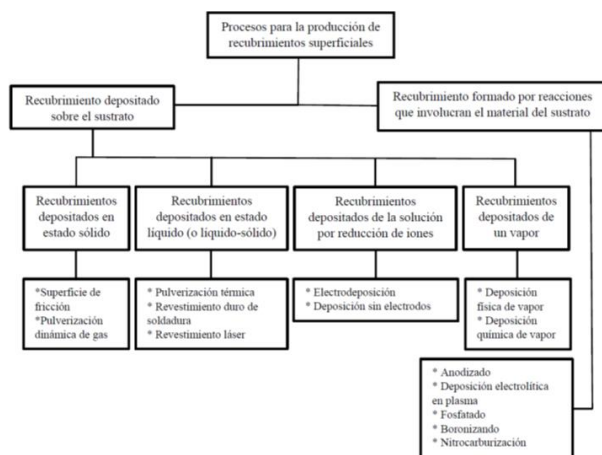
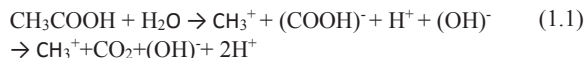


Fig. 1.1 Procesos para la producción de recubrimientos, modificado de [6].

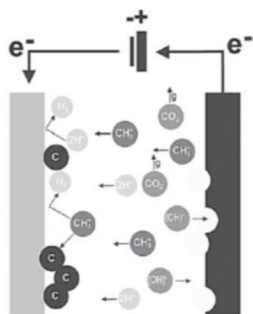


Fig. 1.2 Reacción electroquímica general durante la deposición de carbono [3].

En su trabajo de 1992, Namba [4] fue el primer investigador en aplicar recubrimiento DLC por la técnica de electrodeposición a sustratos de silicio. Con su investigación, despertó el interés de utilizar tal técnica. Posteriormente, Gupta *et al* [7] depositaron recubrimiento DLC por la técnica de electrodeposición sobre sustrato de vidrio, usando ácido fórmico y agua como electrolito. Como resultado obtuvieron que la película aplicada en el sustrato es compacta con una superficie bastante lisa.

La técnica de electrodeposición es un procedimiento en el cual sus parámetros pueden ser manipulados (el tiempo, el

voltaje y la corriente). Al manipular estas variables, el recubrimiento presenta cambios en el tamaño de grano y en el espesor de la película depositada [8]. Sin embargo, para obtener resultados positivos para que la película del recubrimiento DLC sea compacta y homogénea, se debe tener un control en los parámetros.

Gupta *et al* [8] depositaron sobre vidrio recubierto de SnO_2 mediante la técnica de electrodeposición utilizando ácido acético y agua desionizada como electrolito, en dos porcentajes diferentes de volumen de ácido mientras la temperatura del baño se mantuvo a 358 K. Como ánodo utilizaron una hoja de grafito (5 x 1.5 x 0.25 cm). Utilizaron una fuente de alimentación de corriente directa capaz de generar voltaje estabilizado (0-30 V; 1 A). El tiempo de deposición se mantuvo a 30 min. Obtuvieron una película entre 0.5 y 1 μm , concluyendo que efectivamente las películas de DLC se pueden obtener a un voltaje bajo en comparación con los reportados en la literatura. De esta manera, demostraron que se puede lograr una mejora con los recubrimientos y que el voltaje es un parámetro que influye en la calidad del recubrimiento.

En este trabajo se utilizó el proceso de electrodeposición por ser una técnica simple, sostenible y de bajo costo para aplicar un recubrimiento de base carbono, utilizando CH_3COOH (obtenido del jugo de caña de azúcar) como electrolito, sobre probetas de aluminio 6061-T6 como material base, las cuales se ensayaron en una máquina de flexión rotativa. A partir de un estudio paramétrico, se evaluó el efecto del voltaje de electrodeposición sobre la vida a fatiga del aluminio 6061-T6.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Diseño geométrico de las probetas

La geometría y dimensiones de las probetas están establecidas por la norma estándar ASTM E466 [9]. La norma establece que el tipo de muestra utilizada dependerá del objetivo del programa de prueba, el tipo de equipo, la capacidad del equipo y la forma en que el material está disponible. Se propone utilizar probetas con la geometría mostrada en la Fig.2.1. De acuerdo a esas relaciones de geometría, los valores de las dimensiones son: $d=0.25''$ (6.35 mm) en la sección de prueba, por lo tanto, el diámetro de sujeción será de $D=0.5''$ (12.7 mm), el radio de curvatura $R=2''$ (50.8 mm) y la longitud de la probeta $L=4''$ (101.6 mm). Las probetas se obtuvieron de barras de aluminio de 0.5'' (12.7 mm) de diámetro en un proceso de torneado.

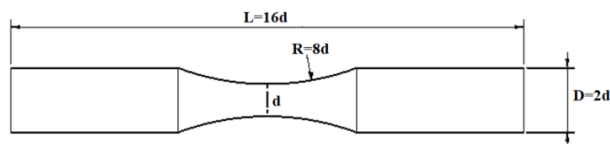


Fig. 2.1 Dimensiones de la probeta en función del diámetro (d) [9].



2.2 Tipo de carga

El tipo de carga para los ensayos de fatiga es de ciclos de esfuerzo totalmente invertidos ($R=1$) de amplitud constante, como se muestra en la Fig. 2.2 [10]. Los ensayos se desarrollaron con un esfuerzo estimado de 150 MPa.

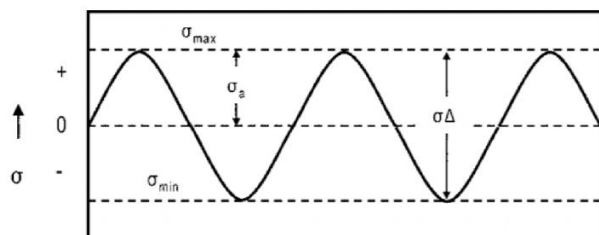


Fig. 2.2 Representación de amplitud de carga alternante [10].

2.3 Equipo de ensayos de fatiga

Se utilizó una máquina de flexión rotativa tipo Moore. Es una máquina que trabaja con un motor eléctrico rotativo, el cual está conectado al dispositivo de ensayos de flexión rotativa a través de una flecha. La probeta se coloca entre dos husillos, los cuales son impulsados por el motor y en los cuales se conecta un peso fijo colocado verticalmente en el área de ensayo (como se muestra en la Fig. 2.3). El peso que se aplica y el motor que hace rotar la probeta, provocan que la probeta 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 falla.

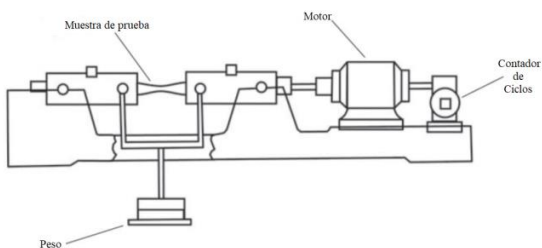


Fig. 2.3 Esquema de máquina de fatiga por flexión rotativa tipo de Moore [11].

La máquina de flexión rotativa fue diseñada y construida en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), la cual se observa en la Fig. 2.4. La estructura de la máquina es de aluminio estructural y cuenta con un contador de ciclos infrarrojo modelo TCRT5000 controlado con Arduino.

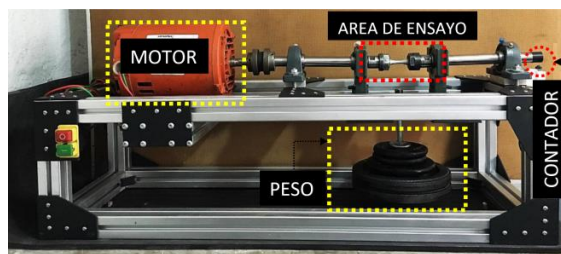


Fig. 2.4 Máquina de fatiga por flexión rotativa usada en los ensayos, modificado de [10].

En la Fig. 2.5 se muestra un esquema de la distribución de los elementos de apoyo y carga. La máquina 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. La distancia de la chumacera de apoyo y la chumacera tensora es de 0.125 m como se muestra en la Fig. 2.5. Un motor eléctrico es el encargado de hacer rotar la probeta. El esfuerzo generado en la probeta en la sección media es de 150 MPa y para generar este esfuerzo es necesario colocar un peso de 6.1 kg. Para el cálculo del esfuerzo se utiliza la siguiente expresión matemática:

$$\sigma_A = \frac{Q/2 \cdot 4d_{AB}}{\pi r^3} \quad (2.1)$$

Donde:

σ_A - esfuerzo generado en la probeta en la sección media, MPa.

Q - carga, N.

d_{AB} - distancia entre las chumaceras de apoyo y tensora, m.

r - radio de la sección media de la probeta, m.

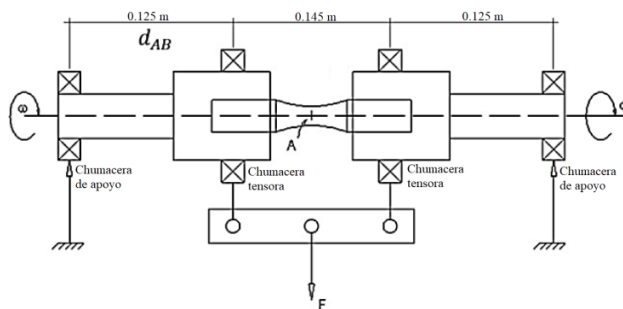


Fig. 2.5 Esquema de la máquina de flexión rotativa y distribución de los elementos.

2.4 Técnica de electrodeposición

En la técnica de electrodeposición, se consideran dos factores principales: el electrolito y las variables del proceso: tiempo, voltaje y corriente. La superficie de interés, tiene que ser eléctricamente conductora y se convierte en el cátodo (carga negativa). Por el otro lado, el recubrimiento (material a



depositar) se convierte en ánodo (carga positiva). En la Fig. 2.6 se muestra un diagrama esquemático de la técnica de electrodeposición. Se utilizó ácido acético (CH_3COOH) como electrolito y para la deposición, se utilizó una celda electrolítica (ver Fig. 2.7). El material base (sustrato), debe estar libre de cualquier contaminante. El electrolito es una sustancia que contiene en su composición iones libres y hace que se comporte como un conductor eléctrico [6], [12].

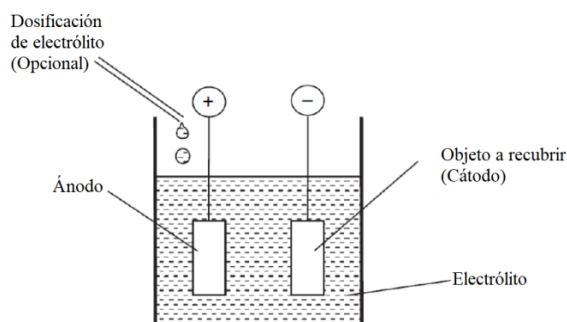


Fig. 2.6 Diagrama esquemático del proceso de electrodeposición, modificado de [6].

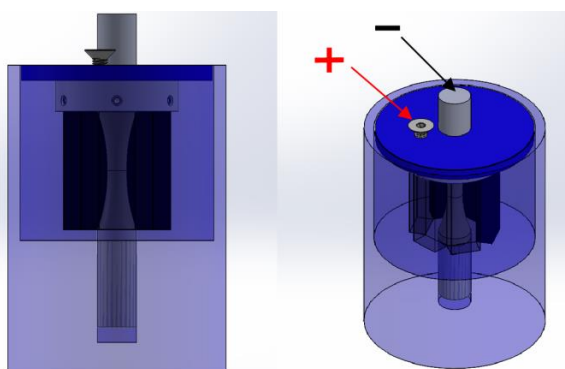


Fig. 2.7 Celda diseñada para aplicar técnica de electrodeposición.

3. PROCEDIMIENTO

Las probetas fueron obtenidas a partir de barras de aluminio 6061-T6 de $\frac{1}{2}$ " (12.7 mm). Se cortaron tramos de alrededor de 4.120" (104.648 mm) de longitud (Fig. 3.1). Posteriormente, se rectificaron los extremos de las piezas para ajustar su longitud a 4" (101.6 mm). Finalmente, las piezas se sometieron a un proceso de torneado en un torno CNC DYNAMACH para ajustar a la geometría indicada por la norma ASTM E466 [9] y descrita en la Fig. 2.1. En la Fig. 3.2 se muestra una fotografía de las probetas obtenidas para los ensayos de fatiga.



Fig. 3.1 Barras de aluminio 6061-T6 cortadas en tramos.



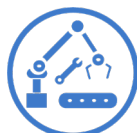
Fig. 3.2 Probetas de aluminio 6061-T6

La superficie de las probetas se acondicionó a través de un proceso de pulido progresivo comenzando con lijas de grano 1200, seguido de 2000 y 2500 hasta la lija de grano 3000. En seguida, las probetas se sumergen en una solución de agua destilada con agregado de bicarbonato de sodio para evitar la formación de óxido sobre la superficie del aluminio. La superficie de las probetas se cepilla cuidadosamente mientras se encuentran sumergidas en la solución y posteriormente se enjuagan con agua destilada. Las muestras se almacenan en un lugar seco y libre de polvo. De esta manera, las muestras están listas para el proceso del recubrimiento. Posteriormente, se midió la rugosidad a una muestra de 8 probetas, pulidas y limpias, con un rugosímetro portátil de la marca MITUTOYO SJ-210 con un rango de operación de $360 \mu\text{m}$ (-200 a $160 \mu\text{m}$) para caracterizar la superficie pulida. Las mediciones de rugosidad se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Rugosidad para las muestras de aluminio 6061-T6 sin recubrimiento

No. Muestra	$R_a (\mu\text{m})$	$R_q (\mu\text{m})$	$R_z (\mu\text{m})$
V1	0.170	0.213	0.885
V2	0.132	0.164	0.778
V3	0.176	0.223	1.066
V4	0.122	0.158	0.716
V5	0.158	0.198	0.911
V6	0.175	0.214	0.830
V7	0.104	0.136	0.683
V8	0.148	0.192	0.906

R_a - Media aritmética, R_q - Raíz cuadrada de la desviación media, R_z - Amplitud de rugosidad



Se midió la rugosidad con el objetivo de tener control de la rugosidad inicial de las probetas antes de la deposición del recubrimiento.

La norma ASTM E468-90 menciona las condiciones de rugosidad necesarias para realizar ensayos de fatiga de amplitud constante. La rugosidad permitida por la norma es de $1\text{ }\mu\text{m}$ (RMS) en promedio, en un rango de $0.8\text{--}1.2\text{ }\mu\text{m}$ [13]. Por lo tanto, los valores obtenidos en la tabla 3.1 son aceptables para realizar las pruebas de fatiga.

El proceso de deposición se hace en una celda electrolítica, colocando en la carga positiva (ánodo) las barras de grafitos y en la carga negativa (cátodo) la barra de aluminio como se muestra en la Fig. 2.7. Se utilizó 0.24% v/v de ácido acético (CH_3COOH) y agua destilada como electrolito. Para el suministro de corriente continua se utilizó una fuente de energía B&K PRECISION 1672. La electrodeposición se llevó a cabo a temperatura ambiente y el voltaje se varió entre 8 y 30V (ver Tabla 3.2) durante 1 hora. Por cada condición se hicieron 6 muestras (nombrada de la A-F).

Tabla 3.2 Recubrimiento en función del voltaje

Condición	Voltaje, V
V1-(A ... F)	8
V2-(A ... F)	10
V3-(A ... F)	15
V4-(A ... F)	20
V5-(A ... F)	25
V6-(A ... F)	30

Una vez recubiertas todas las muestras, posteriormente se ensayan las muestras en la máquina de flexión rotativa. Las pruebas de fatiga se sometieron a una carga de 59.84 N (6.1 kg), que genera un esfuerzo de 150 MPa sobre la probeta. Los ensayos se realizaron hasta la ruptura del material para obtener la vida útil de las muestras recubiertas (ver Fig. 3.3).



Fig. 3.3 Probetas ensayadas en función del voltaje

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 4.1 se muestra que el recubrimiento de carbono en el proceso de deposición de una hora, con voltaje entre 8 y 10 V de

alimentación y 0.24% v/v tiene un efecto positivo en la vida a fatiga en comparación del aluminio 6061-T6 sin recubrimiento. El nivel de esfuerzo para las pruebas de fatiga fue de 150 MPa . Las otras condiciones de voltaje de entrada en el proceso de deposición no tienen algún efecto sobre la resistencia a fatiga del material, esto se le atribuye a la rugosidad superficial obtenida en el proceso de deposición. Esto confirma que: utilizar un bajo potencial sobre los electrodos permite obtener una mejor superficie con recubrimientos homogéneo y liso. La Fig. 4.1 muestra que la condición con mejor desempeño ante la fatiga fue utilizando 8V de alimentación. La rugosidad media fue de $1.143\text{ }\mu\text{m}$.

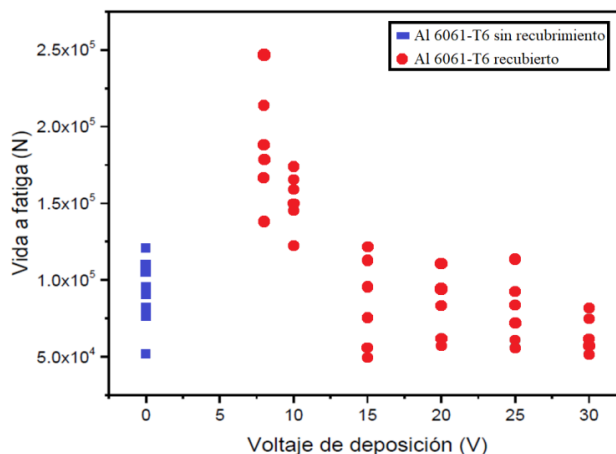


Fig. 4.1 Efecto del recubrimiento de carbono en función del voltaje entre 8 y 30V, una hora de deposición y 0.24% v/v respecto al sustrato Al 6061-T6 sin recubrir.

En la Fig. 4.2 se muestra una gráfica de rugosidad, en la cual es posible observar que la rugosidad aumenta en función del voltaje. Los recubrimientos presentan mayor rugosidad en comparación al material sin recubrimiento. Sin embargo, la vida a fatiga es mayor, posiblemente a causa de la restricción del movimiento del material y sellado de los defectos superficiales o cerca de la superficie.



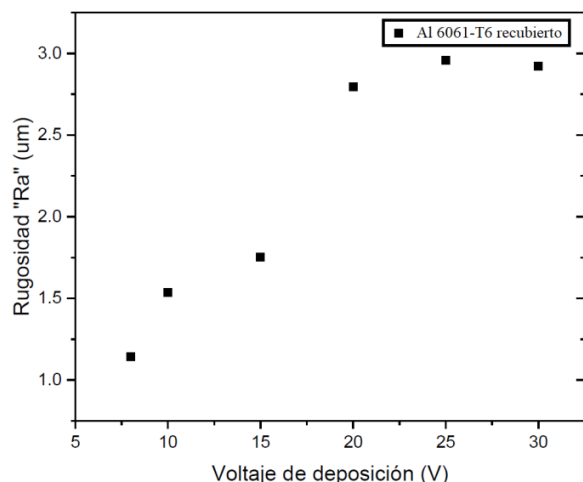


Fig. 4.2 Rugosidad del recubrimiento en función del voltaje en el proceso de deposición.

En la Tabla 4.1 se muestran los resultados que se obtuvieron en la máquina de flexión rotativa, obteniendo el número de ciclos para cada muestra a un voltaje de 8V, 10V, 15V, 20V, 25V y 30V, en un tiempo de una hora.

Tabla 4.1 Número de ciclos de cada muestra.

Voltaje, V	Muestras	Número de Ciclos (N)
8	V1-A	188228
	V1-B	178762
	V1-C	166759
	V1-D	247044
	V1-E	137806
	V1-F	213990
10	V2-A	149042
	V2-B	122302
	V2-C	173993
	V2-D	165258
	V2-E	145345
	V2-F	158955
15	V3-A	55723
	V3-B	75241
	V3-C	112866
	V3-D	95415
	V3-E	121774
	V3-F	49608
20	V4-A	110922
	V4-B	94313
	V4-C	57234
	V4-D	83245
	V4-E	62084
	V4-F	94938
	V5-A	56127

25	V5-B	114038
	V5-C	60781
	V5-D	92657
	V5-E	71879
	V5-F	83892
	V6-A	51729
30	V6-B	81649
	V6-C	58089
	V6-D	61738
	V6-E	56989
	V6-F	74908

Muchas de las aplicaciones experimentales requieren de un modelo estadístico para analizar los resultados. Un modelo empírico aporta información para poder predecir o comprender el comportamiento de una variable de respuesta Y . Para obtener este modelo, se usa el método de regresión lineal múltiple [14]. Este método estudia la relación entre la variable de interés interpretada por Y (variable dependiente) y de un conjunto de variables independientes denotadas por $X_1, X_2, \dots, X_k$. La función de regresión que relaciona la variable dependiente con las variables independientes es lineal, es decir:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (4.1)$$

Donde la variable Y es dependiente, X son las variables independientes que alimentan al modelo de regresión, la variable β son los coeficientes de regresión que indica el número de unidades que aumentará la variable dependiente y por último la variable ε es el término residual del modelo.

Los ensayos de fatiga muestran un comportamiento no lineal. El modelo se obtuvo a partir de un software estadístico de calidad nombrado NCSS Data Analysis, colocando los datos de la tabla anterior (Tabla 4.1). Se obtuvo el siguiente modelo:

$$C_1 = A + BV_2 + CV_2^2 \quad (4.2)$$

Donde A , B y C son coeficientes obtenidos del proceso estadístico del software NCSS. V_2 es el potencial eléctrico como variable en el proceso de deposición y N los números de ciclos. Sustituyendo los valores de los coeficientes queda de la siguiente manera:

$$N = (310685.06) + (-19434.50)V_2 + (384.20)V_2^2 \quad (4.3)$$

De esta manera, en la Fig. 4.3 se muestra la comparación de los datos experimentales contra el modelo empírico obtenido por la metodología de regresión lineal múltiple. Los valores para $V=0$ corresponden al material de referencia.



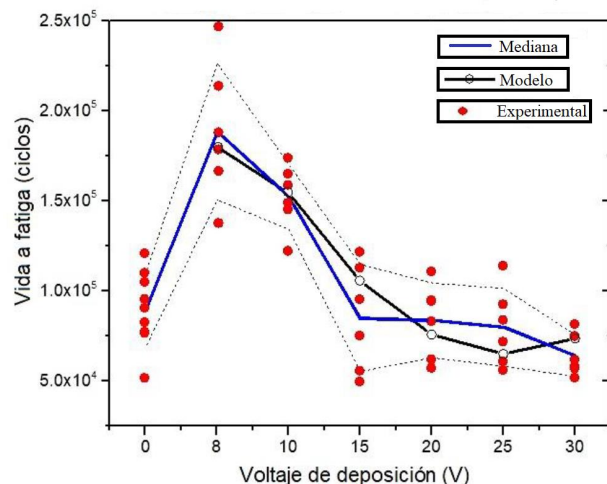


Fig. 4.3 Vida a fatiga del aluminio 6061-T6 recubierto con carbono vs modelo empírico, en función del voltaje para una hora de deposición.

En la Fig. 4.3 se puede observar que en el voltaje aplicado de 8V se obtuvieron números de ciclos mayores (en comparación con los otros voltajes aplicados), obteniendo un número máximo cerca de los 2.5×10^5 ciclos. Entre más aumenta el voltaje, el número de ciclos disminuye. El rango con mayor número de ciclos es entre 8 a 10 V. Los datos fueron positivos, demostrando una buena interacción y un ajuste de R^2 del 74.29% a los datos reales.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó la influencia del voltaje de electrodeposición de carbono sobre la vida útil a fatiga de la aleación de aluminio 6061-T6, en el rango entre 8 y 30 V. A través de un estudio paramétrico en el que se prepararon probetas de acuerdo a la norma ASTM E466, las cuales fueron pulidas para atender las indicaciones de la norma ASTM E468 en relación al perfil de rugosidad recomendado para pruebas de fatiga. Después del proceso de electrodeposición de carbono, la rugosidad que se obtuvo fue aún menor que aquella obtenida por el solo proceso de pulido. La rugosidad está estrechamente relacionada con el espesor, entre mayor sea el espesor, menor será la rugosidad y viceversa. Los resultados de los ensayos de fatiga demostraron que:

- El voltaje aplicado durante el proceso de deposición tiene un efecto significativo sobre la vida útil a fatiga.
- La mayor vida útil a fatiga se obtuvo de la serie V1, la cual exhibió un incremento de 109.59% respecto al material sin recubrimiento.
- Después de los 15V, series V3, V4, V5 y V6, los resultados mostraron que la vida útil disminuye, probablemente a causa de la disminución de amperaje, por lo que se requiere ampliar el estudio para involucrar

más variables como el espesor del recubrimiento, el tiempo y la corriente, así como tipo y concentración del electrolito.

- Se obtuvo un modelo matemático empírico a través de regresión lineal múltiple para estimar la vida útil a fatiga, el cual fue calibrado a partir de datos experimentales de vida a fatiga en función del voltaje de deposición, con el que se puede estimar de una manera aproximada la vida a fatiga del material. Por lo tanto, el modelo puede ser usado para propósitos de predicción, optimización o control.

Este trabajo recibió apoyo del CONACYT a través de la beca 997639 y del TecNM a través del proyecto 6375.18-P.

REFERENCIAS

- [1] S. Baragetti, L. Lusvarghi, G. Bolelli, y F. Tordini, "Fatigue behaviour of 2011-T6 aluminium alloy coated with PVD WC/C, PA-CVD DLC and PE-CVD SiOx coatings", *Surf. Coatings Technol.*, vol. 203, núm. 20–21, pp. 3078–3087, 2009, doi: 10.1016/j.surfcoat.2009.03.040.
- [2] H. Kovaci, A. F. Yetim, Baran, y A. Çelik, "Fatigue crack growth behavior of DLC coated AISI 4140 steel under constant and variable amplitude loading conditions", *Surf. Coatings Technol.*, vol. 304, pp. 316–324, 2016, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.045.
- [3] J. Mayén *et al.*, "Part 1: Design and development of new sustainable coatings applied on aluminium 6061 alloy-RRA heat treated for engineering applications", *Surf. Coatings Technol.*, vol. 328, pp. 488–498, 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.09.012.
- [4] Y. Namba, "Attempt to grow diamond phase carbon films from an organic solution", *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 10, núm. 5, pp. 3368–3370, 1992, doi: 10.1116/1.577829.
- [5] A. Gallegos-Melgar *et al.*, "Characterization of a C-based coating applied on an AA6063 alloy and developed by a novel electrochemical synthesis route", *Coatings*, vol. 10, núm. 2, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/coatings10020145.
- [6] P. H. Shipway, *The range of surface coating methods*. Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [7] S. Gupta, M. Pal Chowdhury, y A. K. Pal, "Synthesis of DLC films by electrodeposition technique using formic acid as electrolyte", *Diam. Relat. Mater.*, vol. 13, núm. 9, pp. 1680–1689, 2004, doi: 10.1016/j.diamond.2004.02.006.
- [8] S. Gupta, R. K. Roy, B. Deb, S. Kundu, y A. K. Pal, "Low voltage electrodeposition of diamond-like carbon films", *Mater. Lett.*, vol. 57, núm. 22–23, pp. 3479–3485, 2003, doi: 10.1016/S0167-577X(03)00102-2.



- [9] ASTM, “Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials Designation: E 466 – 96 (Reapproved 2002) e1 Standard”, *Astm Int.*, vol. 03, núm. Reapproved, pp. 4–8, 2002, doi: 10.1520/E0466-07.2.
- [10] ASM International, “Fatigue”, *Elem. Metall. Eng. Alloy.*, pp. 243–264, 2008.
- [11] M. Metallurgy *et al.*, “Elements of Metallurgy and Engineering Alloys”, en *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*, editor F.C. Campbell, Ed. Copyright © 2008 ASM International®, 2008, pp. 243–264.
- [12] J. Enrique, “Teoría de la electrodeposición de metales. Parámetros que controlan dicha deposición y control de calidad de los electrodepuestos metálicos obtenidos.”, vol. III, pp. 201–219, 1989.
- [13] ASTM, “Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for”, *Current*, vol. 90, núm. Reapproved, pp. 1–6, 2004, doi: 10.1520/E0468-90R04E01.2.
- [14] G. P. Humberto y D. la vara S. Roman, *Análisis y diseño de experimentos*, 2da Edición., vol. 46, núm. 5. México, D.F: McGRAW-HILL, 2016.



Propuesta de un procedimiento práctico para evaluar turbinas eólicas Savonius en zonas urbanas del Istmo de Tehuantepec

Domingo de Cruz Aquino Ortiz^a, Guilbaldo Tolentino Eslava^b, Miguel Toledo Velázquez^c

^a Instituto Tecnológico del Istmo, Depto. Metal-Mecánica, México (Tel: 971-169-8932; e-mail: dao73tec2015@gmail.com).

^{b, c} Instituto Politécnico Nacional, ESIME Zacatenco, México.

Resumen: El Istmo de Tehuantepec, México, tiene un alto potencial eólico, lo que se puede constatar con sus 28 parques eólicos instalados, sin embargo, el nulo apoyo de estas centrales eólicas para los pueblos circunvecinos, vuelve necesario buscar nuevas alternativas para aprovechar este potencial y que se traduzca en un ahorro para sus familias al producir su propia energía y al mismo tiempo, contribuir en la mitigación del cambio climático, de esta manera, resulta válido mirar hacia otras tecnologías, como las VAWT tipo Savonius y evaluarlas directamente en campo para resultados más realistas. Así, para evaluar la (Pm) de una Savonius de tres niveles y tres aspas en la Cd. de Juchitán, y al no existir una metodología específica para evaluar este tipo de turbinas, se propuso un procedimiento práctico a seguir para la medición en campo de parámetros como la velocidad del viento, la velocidad rotacional y el torque, usando un anemómetro, un tacómetro y la técnica de potencia al freno respectivamente, el resultado indica que el procedimiento es consistente en un entorno real, en tanto que fue posible recopilar suficiente información de tales parámetros en tiempo y forma.

Palabras clave: Istmo de Tehuantepec, Turbina eólica, VAWT, Savonius, metodología, procedimiento, anemómetro, tacómetro, potencia al freno.

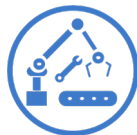
1. INTRODUCCIÓN

El uso excesivo en la quema de los combustibles fósiles, han contaminado por un lado, la calidad del aire que se respira en gran parte del mundo y por el otro lado, los gases de efecto invernadero que emiten, como el CO₂, están causando un daño severo al planeta entero al modificar su temperatura promedio, provocando lo que hoy se conoce como cambio climático (Henestroza Orozco, 2009), y de acuerdo a estudios recientes, de no tomar las medidas adecuadas a tiempo el daño será irreversible. Ante esta urgencia, muchos gobiernos del mundo han apostado como alternativas a las fuentes renovables, entre las que destacan por su grado de desarrollo e implementación la energía eólica, que ha alcanzado recientemente un crecimiento muy importante en muchos países, con instalaciones de parques eólicos que generan electricidad a gran escala a través de turbinas eólicas de eje horizontal HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) por sus siglas en inglés, que al cierre del 2018 superaron los 590 GW de capacidad instalada, donde China y EUA lideran el mercado mundial (Global Wind Energy Council [GWEC], 2018) y México aporta con 4 935 MW al cierre del mismo año (Asociación Mexicana de Energía Eólica [AMDE], 2018).

En México, la generación de electricidad mediante la energía eólica crece significativamente a partir del 2012 (Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030), lo que contribuye en la producción de energía limpia, pero la producción de electricidad a partir de esta y otras energías renovables en comparación con la demanda existente, es por mucho

insuficiente (Reza Ugalde, 2014), dejando así a la población en general sin acceso a la misma. Lo anterior se refleja en el Istmo de Tehuantepec, México, que en años recientes y debido a su excelente potencial eólico (Fig. 1) donde se alcanzan velocidades de viento promedio de hasta 8,5 m/s (Elliott et al., 2004), se encuentran instalados al año actual 2020, un total de 28 parques eólicos de gran potencia generando energía eléctrica (CONNECTAS, 2020); sin embargo, el destino de tal energía no es precisamente para sus poblaciones aledañas, sino para su comercialización a las grandes empresas nacionales y transnacionales, lo que deja en evidencia que su acceso a las mismas sea sumamente limitada, quienes al no obtener beneficio alguno asumen una actitud de rebeldía, lo que constituye una de las causas del descontento social en la región (Henestroza Orozco, 2009; Juárez y León, 2014).

El nulo acceso de la energía a la población istmeña, motiva entonces a pensar en otras formas de aprovechar a tan enorme potencial eólico disponible, particularmente para sus zonas urbanas, ambientes donde la velocidad del viento es muy baja y acompañada de una alta turbulencia, debido a los cambios repentinos en su dirección entre las edificaciones, lo que obliga a una turbina a adaptarse muy rápidamente al viento, orientándose y cambiando de posición constantemente respecto de la dirección del mismo (Moreno Figueredo, 2010). En este contexto, las turbinas eólicas de eje vertical VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) por sus siglas en inglés, como la Darrieus y la Savonius, sobresalen con excelentes resultados, siendo más eficientes, debido a que se adaptan mejor a las condiciones urbanas, al no requerir de sistema de orientación



(panémonas), operar a altos niveles de turbulencias del viento, ser livianos, económicos y fácil de mantener, y en el caso particular del tipo Savonius que posee otras ventajas adicionales sobre la Darrieus, al ser de fácil construcción y por tanto de bajo costo, operar a muy bajas velocidades de viento, tener alta confiabilidad, alto torque, bajo nivel de ruido y desgaste reducido (Gupta et al., 2012; Baldomero, 2012; Chan et al., 2018), la hace la más idónea para los entornos urbanos, con una mayor oportunidad de aprovechar así, tal potencial de forma individual.

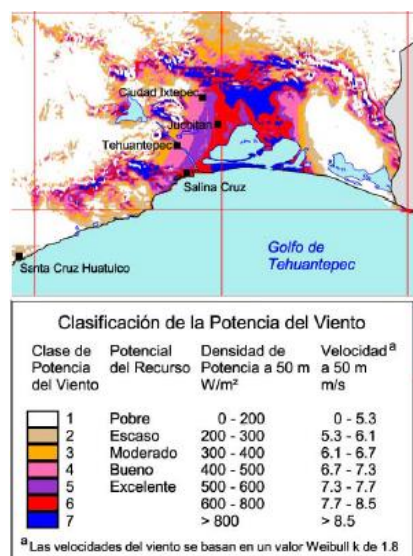


Fig. 1. Potencial eólico del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México (Elliott et al., 2004).

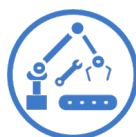
Tal aprovechamiento por tanto, se debe traducir en resultados palpables, apegados a la realidad, por lo que la evaluación debe ser llevada a cabo directamente en campo, y para ello se debe disponer, por un lado, de la turbina y por el otro, de una metodología propia para la evaluación en campo del tipo de turbina elegida, que garantice la confiabilidad de tales resultados. Así, para lo primero, se optó por una turbina eólica Savonius de tres aspas y tres niveles por su disponibilidad inmediata, mientras que para lo segundo, fue necesario revisar en investigaciones especializadas la metodología o procedimiento a seguir, con enfoque hacia la turbina Savonius y su método de evaluación en campo, cuya búsqueda se resume a continuación.

Existe infinidad de estudios relacionados con la turbina Savonius, donde se busca mejorar su desempeño aerodinámico o coeficiente de potencia (C_p), evaluando distintos parámetros de diseño y configuraciones, para esto se han recurrido a tres medios principales: las simulaciones a través de software especializados como CFD, ANSYS, etc., pruebas en túneles de viento y otros directamente en campo o in situ (Kumar Yadav, 2016); en este artículo se han descartado las simulaciones por obvias razones al no seguir el propósito del mismo. Así, se pueden ver investigaciones relacionadas, como la realizada por Tsutomu et al. (2005) quienes al mejorar las características de torque (T_r) de una turbina Savonius convencional,

incrementando a tres sus niveles y con dos aspas semicirculares por nivel, tuvieron que utilizar un túnel de viento para evaluar este parámetro en ambas turbinas, la cual se tuvo que adaptar a la salida del túnel, se emplearon instrumentos como un tubo de Pitot para medir la velocidad del viento (v), un tacómetro para medir la velocidad rotacional (rpm) de la turbina, un codificador rotatorio para el ángulo de giro de la misma, un detector de torque y una computadora personal para el registro de todas las mediciones; no se abordó a detalle el procedimiento utilizado puesto que no fue el objetivo del estudio, sin embargo, se puede intuir que fue útil puesto que al final del mismo se obtuvieron los resultados buscados.

En Saha et al. (2008), estudiaron sistemas de dos y tres aspas, en rotores Savonius de uno, dos, y tres niveles, usando aspas semicirculares y torcidas, las evidencias de los resultados fueron posibles al llevar a cabo la evaluación a través de un túnel de viento, donde la turbina a probar fue dispuesta a la salida del mismo, muy similar a lo realizado por Tsutomu et al. (2005); los instrumentos empleados para las mediciones fueron: un tacómetro digital para la velocidad rotacional (rpm), un anemómetro de velocidad térmica para la velocidad de viento (v) y un dinamómetro de freno para la medición del torque (T_r). Mahmoud et al. (2012), determinaron los coeficientes de potencias (C_p) de diferentes configuraciones del rotor Savonius, probando diversos parámetros en un túnel de viento, cuyo arreglo fue idéntico a los dos estudios anteriores, sin embargo, destacaron la técnica de potencia al freno empleada para la medición del torque en el eje (T_r), que consistió en aplicar fuerzas (cargas) progresivas al eje del rotor (medidas por una balanza de resorte) para reducir su velocidad rotacional (rpm), del producto del torque obtenido y las rpm medidas por un tacómetro digital, calcularon la potencia mecánica de salida (P_m), la que relacionaron con la potencia disponible (P_d), derivada de la velocidad del viento (v) medida por un anemómetro digital de hélice, para obtener así, los (C_p 's) buscados. En este mismo año, Candia Silva, (2012), propuso en su tesis de maestría, una metodología para evaluar turbinas eólicas de eje vertical en campo, sin embargo, se puede constatar en esencia, que la propuesta planteada fue básicamente una adaptación de la norma International Electrotechnical Commission (IEC 61400-12-1, 2005) para la medición de (C_p) de una VAWT tipo Giromill, un derivado de la Darrieus; en este trabajo, se propuso modificar principalmente el tiempo de muestreo de 10 minutos recomendado por la IEC, a 1 minuto, los resultados obtenidos fueron bastante similares en ambos casos.

En estudios más recientes, Reza Ugalde, (2014), midió el (C_p) de una VAWT Savonius helicoidal bajo diferentes niveles de turbulencias, expuesta a la salida de dos ventiladores centrífugos (otro arreglo similar a los anteriores) y en donde utilizó una variante de la técnica de potencia al freno para calcular la potencia de salida de la turbina (Fig. 2), que consistió en aplicar el freno mecánico al eje de la misma, obligándola a reducir su velocidad desde la inicial hasta 1,5 rps (revoluciones por segundo), en cada medición se tomaron lecturas de la fuerza aplicada mediante un dinamómetro analógico, la velocidad rotacional de la turbina en rps directamente del controlador de los ventiladores y la velocidad



del flujo de aire a través de un anemómetro de hilo caliente. En Korprasertsak y Leephakpreeda (2016), mejoraron la potencia mecánica de una turbina eólica Savonius, adaptada con un impulsor de viento, los resultados se obtuvieron por simulación en software CFD y se validaron a través de pruebas de campo en condiciones de viento real, donde la turbina se colocó en el techo de un edificio de 6 pisos, a una altura de 20 m respecto de la tierra, la velocidad del viento se midió con un anemómetro de copa digital a cada segundo y durante 20 minutos, la velocidad angular con un tacómetro digital, no especifica el método de medición del torque ni los detalles del procedimiento aplicado para las mediciones.

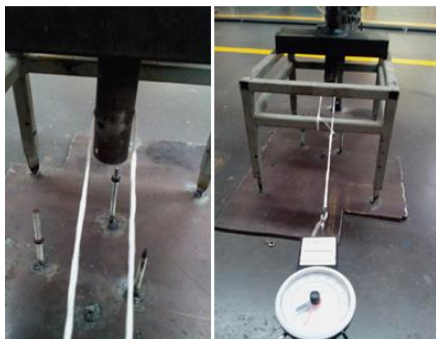


Fig. 2. Potencia al freno utilizado por Reza Ugalde (2014).

En otra investigación reciente in situ realizada en Tailandia, Chaisiriroj et al. (2017), propusieron una metodología para investigar los rendimientos óptimos de la Savonius, construyeron un modelo óptimo y lo instalaron en ubicaciones reales para medir su (C_p), monitorearon la velocidad del viento que fue medido por un anemómetro de hilo caliente, la velocidad angular (ω) por un codificador, y con la velocidad del viento variable sin cargas torsionales externas, determinaron la potencia generada (P_m) a partir de la tasa de cambio en la energía cinética. Compararon los resultados de la prueba de campo vs simulaciones del software CFD para validar la investigación, observaron, a parte de las características de diseño, que existen factores incontrolables de operación real que no se muestran en las simulaciones y que afectan el rendimiento de la turbina, como la presencia de partículas sólidas, la velocidad del viento inestable y el clima, concluyeron que la metodología propuesta puede ayudar para mejorar el diseño antes de su fabricación.

Finalmente, en la investigación de Duffett et al. (2009), se pudo encontrar un arreglo completo utilizado en la evaluación del (C_p) de una VAWT Savonius helicoidal, que aunque se realizó nuevamente en un túnel de viento, puede aproximarse mucho a una posible aplicación en campo, al constar de un anemómetro digital de hélice, un tacómetro digital, un sistema sólido de freno de fricción para la medición de la (P_m) de la turbina y un sistema de adquisición de datos a través de una PC; como se puede observar en la figura 3, los instrumentos son independientes y pueden adaptarse fácilmente en cualquier posición en la estructura de la turbina, lo que permite trasladar el sistema en cualquier otro punto de prueba, los detalles del procedimiento no fueron expuestos claramente, sin embargo, sirvió de base para el arreglo presentado en el presente artículo.

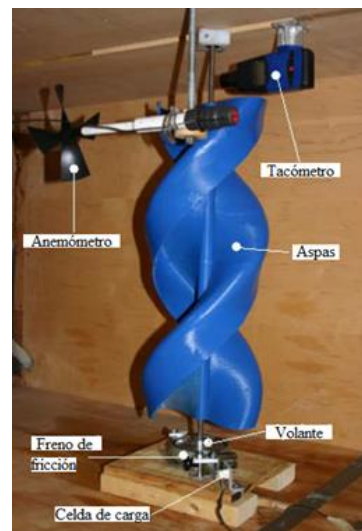


Fig. 3. Sistema completo de evaluación del (C_p) en túnel de viento (Duffett et al., 2009).

2. PROCEDIMIENTO PRÁCTICO PROPUESTO

Se puede constatar que en todos los casos revisados existe un común denominador, el uso de tres instrumentos de medición, suficientes para evaluar el (C_p) de la turbina, sin embargo, en ninguno se aborda con claridad los detalles del procedimiento aplicado, toda vez que no exponen procesos como la instalación de los instrumentos y la cantidad requerida, las posiciones donde deben situarse, el periodo de duración de la prueba, la frecuencia de muestreo a la que deben registrarse las mediciones, la altura a medir, no sugieren tampoco aspectos como la medición de la temperatura, la densidad del aire y la presión atmosférica del lugar, entre otros puntos. De esta manera, pareciera que cada investigador propone sus propios criterios en los procedimientos al evaluar la turbina, lo que permite concluir por tanto, que una metodología propia para las VAWT y específicamente para la Savonius y más aún en campo, no existe como tal, esto lo confirma Saha et al. (2008) al afirmar textualmente: “Hasta ahora, no existe un procedimiento teórico exacto para evaluar el rendimiento del rotor Savonius. La mejor manera de optimizar los distintos parámetros es realizar una serie de experimentos en los diferentes tipos de rotores en un túnel de viento de sección de prueba abierta de baja velocidad”.

2.1 Recursos empleados

Para la puesta en marcha del procedimiento propuesto, y dado que la evaluación fue realizada en campo en la zona urbana de la Cd. de Juchitán, fue necesario considerar aspectos importantes para el éxito de las pruebas, como los recursos materiales, humanos y económicos. En este sentido, adaptándose a lo último, y basándose de los estudios anteriores, se adquirieron los materiales e instrumentos de posible acceso: para la turbina se optó por una ya construida propiedad de la UNISTMO Campus Tehuantepec cuya configuración es de 3 niveles y 3 aspas, sin embargo, debido a



su gran tamaño y las dificultades que pudo presentar al momento de las maniobras en campo y encarecer los costos del proyecto, fue necesario replicarla para un modelo a escala 1:2 (ver Fig. 8), donde se comprobó que efectivamente son fáciles de fabricar y a un bajo costo, al usar incluso materiales de reciclado. En cuanto a los instrumentos y al no existir recomendaciones de marca/modelo y cantidad, se eligió un solo anemómetro digital tipo ventilador, marca BENETECH, modelo GM8902, más económico que el de tres copas, con capacidad para medir velocidades de viento desde 0,3 m/s hasta 45 m/s, con una precisión de $\pm 3\% \pm 0,1$, incluye además, un sensor de temperatura capaz de medir la temperatura del viento hasta los 45 °C con precisión de $\pm 1,0$ °C, se puede conectar a una PC a través de un programa como interface para el registro de las mediciones, su desventaja radica al ser operado manualmente, apuntando su ventilador siempre hacia la dirección correcta del viento, lo cual por un lado, produciría errores en las mediciones y por el otro, el sostenerlo por mucho tiempo resultaría muy difícil, máxime cuando las pruebas duraron varias horas, la solución fue adaptar al anemómetro una veleta para dirigir al ventilador a la dirección correcta del viento. Del mismo modo, se eligió un tacómetro digital para las (rpm) del rotor, con capacidad de enviar registros a la PC mediante un programa como interface, la marca y modelo elegida fue UNI-T y UT372 respectivamente, capaz de medir desde 10 a 99 999 rpm mediante un haz tipo laser, con una precisión de $0,04\% \pm 2$ dígitos, ambos instrumentos se aprecian en la figura 4. Aun siendo nuevos, ambos instrumentos fueron calibrados en el LABINTHAP de la ESIME Zacatenco, del Instituto Politécnico Nacional, lo que garantizó la fiabilidad y certeza en sus mediciones.



Fig. 4. Izquierda: Arreglo anemómetro digital-veleta.
Derecha: Tacómetro digital.

Para la técnica de medición del torque, el haber optado por el empleado en Duffett et al. (2009), encarecería el costo del proyecto al adquirir el mecanismo de freno de fricción, por lo que se prefirió por uno similar al utilizado en Reza Ugalde (2014), al usar un dinamómetro de resorte con capacidad de 25 kgf y una cuerda de seda para cortinas de tela, con la diferencia

que la fuerza queda concentrada en una sola línea de acción del conjunto dinamómetro-cuerda, a una distancia más corta entre la base y el eje del rotor para mayor rigidez del sistema (Fig. 5), contrario al dispuesto en Reza Ugalde (2014), donde la cuerda en el eje genera dos líneas de acción de la fuerza y al quedar expuesta bajo las condiciones de viento real, la probabilidad de vibraciones durante la prueba sería alta y generaría inestabilidad en la fuerza (carga) aplicada y por tanto errores en las (rpm) del rotor.

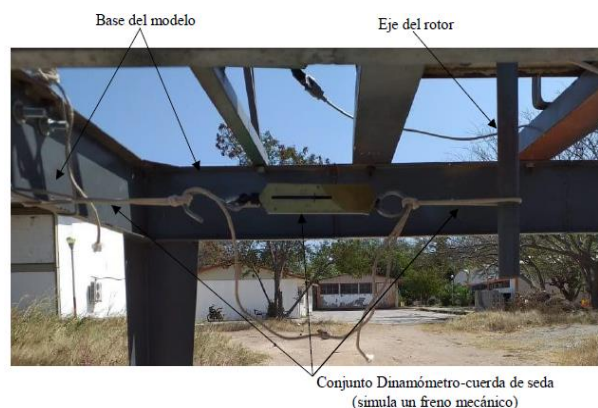


Fig. 5. Sistema de Potencia al freno, el dinamómetro queda tensado por la cuerda entre el eje y la base del rotor.

El recurso humano, sin duda fue clave en el desarrollo de las pruebas y el éxito de la implementación del procedimiento, para ello se formó un grupo selecto de estudiantes del Departamento de Metal-Mecánica del Instituto Tecnológico del Istmo, quienes fueron capacitados siguiendo dicho procedimiento, desde el monitoreo del viento, traslado y montaje del modelo, hasta operaciones de monitoreo y cuidado del sistema antes y durante la evaluación.

2.2 Procedimiento práctico

La prueba comienza, según el procedimiento con el monitoreo del viento, que puede ser directamente en sitio o a través de páginas web confiables como *windy.com*, y sugiere evaluar a una velocidad de viento promedio de 8 m/s, ya que a velocidades más bajas, la turbina tiende a frenarse por la fricción impuesta en el eje debido a la fuerza aplicada, de existir las condiciones, se traslada el modelo al punto elegido y según las condiciones físicas del punto, se decide evaluar a nivel de terreno o a cierta altura (en techo de viviendas comúnmente), de ser en alturas, las maniobras de ascenso-descenso son necesarias, en cualquier caso se debe acondicionar adecuadamente dicho punto. Montado el modelo, se nivela el rotor horizontal y verticalmente, evitando desalineaciones que pudieran provocar vibraciones excesivas y por tanto mediciones erróneas en los instrumentos, fijado firmemente el modelo se procede con la instalación de los instrumentos, como el conjunto veleta-anemómetro y el tacómetro que se conectan a la PC, y justo antes de arrancar la prueba, se monta el conjunto dinamómetro-cuerda.



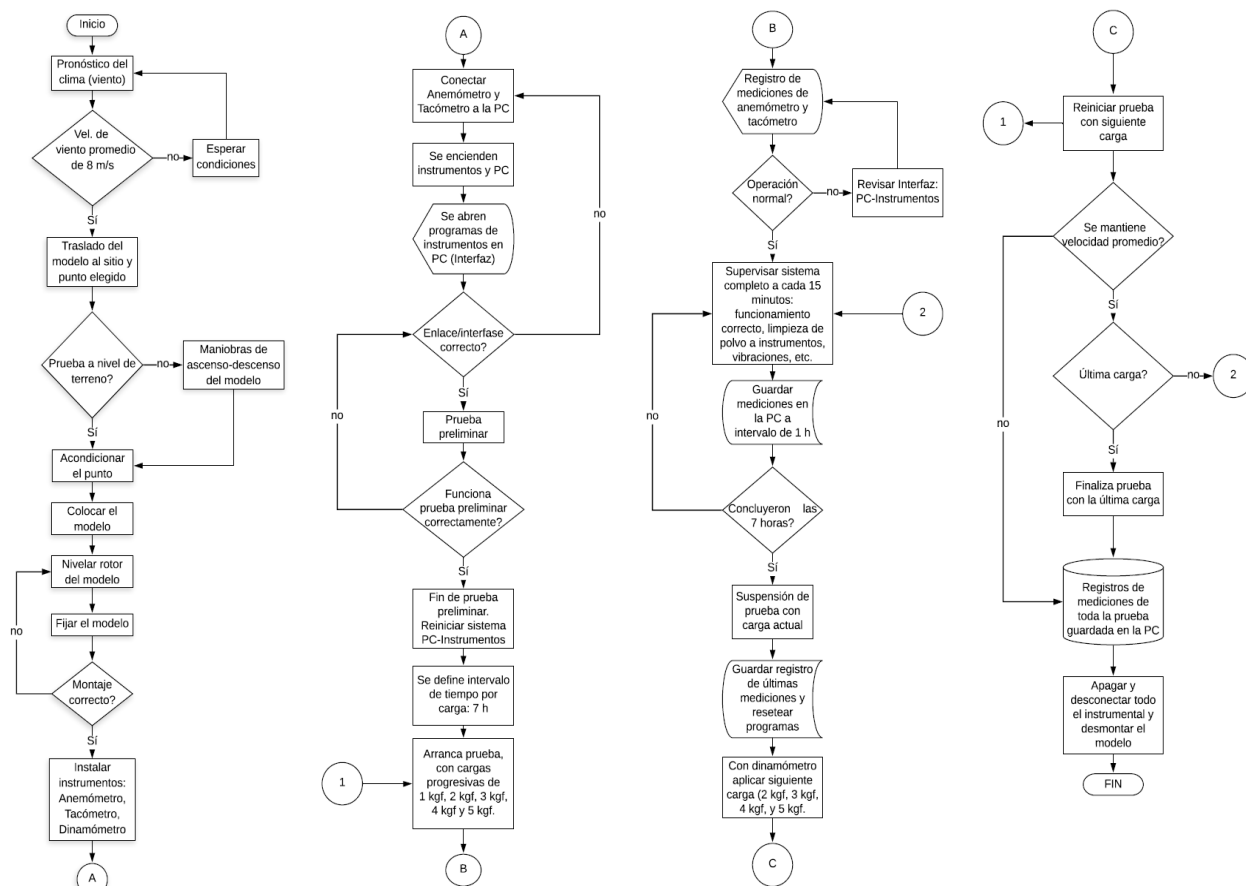


Fig. 6. Diagrama de bloque del procedimiento práctico.

Con la PC encendida, se abren los programas de ambos instrumentos (interfaces) y se lleva a cabo una prueba preliminar, donde se verifica que los instrumentos funcionen debidamente y que el modelo se mantenga correctamente nivelado, de presentarse anomalías se revisa todo el sistema de ser posible; termina la preliminar y se reinicia el sistema PC-Instrumentos. Según pronósticos (windy.com), se define el intervalo de tiempo de aplicación de cada carga (fuerza) al eje del modelo, que depende del periodo de permanencia de la velocidad del viento (días) en el punto de prueba, pero debido a lo aleatorio de este parámetro y al desgaste prematuro que sufría la cuerda de seda por rozamiento con el eje (observaciones en campo), se optó por intervalos de 7 horas, partiendo desde 1 kgf hasta las que permitieran obtener la (P_m) máxima, 5 cargas para este estudio particular (Fig. 6).

Instantes antes de iniciar la prueba, el dinamómetro se ajusta a 1 kgf y luego arranca formalmente, asegurando que ambos programas inicien al mismo tiempo, con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Durante la prueba, se verifica que todo el sistema funcione bien, las mediciones se deben reflejar en la pantalla (Fig. 7), caso contrario, se suspende momentáneamente y se revisa la interface; una vez reestablecida reinicia la prueba. Por seguridad se graban todas las mediciones registradas en intervalos de una hora, paralelamente se supervisa físicamente todo el sistema a cada 15 minutos, verificando que los instrumentos operen

correctamente y limpiándolos de polvos, ajustar el nivel del modelo de ser necesario, y detectar a tiempo cualquier otra anomalía. Concluida las 7 horas, se suspende la prueba actual, se graba la última información recopilada, y se ajusta la siguiente carga en el dinamómetro, continuando con la de 2 kgf, y posteriormente las cargas restantes (3 kgf, 4 kgf y 5 kgf en este caso). En cada cambio de carga, se repite el proceso como en la primera, para el éxito de la nueva; si la velocidad del viento promedio se mantiene, la prueba continúa, caso contrario se suspende por completo, puesto que el rotor se frena a velocidades de viento bajas debido a las cargas, y las (rpm) reflejadas en la PC son valores nulos, los cuales estadísticamente influyen en los valores promedios de la velocidad angular, por ésta razón y por seguridad se suspende la prueba y se resguarda el sistema completo, y esperar hasta una nueva oportunidad de buen viento. La prueba finaliza al alcanzar la potencia mecánica (P_m) máxima buscada, caso contrario se continúan aplicando más cargas hasta lograr dicha potencia, al finalizar, ya sea por suspensión o por culminación, se asegura que toda la información capturada en la PC esté debidamente guardada, se desmonta cuidadosamente el arreglo completo y se resguarda, procesos incluidos en el diagrama de bloque de la figura 6.

El arreglo completo para la evaluación en campo de la (P_m) de la Savonius, siguiendo el procedimiento práctico, se resume en la figura 8, donde se aprecia el número de



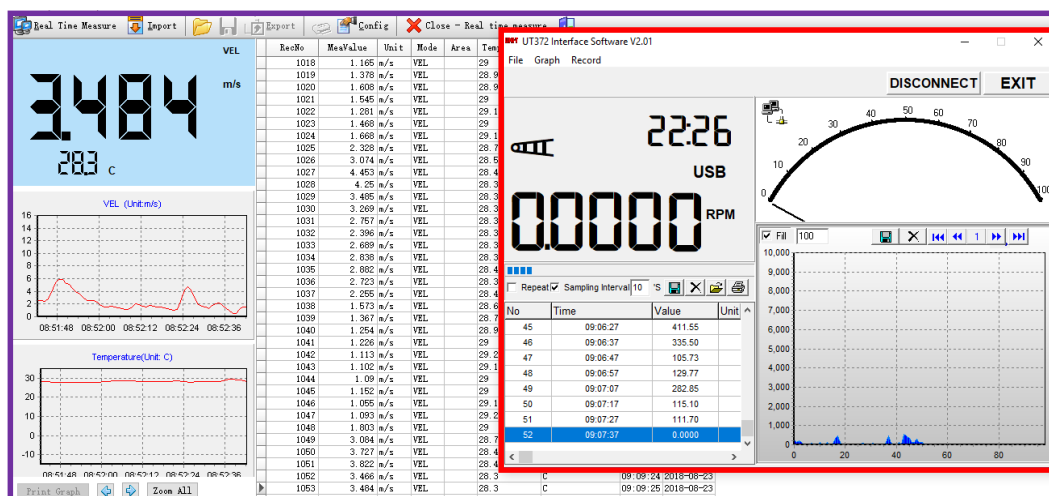


Fig. 7. Interface PC-Instrumentos. Ambas se aprecian en pantalla de la PC midiendo en tiempo real (Anemómetro cuadro en color púrpura y tacómetro en color rojo).

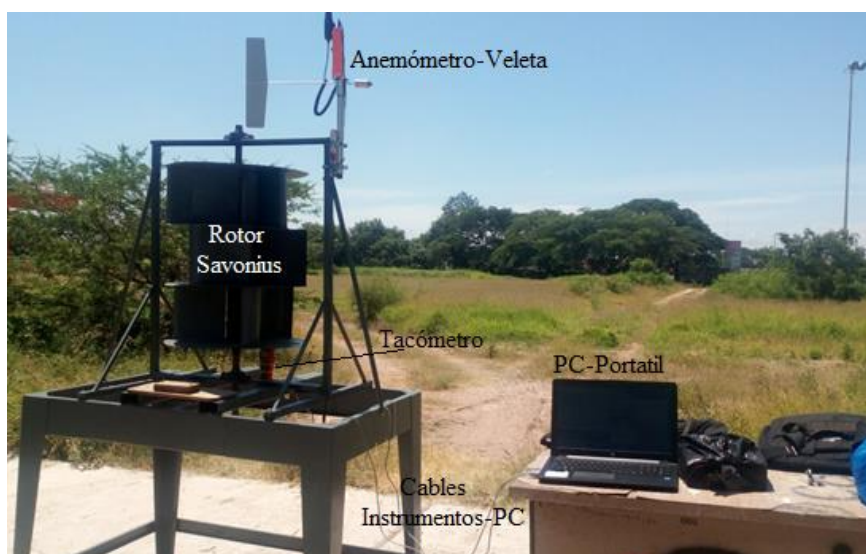


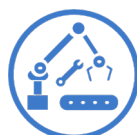
Fig. 8. Arreglo completo para evaluación en campo de la VAWT Savonius.

instrumentos y sus posiciones más adecuadas en la estructura, así como sus enlaces a la PC; para la densidad del aire del punto de prueba, fue necesario medir la temperatura a través del anemómetro y de registros de la presión barométrica de una estación meteorológica cercana; esta figura es tan solo una muestra, ya que en una vivienda no se logra apreciar totalmente el sistema por la distancia entre turbina y PC.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Con el procedimiento propuesto, se lograron recopilar en tiempo real, grandes cantidades de datos registrados en PC, tanto de la velocidad del viento (v), como de la velocidad rotacional de la turbina (rpm), para cada carga o fuerza (f)

aplicada al eje del rotor. Con las bases de datos conformadas, fue posible determinar el torque real del rotor mediante la expresión $T_r = (f \cdot \mu_k) \cdot r_{eje}$, donde μ_k es el coeficiente de fricción dinámica y r_{eje} el radio del eje del rotor, del producto de (T_r) y la velocidad angular (ω), fue posible determinar la potencia mecánica de salida (P_m) de la turbina para un instante dado. En la figura 9, se expone una de las bases de datos en Excel con sus respectivas gráficas, correspondiente a la carga de 1 kgf, donde aparecen los dos parámetros medidos y la (P_m) calculada, la base de datos para las cargas restantes es idéntico al presentado en esta figura; el tratamiento estadístico de toda la información contenida en las bases de datos, para determinar la potencia mecánica máxima (P_{mmax}) de la turbina, queda fuera del alcance de este artículo.



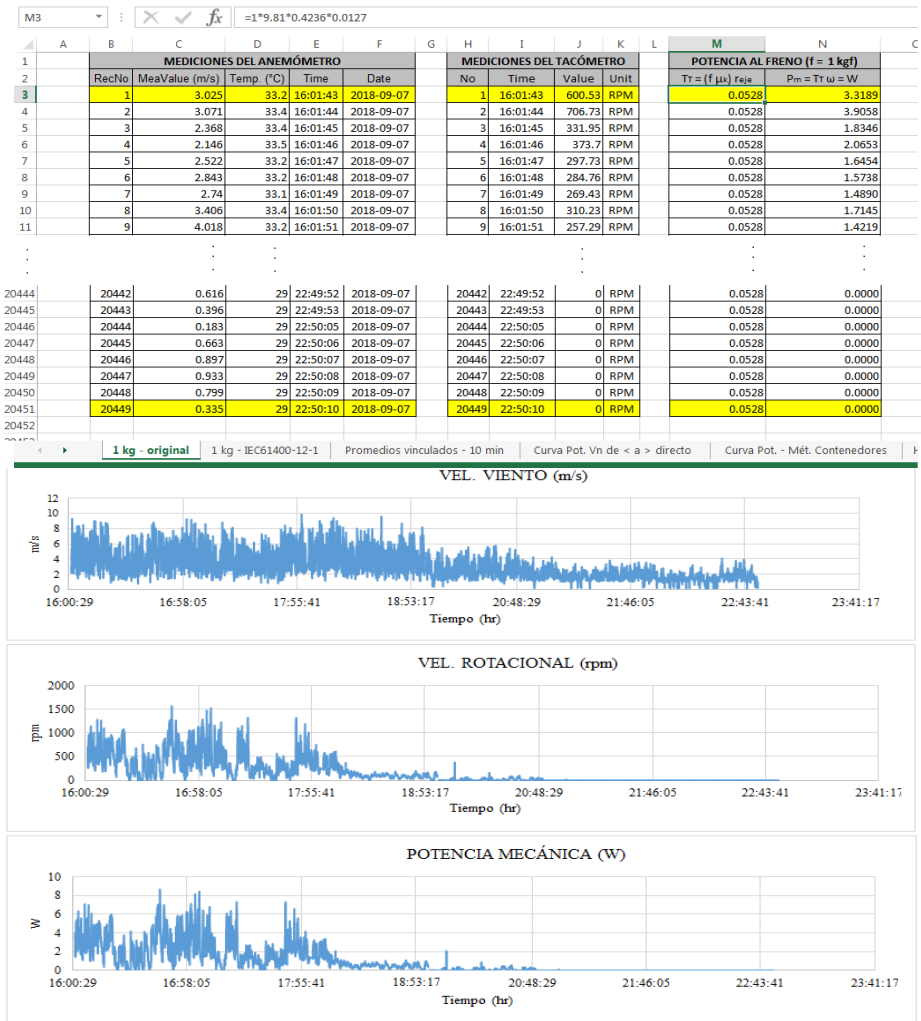


Fig. 9. Base de datos y sus gráficas para la carga de 1 kgf, obtenidos en campo mediante el procedimiento propuesto.

4. CONCLUSIONES

En los estudios revisados, tanto en túnel de viento como en campo, los detalles de los procedimientos utilizados no se abordaron plenamente, lo que imperó la necesidad de implementarlo durante el estudio de campo realizado en la Cd. de Juchitán. El hecho de contar con un procedimiento detallado que mostrara siempre el camino a seguir, en sí ya es un éxito, al llegar a facilitar todas las operaciones inherentes a las pruebas, generar confianza en la manipulación del sistema completo y garantizar la recopilación de la información deseada, esto es, se estandarizaron los procesos de medición en campo, de la velocidad de viento (v), de la rotacional (rpm) y de la potencia mecánica (P_m) para una Savonius en general. En plena operación, el sistema completo mostró gran resiliencia y consistencia, aún en condiciones medioambientales extremas, asegurando así, resultados confiables que se reflejaron en grandes cantidades de datos recopilados; sin duda que puede presentar deficiencias, pero en la medida que sean atendidas, este procedimiento puede alcanzar un mayor grado de madurez.

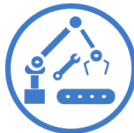
REFERENCIAS

Asociación Mexicana de Energía Eólica. (2018). El viento en números 2018.

Baldomero, M. P. (2012). Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4, 617-623.

Candia Silva, R. A. (2012). *Metodología para cálculo de curva de potencia de turbina eólica de eje vertical* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile].

Chaisiroj, P., Tinnachote, N., Usajantragul, S. y Leephakpreeda, T. (2017). Experimental Performance Investigation of Optimal Vertical Axis Wind Turbines under Actual Wind Conditions in Thailand. *Energy Procedia*. 138, 651-656.



- Chan, C. M., Bai, H. L. y He, D. Q. (2018). Blade shape optimization of the Savonius wind turbine using a genetic algorithm. *Applied Energy*, 213, 148-157.
- Duffett, I., Perry, J., Stockwood, B. y Wiseman, J. (2009). *Desing and evaluation of twisted Savonius wind turbine* [Final Report, USA].
- Elliott, D., Schwartz, M., Scott, G., Haymes, S., Heimiller, D. y George, R. (2004). *Atlas de Recursos Eólicos del Estado de Oaxaca*. Elaborado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL).
- Global Wind Energy Council. (2018). *Global Wind Report 2018. Market Status 2018*. Editorial GWEC.
- Gupta, R., Das, R., Gautam, R. y Deka, S. S. (2012). CFC Analysis of a two bucket Savonius rotor for various overlap conditions. *ISESCO Journal of science and technology*, 8 (13), 67-74.
- Henestroza Orozco, Ricardo. 2009. "Centrales eólicas en el Istmo de Tehuantepec; su impacto ambiental y socioeconómico". Revista Redalyc, Elementos: ciencia y cultura, vol. 16, núm. 74, Abril-Junio, pp. 39-44. BUAP.
- International Electrotechnical Commission. (2005). INTERNATIONAL STANDAR IEC-61400-12-1. Wind Turbines, Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines. Editorial IEC, GENEVA, SWITZERLAND.
- Juárez-Hernández, S. y León, G. (2014). Energía eólica en el istmo de Tehuantepec: desarrollo, actores y oposición social. *Problemas del Desarrollo, revista Latinoamericana de Economía*, 45(178), 139-162.
- Korprasertsak, N. y Leephakpreeda, T. (2016). Analysis and optimal design of wind boosters for Vertical Axis Wind Turbines at low wind speed. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 159, 9-18.
- Kumar Yadav, Y. (2016). *A Savonius wind turbine with electric generator: Model and Test* [Tesis de Maestría, Universidad de Clemson, USA].
- Mahmoud, N. H., El-Haroun, A. A., Wahba, E., Nasef, M. H. (2012). And experimental study on improvement of Savonius rotor performance. *Alexandria Engineering Journal*, 51, 19-25.
- Moreno Figueredo, C. (Julio- Septiembre 2010). Energía eólica en zonas urbanas. *Energía y tú. Consciencia energética, respeto ambiental*, (51).
- Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030, Secretaria de Energía (SENER).
- Reza Ugalde, A. (2014). Pruebas experimentales a una turbina eólica helicoidal a diferentes niveles de turbulencia [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, México].
- Saha, U.K., Thotla, S. y Maity, D. (2008). Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96, 1359-1375.
- Tsutomu, H., Yan, L., Yutaka, H. y Katsuya, Suzuki. (2005). Wind Tunnel test on a three stage out-phase Savonius rotor. *JSME International journal series B*.
- <https://www.connectas.org/especiales/energia-limpia-contratos-sucios/>



Evaluación del comportamiento tribológico de materiales compuestos de matriz polimérica.

Y. Rivera, A. López, J. Leyva, R. Aldana y A. Silva.

Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Xalapa, Veracruz, México

Octubre-2020

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del comportamiento tribológico de materiales compuestos de resina poliéster utilizando tres tipos de refuerzo: Fécula de maíz, carbonato de calcio (calcita) y silicato de magnesio hidratado (talco industrial), bajo condiciones diversas de elaboración. La evaluación tribológica se realizó mediante el uso de un tribómetro pin sobre disco acorde a la norma ASTM-G99. De los resultados obtenidos se determinó que los materiales con reforzamiento natural presentan un comportamiento mecánico competitivo a los materiales reforzados con elementos sintéticos; sin embargo, al considerar condiciones experimentales máximas en éstos, el desgaste se incrementa. El comportamiento tribológico fue dependiente de los parámetros de la prueba (velocidad y carga), en condiciones mínimas, el desgaste del silicato de magnesio hidratado fue de un 0.39% en contraste con el de la fécula de maíz que fue de 0.92% y del carbonato de calcio de un 0.46% y para condiciones máximas, el carbonato de calcio tuvo un 0.7% de desgaste en comparación con el 0.73% del silicato de magnesio y un 2.29% de la fécula de maíz.

Palabras clave: Resina Poliéster, desgaste, cargas, polímeros.

1. Introducción.

A lo largo de los últimos años la sustitución por estructuras poliméricas de materiales como madera, vidrio, papel, algodón, cerámica o metales es ya una realidad, debido a que resultan ser atractivos por su capacidad de resistencia a la corrosión y el desgaste. Este tipo de plásticos son resinas poliméricas combinadas con agentes reforzantes y cargas minerales, que han mostrado propiedades mecánicas similares a las de los materiales que sustituyen. Además, que casi cualquier resina termoplástica puede ser reforzada. (Gálvez, 2009).

Las resinas poliéster aumentan su dureza dada la síntesis química de las cadenas moleculares del poliéster. Dicho endurecimiento se da tras la acción de dos componentes: el acelerador y el catalizador, aunque en el mercado se le encuentra “preacelerada” y sólo añade el catalizador para conseguir mezclas homogéneas. Sin embargo, las resinas poliéster tienen una contracción entre el 3% y 7% en el proceso de endurecimiento. Es por ello, que se le suele mezclar con materiales de uso industrial o cargas minerales, para evitar agrietamientos causados por el proceso de elaboración y conseguir una mayor dureza del material (Masferrer, 2019).

Por otra parte, las cargas además de compensar la contracción consecuencia de la polimerización,

ayudan en la reducción de costos y en el mejoramiento de ciertas propiedades mecánicas, según sea el caso, refuerzos específicos darán paso a mejoras mecánicas determinadas. Por ejemplo, al crear un compuesto que tenga como virtud la dureza, se puede reducir su resistencia a la rotura o la tensión (Vázquez, 2020).

Con lo anterior, surge la necesidad y la oportunidad de efectuar un análisis tribológico en polímeros reforzados, debido a que esta área de estudio posee poca información en artículos, investigaciones o ensayos de laboratorio. Por ello, en este documento se presentan los resultados tribológicos de materiales poliméricos reforzados con resina poliéster preacelerada PP 70 X 60 y el uso de cargas como: silicato de magnesio hidratado, carbonato de calcio y fécula de maíz, resaltando que este último elemento no es un material de uso industrial, sino se maneja en el área culinaria. Por lo tanto, el contar con un reforzamiento de procedencia natural, permitirá determinar si su respuesta mecánica es mejor o al menos similar a las de los reforzamientos sintéticos.

2. Antecedentes.

Se define a la tribología como la rama del estudio de la interacción de dos superficies sólidas en contacto en movimiento relativo, lo que produce efectos como la fricción, la adhesión o la fatiga



superficial. El concepto principal de tribología aplicada a polímeros se centra en tres conceptos básicos relacionados con la fricción; uniones adhesivas, su tipo y resistencia; cizallamiento y ruptura de los materiales en contacto y el área real de contacto. El componente de deformación de la fricción resulta de la resistencia del polímero desgastado por las asperezas de la contracara más dura, las asperezas de la superficie del polímero experimentan deformaciones elásticas, plásticas y viscoelásticas que dependen de las propiedades del material. El componente de adherencia proviene de las uniones adhesivas formadas en los puntos de contacto real entre las superficies acopladas. Se cree que el componente de adherencia de la fricción para los polímeros excede mucho la deformación. Para disminuir las variaciones en las condiciones de ensayo, se deben proteger las muestras de los cambios de temperatura, aumentos de la cantidad de humedad en el ambiente o las incrustaciones de polvo, ya que producen ligeros cambios superficiales (Sinha, 2009).

La prueba tribológica “Pin on Disk” es un estudio basado en el comportamiento de dos distintas probetas que interactúan entre sí, utilizando un pin, generalmente de acero, y el material de prueba en forma de disco. De acuerdo con la norma ASTM G99 y sus derivados, a razón de una velocidad y esfuerzo constante (Abreu *et al.*, 2013). Se puede observar un esquema de la prueba en la figura 1.



Figura 1

Figura 1. Esquema conceptual de una prueba Pin on Disk

Fuente: (Martynenko *et al.*, 2015).

En esta prueba es posible estimar tres sistemas de proceso y sus interacciones.

- El Pin, el cual se asume como un cuerpo infinito o sumidero perfecto y que posee una dureza considerablemente mayor al del disco.
- La superficie de contacto entre el pin y el disco, o intercara del pin y el disco.
- El disco (Rudas *et al.*, 2013).

En la figura 2, se muestra el tribómetro pin sobre disco del laboratorio de tribología de la Facultad

de Ingeniería Mecánica, utilizado en la realización de los ensayos tribológicos. La prueba se basa en presionar un perno (pin) estacionario, con una carga específica, sobre un disco en movimiento, lo que ocasiona al paso del tiempo, en una remoción de materia en ambos cuerpos (tasa de desgaste), resultado de la acción del rozamiento entre ambas partes (Martynenko *et al.*, 2015).



Figura 2. Tribómetro pin sobre disco del laboratorio de tribología de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Veracruzana.

Fuente propia

Una vez concluida la prueba, los resultados se expresan en términos de pérdida de volumen (mm^3), lo cual se aprecia en el pin y el disco. Si se incorpora una celda de carga, se puede determinar la fuerza de rozamiento que existe entre los elementos de la prueba, que junto con la carga normal (aplicada sobre el pin) y la cantidad de volumen perdido es factible obtener el valor del coeficiente de rozamiento resultante, establecido éste como el cociente entre la fuerza de rozamiento y la fuerza normal. (Martynenko *et al.*, 2015).

3. Materiales y métodos.

Los materiales utilizados para la fabricación de los discos son: resina insaturada PP-70X60, peróxido de metil etil Cetona (catalizador K-2000), caucho, sustancia colorante y cargas tales como: fécula de maíz, carbonato de calcio CaCO_3 (Calcita) y Silicato de Magnesio Hidratado. La fécula de maíz que se manejó en la experimentación es de la marca Maizena®. Según la información tomada desde su portal de internet, este elemento es un almidón de maíz sin modificar, que muestra una estructura fina, es de color blanco, no contiene conservadores y es manejado principalmente como agente espesante y en la retención de humedad en diferentes productos (Maizena, 2019).



Los equipos que se utilizaron para preparar y efectuar los ensayos tribológicos fueron: tribómetro, pulidora de discos, vernier, el rugosímetro y báscula analítica para comparar la pérdida de masa al inicio y al final de la prueba. Para su fabricación se incorporaron los elementos para fabricar los discos, los cuales fueron previamente pesados en la balanza analítica, debido a que este proceso demanda una gran exactitud y precisión de cada uno de los materiales que se utilizaron en el compuesto. El compuesto se fabricó usando un 66% de matriz y el 34% de reforzamiento. Se realizaron un total de 24 discos y fueron nombrados según las iniciales del elemento usado FM (fécula de maíz), C (carbonato de calcio) y T (silicato de magnesio hidratado) y con la variación de catalizador y de pigmentación. Se presenta la nomenclatura en la tabla 1.

Tabla 1. Registro de los discos poliméricos.

NOMBRE DEL DISCO	CARGA USADA	PIGMENTO
FM-1	Fécula de maíz	S/P
FM-2	Fécula de maíz	S/P
FM-3	Fécula de maíz	S/P
FM-4	Fécula de maíz	S/P
FM-1C	Fécula de maíz	Verde
FM-2C	Fécula de maíz	Verde
FM-3C	Fécula de maíz	Verde
FM-4C	Fécula de maíz	Verde
C-1	Calcita	S/P
C-2	Calcita	S/P
C-3	Calcita	S/P
C-4	Calcita	S/P
C-1C	Calcita	Café
C-2C	Calcita	Café
C-3C	Calcita	Café
C-4C	Calcita	Café
T-1	Silicato de Magnesio	S/P
T-2	Silicato de Magnesio	S/P
T-3	Silicato de Magnesio	S/P
T-4	Silicato de Magnesio	S/P
T-1C	Silicato de Magnesio	Azul
T-2C	Silicato de Magnesio	Azul
T-3C	Silicato de Magnesio	Azul

Fuente propia.

En la tabla 2, se especifican los elementos y la cantidad utilizada de estos, para el diseño de los discos.

Tabla 2. Variación de elementos en elaboración de discos.

Elemento	Cantidad
Resina	10gr
Carga (Fécula de maíz, calcita y talco industrial)	5 gr
Catalizador	.35 ml / .45ml
Pigmentación	.05ml/ sin pigmentación
Vaciado	Centro/extremo

Fuente propia.

Lo anterior, permitió establecer parámetros de prueba mínimos y máximos, mediante los cuales

se pudieran percibir pérdidas de masa sin que se tuvieran daños en el disco o en el tribómetro. Además, al distinguir el comportamiento de las pérdidas en condiciones diferentes, se podrá interpolar o extrapolar resultados, lo que haría posible modelar una gráfica de pérdida de masa en función de la carga y la velocidad en un tiempo de 15 minutos como se muestra en la tabla 3. El total de discos fue agrupado en dos secciones, aquellos que se probaron con parámetros mínimos y con parámetros máximos.

Tabla 3 Parámetros máximos y mínimos para la prueba en el tribómetro.

	Mínimo	Máximo
Fuerza	40 N	50 N
Velocidad	400 rpm	550 rpm
Tiempo	15 minutos	15 minutos

Fuente propia.

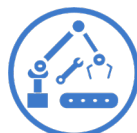
4. Resultados y discusión.

Dentro de las etapas de la prueba tribológica, el primer paso fue dar acabado a los discos con la pulidora, para asumir el acabado requerido antes de realizarle la prueba con el tribómetro, de acuerdo con los parámetros de la norma ya mencionada. La tabla 4 muestra los resultados de la rugosidad de los 24 discos elaborados en esta investigación, las columnas que toman la lectura de cuatro lados de los discos se promediaron para obtener una lectura general de cada disco.

Tabla 4. Rugosidad de los discos.

Nombre del disco	Lectura de rugosidad del lado 1 (µm).	Lectura de rugosidad del lado 2 (µm).	Lectura de rugosidad del lado 3 (µm).	Lectura de rugosidad del lado 4 (µm).	Promedio de rugosidad (µm).
FM-1	0.31	0.41	0.35	0.38	0.36
FM-2	0.38	0.43	0.41	0.36	0.39
FM-3	0.39	0.41	0.36	0.39	0.39
FM-4	0.38	0.43	0.41	0.37	0.4
FM-1C	0.38	0.41	0.40	0.36	0.39
FM-2C	0.31	0.38	0.37	0.38	0.36
FM-3C	0.32	0.37	0.34	0.40	0.36
FM-4C	0.35	0.43	0.41	0.37	0.39
C-1	0.34	0.38	0.41	0.40	0.38
C-2	0.35	0.40	0.40	0.39	0.39
C-3	0.31	0.41	0.32	0.40	0.36
C-4	0.34	0.40	0.37	0.38	0.37
C-1C	0.32	0.39	0.37	0.41	0.37
C-2C	0.36	0.40	0.40	0.38	0.39
C-3C	0.32	0.38	0.40	0.31	0.35
C-4C	0.32	0.38	0.41	0.37	0.37
T-1	0.35	0.39	0.37	0.39	0.38
T-2	0.37	0.43	0.37	0.40	0.39
T-3	0.35	0.39	0.42	0.38	0.39
T-4	0.36	0.41	0.39	0.40	0.39
T-1C	0.34	0.38	0.37	0.39	0.37
T-2C	0.35	0.39	0.40	0.36	0.38
T-3C	0.34	0.38	0.40	0.37	0.37
T-4C	0.32	0.39	0.38	0.34	0.36

Fuente propia



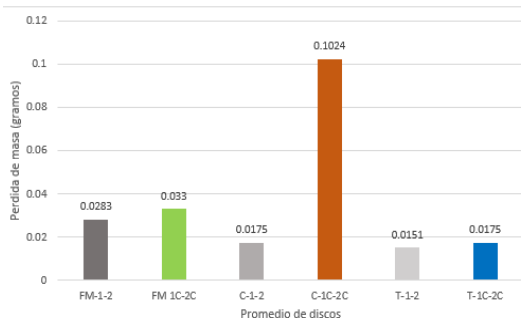
Posteriormente, se pesaron los discos en la balanza analítica y finalmente se realizaron los ensayos tribológicos. Después de realizados los ensayos, se volvió a registrar los pesos finales de los discos. De estos resultados se obtuvo la tabla 5 que muestra la pérdida de masa de cada disco después de la prueba a la cual fue sometida. Esto se obtuvo restando la masa inicial con la masa final. Para asumir una idea de cuánto equivale está pérdida de masa se decidió mostrar el porcentaje de esa pérdida en función de la masa inicial.

Tabla 5. Pérdida de masa de los discos y el porcentaje que representa dicha pérdida.

Nombre del disco	Pérdida de masa (gramos)	%
FM-1	0.0345	1.07
FM-2	0.0221	0.77
FM-3	0.1106	2.76
FM-4	0.0787	2.46
FM-1C	0.0362	1.11
FM-2C	0.0299	0.85
FM-3C	0.0372	1.16
FM-4C	0.1108	3.42
C-1	0.0163	0.43
C-2	0.0187	0.50
C-3	0.0734	1.81
C-4	0.0441	1.01
C-1C	0.0777	1.66
C-2C	0.1272	2.64
C-3C	0.0395	0.78
C-4C	0.0297	0.62
T-1	0.0154	0.43
T-2	0.0148	0.35
T-3	0.0240	0.56
T-4	0.0465	1.20
T-1C	0.0189	0.46
T-2C	0.0162	0.34
T-3C	0.0329	0.75
T-4C	0.0273	0.72

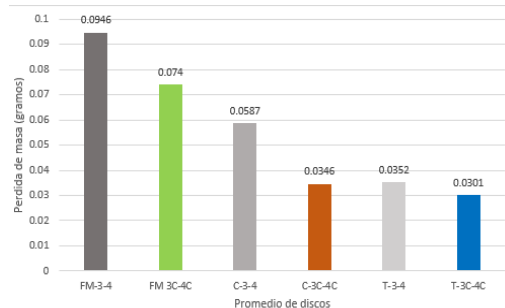
Fuente propia.

Las gráficas 1 y 2 hacen una comparación de la masa perdida de cada grupo de material separadas por las pruebas con parámetros mínimos y máximos.



Gráfica 1. Pérdida de masa de los discos con parámetros mínimos.

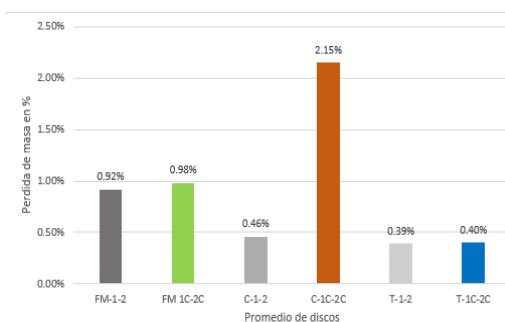
Fuente: Propia



Gráfica 2. Pérdida de masa de los discos con parámetros máximos.

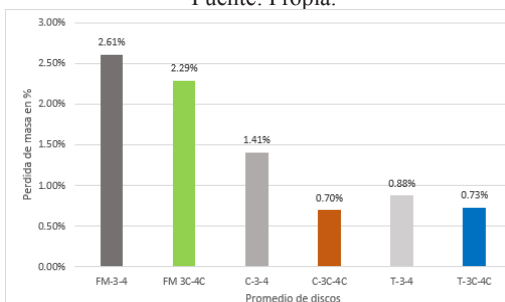
Fuente: Propia

Mientras que las gráficas 3 y 4 hacen la comparación de la masa porcentual perdida con los parámetros máximos y mínimos.



Gráfica 3. Pérdida de masa porcentual de los discos con parámetros mínimos.

Fuente: Propia.



Gráfica 4. Pérdida de masa porcentual de los discos con parámetros máximos.

Fuente: Propia.

De las gráficas 1 y 3, donde se tienen pérdidas de masa y masa porcentual con los parámetros mínimos, se observa que la pérdida de masa es más pequeña con los discos no pigmentados, suponiendo que el pigmento haga perder de forma relativamente pequeña las propiedades mecánicas de los discos. Sin embargo, en la tabla 2 y 4, donde se muestra la pérdida de masa y masa porcentual con los parámetros máximos, ocurre el fenómeno de forma invertida, pues ahora los discos no pigmentados perdieron más masa que



los pigmentados. Posiblemente el pigmento no afecte de forma inmediata las propiedades mecánicas a inicios de la prueba, pero conforme la prueba avanza en cuanto a parámetros, le confiere mayor resistencia al barrido de el pin, lo que podría explicar este fenómeno que ocurre en los dos parámetros de la prueba. Pese al fenómeno mencionado anteriormente, las gráficas 1, 2, 3 y 4 coinciden en que los discos con carga de silicato de magnesio tienden a perder menos material que los de fécula de maíz y carbonato de calcio. Para pruebas tribológicas usando cargas similares a las usadas en este trabajo, se recomienda no hacer pruebas que excedan con parámetros de 600 rpm y 60 N, ya que puede ocasionar la fractura o destrucción de los discos. De querer realizar una prueba con valores excedentes a los ya mencionados, se recomienda solo exceder uno de estos parámetros. En caso de que se quieran trabajar con valores demasiado altos, se optaría por disminuir el tiempo de prueba a 10 min o 5 min dependiendo de que tanto se aumentaron los parámetros.

5. Conclusión.

En las pruebas experimentales del material compuesto polimérico se indica que las cargas de fécula de maíz, carbonato de calcio y silicato de magnesio hidratado que poseían los discos, se presentaron una constante en la resistencia al desgaste, siendo los discos con carga de silicato de magnesio los más resistentes.

La información resultante también nos indicó que la pigmentación en los discos aumenta levemente la resistencia al desgaste. Pese a que este aumento de la resistencia no sea notable en los discos cuando la prueba tiene los parámetros mínimos de velocidad y carga, se puede apreciar esta característica de resistencia al trabajar con los parámetros máximos de velocidad y desgaste. Esto pudiera deberse a que el compuesto del pigmento refuerce el aditivo antidesgaste o contenga un poder lubricante. Se mostró un incremento en la resistencia al desgaste en la prueba con parámetros de velocidad y carga mínimos en los discos con carga de carbonato de calcio que están pigmentados. Tal vez este incremento a la resistencia al desgaste se origine, por el método de fabricación de los discos con carga de carbonato de calcio que se encuentran pigmentados. Sin embargo, este aumento no se hace presente en la prueba con parámetros máximos. Si bien, se pudo realizar las pruebas solo variando la velocidad a la que se sometían los

discos y dejando como una constante la carga aplicada, el desgaste con estos discos sometidos a una variación de 10 N entre la prueba con parámetros mínimos y máximos, arrojó resultados de desgaste en forma exponencial.

Referencias

- Abreu, C., De los Santos, J., Soto, J., De Los Santos, H., & García, E. (2013). "Diseño Configurado de una Máquina Pin-on-Disk." Eleventh LACCEI, 1. Recuperado el 05 de octubre, 2020 <http://www.laccei.org/LACCEI2013-Cancun/RefereedPapers/RP099.pdf>
- Masferrer, V. (2019). "Materiales: resina". Catalunya, España. Universidad Oberta de Catalunya. Recuperado 08 de octubre 2020. <http://art-toolkit.recursos.uoc.edu/es/materiales-resina/#:~:text=La%20resina%20de%20poliéster%20tiene,pigmentos%20concentrados%2C%20especial%20para%20poliéster.>
- Gálvez, J. V. (2009). "Sustitución de piezas metálicas por piezas plásticas." México. Recuperado el 05 de Octubre de 2020, de <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/422/1/Virginia%20Abygail%20Galvez%20Jvarez.pdf>
- Martynenko, V., Lebedev, L., Pazos, L., Abate, G., & Martínez, D. (2015). "Diseño y construcción de una maquina Pin-on-Disk para la determinación de coeficiente de fricción y ejemplo de aplicación." Argentina: Universidad Nacional de Lomas de Zamora Recuperado el 28 de febrero de 2020 https://www.researchgate.net/publication/280085064_Diseño_y_construcción_de_una_maquina_pinon_disk_para_la_determinación_de_coeficientes_de_fricción_y_un_ejemplo_de_aplicación
- Rudas, J., Gómez, L., & Toro, A. (2013). Modelamiento del proceso de desgaste de un tribómetro pin on disk: Flash temperature y mecanismo de disipación. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 16 de enero de 2020 <http://revistas.ustabuca.edu.co/index.php/ITECKNE/article/view/397>
- Sinha, Sujeet, y Brian Briscoe. 2009. *Polymer tribology*. 1.ª ed. Singapur: Imperial College Press. <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=n-JpDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=polymer+tribology+sujeet&ots=FjtATZNbir&sig=I3I3yAeCindB-3plzym8hvDkSE#v=onepage&q=polymer%20tribology%20sujeet&f=false>
- Vázquez Torres, Arturo. 2020. «Cargas para resinas». *Reaxol*. Recuperado 8 de octubre de 2020 <https://www.reaxsol.com/2020/01/21/cargas-para-resina-poliester/>.



Implementación de sistema de adquisición de datos y control, en tribómetro cilindro a cilindro mediante aplicación móvil

Francisco Fabián Ruíz Quiroz*, Andrés López *, Ervin Jesús Álvarez*, Rosario Aldana*, Yazmín Rivera*

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Veracruzana, Xalapa-Enríquez, Ver CP 91000
MEX (Tel: 228-591-0031; Dirección de correo electrónico: frankruizq19@gmail.com).*

Resumen: En este trabajo se presenta el proceso realizado para la implementación de un sistema de adquisición de datos y control en un tribómetro cilindro a cilindro ubicado en el Laboratorio de Tribología de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Región Xalapa de la Universidad Veracruzana, esta implementación consistió principalmente en la adaptación de distintos sensores que permitieron la correcta adquisición de datos, así como un control en la variación de la velocidad del tribómetro durante su funcionamiento, una innovación importante fue la visualización de los datos mediante una aplicación móvil, que permite una operación del tribómetro, más sencilla y comprensible. Para su verificación fueron realizadas distintas pruebas en el Tribómetro en donde se determinó su correcto funcionamiento.

Palabras clave: Tribología, Tribómetro, adquisición de datos, sistema de control, aplicación móvil.

Abstract: In this paper is presented a summary of the process carried out for the implementation of a data acquisition and control system in a cylinder-to-cylinder tribometer located in the Tribology Laboratory of the Faculty of Mechanical and Electrical Engineering of the Universidad Veracruzana campus Xalapa, this implementation consisted mainly in the adaptation of different sensors that allowed the correct acquisition of data, as well as a control in the variation of the tribometer speed during the tests, an important innovation was the visualization of the data through a mobile application, which made handling the tribometer easier and more understandable. For its verification, different tests were carried out on the Tribometer where its correct operation was determined.

Keywords: Tribology, Tribometer, data acquisition, control system, mobile application.

1. INTRODUCCIÓN

Un adecuado estudio en los diferentes tipos de materiales de los sistemas mecánicos, puede prevenir fallas en su aplicación, entre estas fallas se encuentra el desgaste de materiales, que, si bien es un tema con basta investigación, es muy importante tener equipos mecánicos que puedan replicar pruebas reales del comportamiento de los materiales, entre estos equipos mecánicos uno de los principales es el tribómetro, si en la experimentación con nuevos materiales se presenta un mejor rendimiento con respecto a la fricción y el desgaste, estos materiales podrán sustituir a los actualmente aplicados, el tribómetro es la herramienta para la evaluación y denotación, de si tales materiales existen (González Batista, 2019), éste cuenta con distintas configuraciones, entre ellas está el tribómetro cilindro a cilindro, que no es más que el equipo que permite realizar ensayos de desgaste, los cuales

consisten en poner en contacto dos cilindros generando fricción cuyos ejes están posicionados perpendicularmente, entre los cuales, un cilindro se encuentra en rotación y el otro estático.

Una ciencia de vital importancia para entender el desgaste de los materiales es la Tribología, El término Tribología se utilizó por primera vez en Inglaterra en un informe confeccionado por P. Jost en el año 1966, este neologismo proviene de las palabras griegas “tribos”, que significa fricción, y “logos”, que significa estudio; utilizándose para designar la ciencia de las superficies friccionantes, o sea, de las superficies en contacto con movimiento relativo entre ellas (Castillo Herrera y Toapanta Cunalata, 2019), por lo tanto, se requiere conocer el desgaste de los materiales con los que principalmente se trabajará en el tribómetro, para tener una medición y prueba confiable se necesita saber cómo se



comportan los parámetros que afectan a los distintos materiales con los que se trabajará, es por ello que una correcta medición de los factores y el control de las pruebas ayudará a mejorar los resultados obtenidos en el tribómetro.

Ahí es donde entra la implementación de un sistema de adquisición de datos y control en la máquina tribológica, esto con la finalidad de optimizar el tribómetro, precisión en las pruebas y actualizarlo hasta el punto de obtener una experiencia satisfactoria, ya que con una interfaz de visualización de los datos sencilla y accesible como una aplicación móvil, los estudiantes, docentes y demás usuarios podrán realizar pruebas rápidas y confiables.

1.1 Planteamiento de problema

El Laboratorio de Tribología que se encuentra adscrito a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica región Xalapa de la Universidad Veracruzana (FIME XALAPA UV), abrió por primera vez sus puertas en agosto de 2009, a la comunidad estudiantil de esa entidad académica que estuviera interesada en realizar prácticas relacionadas a la tribología, por lo tanto, el estudiante pudo estar a la par de otras universidades que contaban con esta área de estudio y mantenerse actualizado en estos temas, sin embargo, los estudiantes que se interesan por los temas ahí tratados a veces son limitados, ya que los equipos pueden estar desactualizados y no contar con la tecnología adecuada para su funcionamiento.

En este Laboratorio de Tribología, se cuenta con un tribómetro cilindro a cilindro (Figura 1) que cumple su función para las pruebas ahí realizadas, pero está limitado debido a la falta de sistemas que nos permitan monitorear los parámetros con los que se trabaja en cada prueba, esto dificulta en gran medida a los estudiantes, ya que, al finalizar cada experimento los resultados pueden variar y afectar dicha prueba.



Figura 1 Tribómetro cilindro a cilindro.

Los parámetros más importantes que se deben monitorear en cada prueba tienen que ver principalmente con los siguientes:

El número de revoluciones por minuto (RPM) con los que trabaja, la temperatura y la humedad con la que los experimentos se realizan, éstos son muy importantes ya que afectan cuando la prueba es lubricada. Además, otra problemática que se encuentra es que no se cuenta con un sistema para controlar todo lo anterior y así facilitar al usuario al programar el encendido y apagado del motor con el que funciona el tribómetro.

2. PARÁMETROS A MEDIR

Tal y como se plantea, un sistema de adquisición de datos es un sistema electrónico de medida que se utiliza para obtener automáticamente información de un determinado proceso o del estado de una planta (Granda Miguel, 2015) y un sistema de control, es un conjunto de dispositivos encargados de administrar ordenar, dirigir y regular el comportamiento del sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados (learn, 2019).

Por lo tanto, un sistema de adquisición de datos (SAD) y control implementado en el tribómetro, servirá para obtener valores reales de los parámetros a medir y controlar, pero llegando a este punto se debe tener claro qué valores son los que afectan las pruebas tribológicas en un tribómetro, para esto se recurre a la norma ASTM G99-95, que indica los factores relevantes que pueden influir en la prueba.

Según (ASTM, Patente n° G99 – 95a, 2004) los parámetros de prueba son:

2.1 Temperatura del aceite

La temperatura en el punto de contacto entre las superficies en estudio, ya que si la prueba es lubricada se debe medir la temperatura del aceite para su evaluación de su influencia en el desgaste.

2.2 Ambiente

La atmósfera (aire de laboratorio, humedad relativa, argón, lubricante, entre otros.) que rodea el contacto de desgaste, en las pruebas del tribómetro es de suma importancia tener en cuenta la variable física de la humedad relativa y la temperatura ambiente en la cual se está trabajando.

2.3 Número de revoluciones

La máquina debe estar equipada con un contador de revoluciones o su equivalente que registre el número de revoluciones del disco, y preferiblemente tenga la capacidad de apagar la máquina después de un número de revoluciones preseleccionado.

2.4 Coeficiente de fricción

A todo esto, se le puede agregar un parámetro que es de suma importancia tener en cuenta durante la prueba en el



tribómetro, este es el coeficiente de fricción el cual está presente y entrega valores útiles para la evaluación del material.

Los principales parámetros serán los cuatro anteriores, que según la norma ASTM, son suficientes para conocer que influyó en dicha prueba, ahora el siguiente paso es conocer qué sensores y controladores son los adecuados para poder implementar el SAD y el sistema de control.

En el mercado existe una gran variedad de alternativas a elegir, pero este trabajo se caracteriza por seleccionar componentes accesibles y funcionamiento adecuado, es por ello que todos los sensores que se seleccionen serán pensando en ello.

3. METODOLOGIA

En el laboratorio de Tribología de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Región Xalapa de la Universidad Veracruzana (UV), se dispone de un tribómetro del tipo cilindro a cilindro, la configuración general de la máquina es una geometría rectangular en vertical. En su interior incluye un motor eléctrico en una posición vertical con flecha hacia arriba, conectado al variador de frecuencia (Olivo Urbina, 2020). Como se observó en la Figura 1.

Una vez que se sabe cómo está construida la máquina tribológica, lo siguiente es seleccionar los sensores adecuados para implementarlos en el tribómetro. El objetivo de un sensor o transductor es transformar una cantidad física en una señal diferente a la original, lo que se desea es que la salida sea de tipo eléctrica. Los sensores están en contacto directo con las variables físicas y usan o consumen energía del medio monitorizado para proporcionar una señal distinta (eléctrica, desplazamiento de presión, potencia, posición espacial o angular) en respuesta a la variación de la variable física. También se le conoce como el principal factor de medida (Zárate silva & Nájera García, 2013).

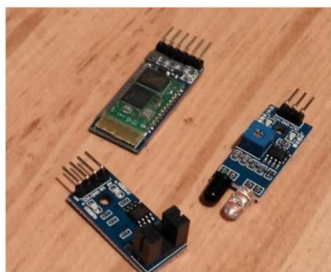


Figura 2. Sensores digitales para medición de señales.

Existe una cantidad muy grande de variables que puede medir un sensor para esa determinada variable, ya sean de temperatura, presión, humedad, entre otros, esto hace que los sensores sean de distintos tipos y características.

3.1 Selección de sensores

Conforme a las necesidades que se tienen para el tribómetro, los sensores seleccionados para la implementación del SAD, son :

- **Sensor de Temperatura del aceite:** Sensor de temperatura digital de tipo DS18B20 y con encapsulado de acero inoxidable el cual es resistente al agua, además cuenta con una lectura de temperatura que va desde los -55°C hasta los 125°C.
- **Sensor de Humedad y Temperatura ambiente:** Sensor De Temperatura Y Humedad Ky-015 DHT11 es un sensor capacitivo de humedad para determinar las condiciones del entorno, tiene un tamaño ultra compacto y es de bajo consumo de energía
- **Sensor de RPM'S para el tribómetro:** Módulo KY-003 Sensor Magnético Digital, es un módulo que integra un sensor magnético de Efecto Hall con salida digital, el cual permite detectar de forma fácil, rápida y precisa campos magnéticos producidos cerca del sensor.
- **Sensor de coeficiente de fricción para el tribómetro:** La celda de carga de 20 Kg. es un transductor que puede medir el peso o la fuerza y la convierte en una señal eléctrica, mediante un dispositivo mecánico, la fuerza que se desea medir deforma el sensor y convierte el desplazamiento o deformación en señales eléctricas.

Una vez seleccionados los sensores correspondientes, se procede a elegir el controlador para montar los sistemas, tanto el SAD, como el sistema de control, para este trabajo se propuso trabajar con el microcontrolador Arduino UNO, ya que este microcontrolador es una tecnología accesible y, además, su sencillez de uso lo hace el más adecuado. Este microcontrolador es compatible con todos los sensores seleccionados y es importante mencionar que todos los transductores tienen entradas digitales, lo cual reduce el diseño de los sistemas de adquisición de datos y control, porque no se requiere de un convertidor de datos Analógico – Digital para su conexión.

3.2 Diseño de la investigación

Con los sensores adecuados y el microcontrolador apropiado, se tiene una visión más certera de cómo se va a diseñar el sistema de adquisición de datos y control, además de una perspectiva de la interfaz de la aplicación móvil, ya que basándose en todos los elementos anteriores se diseñará el prototipo más adecuado para su posterior implementación. Es de suma importancia el primero saber qué sensores se van a utilizar, ya que con éstos se podrá conocer cuál será el funcionamiento del sistema de adquisición de datos y control que a su vez servirá como pilar para su adecuada función de la aplicación móvil, teniendo esto en cuenta se procederá a



diseñar el sistema de adquisición de datos, el sistema de control y la aplicación móvil.

El diseño principal para este sistema de adquisición de datos se basó en la siguiente estructura básica de un SAD:

- 1) Elemento sensor que transforma los parámetros físicos en señales eléctricas medibles por el sistema de adquisición.
- 2) Bloque para el acondicionamiento de las señales provenientes del sensor, de forma tal que se ajusten a las exigencias de entrada de la siguiente etapa.
- 3) Bloque de adquisición, destinado principalmente a la conversión de las señales de naturaleza analógica a digital.
- 4) Etapa para el tratamiento de los datos adquiridos (procesamiento, almacenaje) y control del resto de los elementos del sistema.
- 5) Medios de visualización de los datos registrados.

Para este sistema de control el principal objetivo será controlar la velocidad de un motor de manera precisa. El segundo paso consistió en identificar las variables que se desean controlar (en este caso será la velocidad del motor). El tercer paso fue escribir las especificaciones en función de la precisión que se debe alcanzar. Esta precisión de control requerida conducirá entonces, a la identificación de un sensor para medir la variable controlada. La configuración del sistema de control que se implementó consistió en:

- 1) Sensor.
- 2) Proceso bajo control.
- 3) Controlador.
- 4) Actuador.

Para poder visualizar y controlar los dos sistemas anteriores, es necesario contar con una interfaz para el usuario, en donde se mostrarán todos los valores y controles de los parámetros planteados, como por ejemplo la temperatura del lubricante durante una prueba, la temperatura y humedad ambiente y las revoluciones a las que girará el motor del tribómetro.

Para el diseño de la aplicación es muy importante tener en cuenta en qué plataforma y para qué sistemas operativos se diseñará, para este trabajo la plataforma de App Inventor fue la mejor opción, ya que ésta es una plataforma de desarrollo creada por Google Labs enfocada en aplicaciones del sistema operativo Android, por lo mismo se puede acceder a ésta mediante una cuenta de Google, lo cual la hace de acceso gratuito.

App Inventor además te permite crear aplicaciones sin ser un experto en programación, ya que cuenta con una interfaz gráfica que le muestra al usuario cómo programar (Figura 3). La programación se realiza mediante bloques de instrucciones, las cuales se pueden ir visualizando en el compilador con el que cuenta, otro punto muy favorable de App Inventor, es que permite crear aplicaciones en menos

tiempo que otras plataformas de desarrollo y se pueden programar aplicaciones más complejas en menos tiempo que en otros lenguajes de programación.

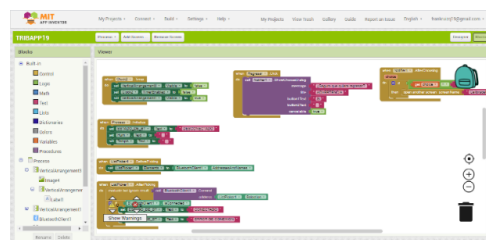


Figura 3. Codificación de la app móvil en App Inventor.

4. PRUEBAS REALIZADAS

La implementación del sistema de adquisición de datos y control se realizó en el tribómetro cilindro a cilindro de forma que todos los sensores se colocaran en los sitios adecuados para una correcta lectura de los parámetros requeridos, pasando entonces a su posterior representación en la interfaz que se diseñó para una aplicación móvil, esta aplicación se puede descargar gratuitamente para usuarios Android y al instalarla en un celular su presentación es la siguiente:

Se muestra una pantalla de bienvenida al usuario (Figura 4), en donde se le explica que con la aplicación podrá controlar el tribómetro cilindro a cilindro del Laboratorio de Tribología y se muestra el botón para entrar y acceder a los controles para la prueba.



Figura 4. Pantalla de bienvenida de la aplicación móvil.

Después de presionar el botón ENTRAR se muestra la pantalla de registro, en donde los usuarios ya sean alumnos, docentes o investigadores, ingresarán sus datos, esto servirá para que el encargado del laboratorio lleve un registro de quien es el que uso el tribómetro, así como en qué fecha y horario y el motivo de su uso.





Figura 5. Pantalla de Registro.

Después de registrarse, se accede a la pantalla principal de la aplicación, en donde se encuentran los controles y los campos en donde se mostrarán todos los parámetros medidos por los sensores mediante una prueba en el tribómetro, esta pantalla muestra la temperatura del lubricante en caso de que una prueba sea lubricada, también se muestra la temperatura y la humedad relativa del lugar en donde se encuentra el tribómetro, después se muestran las revoluciones a las que se está llevando una prueba de desgaste, en los botones de iniciar y stop, se da inicio a una prueba o se detiene, y los botones de + y - ayudan a aumentar las revoluciones o a disminuirlas cuando se está corriendo una prueba.



Figura 6. Interfaz de la aplicación mediante una prueba en el tribómetro.

5. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó un sistema de adquisición de datos y control con el objetivo de facilitar el manejo y operación del tribómetro cilindro a cilindro del laboratorio de Tribología de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica región Xalapa de la Universidad Veracruzana.

Todos los sensores funcionan correctamente en su conjunción con Arduino y la aplicación móvil, ya que sus lecturas son correctas y en tiempo real, lo que en una prueba de desgaste montada en el tribómetro es de mucha utilidad para su análisis final de los materiales y es aquí en donde se puede visualizar la importancia de la implementación de los sistemas planteados ya que permiten a los estudiantes, docentes y demás que utilicen el tribómetro, tener mejores conclusiones en los análisis finales de los materiales con los que realicen pruebas.

Además, a estos sistemas se le pueden seguir mejorando aspectos considerables, como son una muestra de los datos del coeficiente de fricción en la aplicación móvil, mediante una gráfica en tiempo real cuando se esté realizando una prueba de desgaste, ya que con esto se tendría un promedio del coeficiente de fricción dinámico para determinados materiales.

Actualmente los parámetros que se censan pueden ser visualizados en la aplicación móvil, y algunos valores como el coeficiente de fricción pueden ser capturados mediante la aplicación y esta mandarlos a una hoja de cálculo de Google, en donde posteriormente pueden ser descargados en formato .xlsx o en .pdf y ser analizados después de una prueba.

REFERENCIAS

- ASTM Standars. (2004). Estados Unidos, Patente n° G99 – 95a.
- Castillo herra, w. p., and Toapanta Cunalata, o. g. (2019). *Principios de tribología aplicados en la ingeniería mecánica*, (primera ed.). Alcoy, España: área de innovación y desarrollo, s.l.
- González Batista, M. E. (2019). *Construcción de tribómetro para ensayos de fricción y desgaste según norma ASTM G77*. (Tesis doctoral), Universidad de las tunas, Facultad de ciencias técnicas, las tunas.
- Granda Miguel, M. B. (2015). *Instrumentación electrónica: transductores y acondicionadores de señal*. Santander, España: Editorial de la Universidad de Cantabria.
- learn, k. (2019). *Teoría de control- sistemas de control a lazo abierto y lazo cerrado*.
- Olivo Urbina, y. d. (2020). *Diseño e implementación mecánica de una máquina tribológica*. Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Xalapa, ver.
- Zárate silva, V. H., & Nájera García, P. (2013). *Lo esencial de la instrumentación moderna para mecatrónicos*. Monterrey, México: Editorial Digital del Tecnológico de Monterrey.



Análisis experimental de un inersor en un sistema MRA de dos grados de libertad

Lot Reza-Arteaga*, Andrés Blanco-Ortega*, Jorge Colín-Ocampo*
Wilberth M. Alcocer-Rosado* y Arturo Abúndez-Pliego*

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490
(Tel: 777-362-7770; e-mail: lot.reza.a@gmail.com, andres.blanco@cenidet.edu.mx).

Resumen: En este artículo se presentan resultados experimentales de un inersor en un sistema masa-resorte-amortiguador de dos grados de libertad. El inersor es un dispositivo mecánico que fue propuesto para atenuar de manera pasiva las vibraciones. Se presenta el prototipo del inersor tipo cremallera-piñón con el sistema de dos grados de libertad y se analiza de forma experimental con el uso de LabView, bajo las condiciones de las dos resonancias del sistema. También, se presentan resultados de este análisis, donde se observa que el inersor atenúa las amplitudes de vibración presentando un mejor desempeño en la segunda resonancia, cuando se encuentra acoplado entre las dos masas, además de mantener estable las oscilaciones en ambas masas.

Keywords: Inersor, sistema masa resorte amortiguador, resonancia.

1. INTRODUCCIÓN

Un inersor (Inerter) es un concepto propuesto con la propiedad de que la fuerza aplicada en sus dos terminales es proporcional a la aceleración relativa entre ellos (Smith, 2002). El inersor fue aplicado por primera vez en un auto de carreras conducido por Kimi Raikkonen en la carrera del 2005 Spanish Grand Prix, logrando obtener la victoria para McLaren (Chen *et al.*, 2009). En este vehículo se dio a conocer como amortiguador J (Damper J) para mantener en secreto el desarrollo tecnológico en el cual se probó que el inersor mejoró el rendimiento de las suspensiones del vehículo.

En la Figura 1 y 2 se muestran dos configuraciones de inersores, una con elementos de cremallera, engranes y volantes de inercia, y la otra, con un tornillo de bolas (también conocido como husillo) y la tuerca.

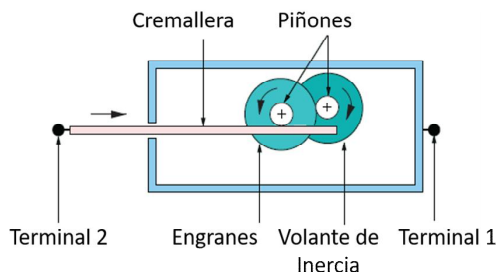


Fig. 1 Inersor en configuración Cremallera-Piñón.

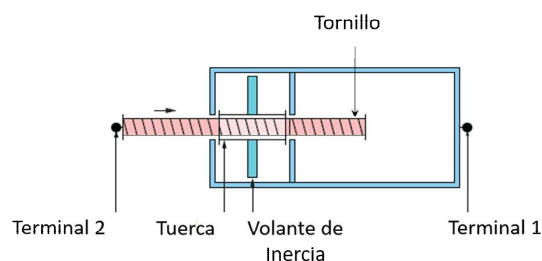


Fig. 2 Inersor en Configuración Tornillo de bolas-Tuerca.

Se han realizado algunas configuraciones del inersor con resortes y amortiguadores para suspensiones en vehículos; en (Chen *et al.*, 2012) se presenta un estudio comparativo de cinco configuraciones para aplicaciones de suspensiones. En (Chen *et al.*, 2014) investigaron la influencia del inersor en las frecuencias naturales de sistemas de vibración. Demostraron que las frecuencias naturales de un sistema de un solo grado de libertad (SDOF) y un sistema de dos grados de libertad (TDOF), el inersor puede reducir las frecuencias naturales de estos sistemas. Los inersores también se han puesto a prueba en sistemas de suspensión de ferrocarriles, tanto en la suspensión primaria como en la secundaria, dando buenos resultados en soluciones de suspensión activa y semiactiva (Matamoras y Goodaoll, 2014) (Chen *et al.*, 2017) (Hu *et al.*, 2017). Otras aplicaciones del inersor se encuentran en suspensión de



edificios (Fu-Cheng *et al.*, 2007) (Giarilis y Petrini, 2017), inersor mecatrónico para suspensiones de vehículos (Fu-Cheng *et al.*, 2013), y, en tobillos de robots, dónde se obtuvo un mejor desempeño en la velocidad de caminata y su estabilidad (Watanabe, 2014).

Alujević *et al.* (2018) presenta un estudio teórico sobre esquemas de aislamiento de vibraciones pasivas y activas utilizando elementos inersores en un sistema mecánico de dos grados de libertad (GDL). Ellos concluyen que los inersores también pueden ser útiles para mejorar aún más el rendimiento de los sistemas tradicionales de absorción y aislamiento de vibraciones activas en términos de estabilidad, robustez y capacidades de supresión de vibraciones. También, se han propuesto amortiguador – inersor activo sintonizado (active tuned inerter damper - ATID). El dispositivo propuesto se compone de un par de actuadores reactivos y sensores de fuerza, mencionan que, para implementación práctica, se prefiere un ATID más rígido por las consideraciones de robustez en términos de márgenes de fase (Zhao *et al.*, 2019).

En sistemas mecánicos vibratorios se presenta un problema conocido como resonancia. La resonancia es un estado de operación en el que una frecuencia de excitación se encuentra cerca de una frecuencia natural del sistema. Para llevar el sistema mecánico a una velocidad de operación generalmente se tiene que pasar por al menos una resonancia, en la cual debido a las amplitudes grandes de vibración se transmiten fuerzas a los componentes, que pueden llegar a dañar el sistema o reducir la vida de dichos componentes.

En este artículo se presentan los resultados experimentales del análisis de la respuesta de un sistema masa- resorte- amortiguador (MRA) de dos grados de libertad en sus dos resonancias, considerando un inersor para atenuar las amplitudes de vibración; cuando el sistema está sujeto a una fuerza de excitación con una frecuencia cercana o igual a la frecuencia natural del sistema, dónde la parte teórica fue reportada en (Lot *et al.*, 2020).

2. ANÁLISIS DINÁMICO

2.1 Descripción del sistema MRA de 2 GDL

En la Figura 3 se muestra el prototipo virtual de la plataforma del sistema masa-resorte-amortiguador. La fuerza de excitación será proporcionada por un servomotor, conectado a la primera masa por un mecanismo cremallera-piñón. Con este sistema se pueden simular sistemas mecánicos masa-resorte-amortiguador de 1 a 3 GDL.

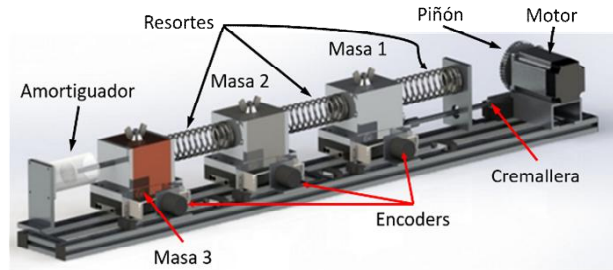


Fig. 3 Prototipo virtual del sistema masa-resorte-amortiguador.

A continuación, se presenta el modelo matemático de un sistema de 2 GDL, así como la obtención de sus 2 frecuencias de las formas modales. El diagrama esquemático para un sistema MRA de 2 grados de libertad (GDL), se muestra en la Figura 4. Por lo que, se consideran solo dos masas (m_1 , m_2), dos resortes (k_1 , k_2), amortiguamiento viscoso entre los carros y las guías (c_1 , c_2), una fuerza de excitación externa (proporcionada por la cremallera piñón, ver Figura 3). El desplazamiento de cada masa está denotado por x_1 y x_2 .

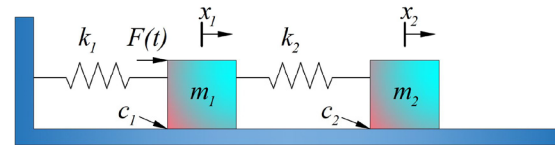


Fig. 4 Sistema masa-resorte-amortiguador de 2 GDL.

2.2 Modelo matemático del sistema de 2 GDL

Aplicando la segunda ley de Newton o el formulismo de Euler-Lagrange, se obtiene el modelo matemático que rige la dinámica del sistema.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) + c_1 \dot{x}_1 &= F(t) \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) + c_2 \dot{x}_2 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Para el modelo matemático (1), sin fuerza de excitación y despreciando el amortiguamiento, se propone la siguiente solución en forma compleja:

$$\begin{aligned} x_1 &= A_1 e^{j\omega t} \\ x_2 &= A_2 e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (2)$$

Derivando dos veces (2), para sustituir en el modelo matemático, y simplificando, quedan las siguientes ecuaciones:



$$\begin{aligned} m_1(-\omega^2 A_1) + k_1(A_1) - k_2(A_2 - A_1) &= 0 \\ m_2(-\omega^2 A_2) + k_2(A_2 - A_1) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Para obtener el polinomio característico, se obtiene el determinante de (3) igualando a cero, el cual está dado por:

$$\omega^4 m_1 m_2 - (k_1 m_2 + k_2 m_1 + k_2 m_2) \omega^2 + k_1 k_2 = 0 \quad (4)$$

Considerando $\lambda = \omega^2$, y obteniendo las raíces, se obtienen las dos frecuencias naturales del sistema para cada modo de vibración.

2.3 Modelo matemático del sistema de 2 GDL con inersor

El sistema masa-resorte-amortiguador con un inersor acoplado entre la masa 1 y la masa 2, se muestra en la Figura 5. EL inersor está denotado por su inercia b . En este análisis, se considera el momento de inercia del inersor J (volante de inercia).

Para el modelado del inersor, se considera el desplazamiento angular del piñón, el cual puede ser representado como:

$$\theta_1 = \frac{1}{r_1}(x_1 - x_2) \quad (5)$$

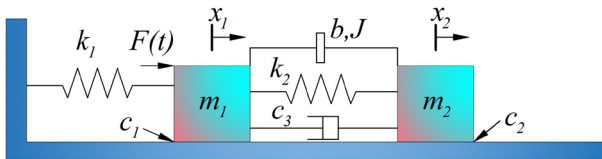


Fig. 5 Sistema masa-resorte-amortiguador de 2 GDL con inersor.

Aplicando la segunda ley de Newton o el formulismo de Euler-Lagrange, se obtiene el modelo matemático que rige la dinámica del sistema con el inersor.

$$\begin{aligned} (m_1 + J)\ddot{x}_1 - J\ddot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2x_2 + c_1\dot{x}_1 + c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) &= F(t) \\ (m_2 + J)\ddot{x}_2 - J\ddot{x}_1 - k_2(x_1 - x_2) + c_2\dot{x}_2 - c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

En la tabla I se muestran los valores que conforman los elementos de la plataforma experimental.

Tabla I. Valores de parámetros del sistema MRA

Unidad	Valor
Masa 1 m_1	2.5 kg
Masa 2 m_2	2.5 kg
Rigidez k_1	1300 N/m
Rigidez k_2	1300 N/m
Amortiguamiento c_1	0 Ns/m
Amortiguamiento c_2	0 Ns/m

3. RESULTADOS DE EXPERIMENTALES

A continuación, se presentan algunos resultados experimentales para las relaciones obtenidas del análisis dinámico del sistema MRA de 2 GDL, con y sin inersor.

En la Figura 6 se muestra el prototipo experimental del sistema masa-resorte-amortiguador con el inersor del tipo cremallera-piñón, acoplado entre la masa 1 y la masa 2. Los desplazamientos de las masas se registran mediante unos encoders rotatorios de 600 pulsos por revolución.

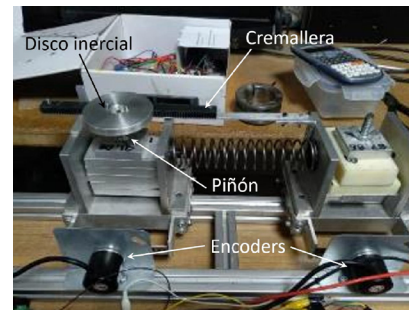


Fig. 6 Prototipo experimental del sistema masa-resorte-amortiguador con inersor.

Considerando los parámetros dados en la tabla 1, correspondientes a los parámetros utilizados en el prototipo virtual, se obtienen las dos frecuencias naturales, al considerar el polinomio característico (4):

$$\omega_1 = 2.4 \text{ Hz} \quad (7)$$

$$\omega_2 = 5.9 \text{ Hz} \quad (8)$$

3.1 Respuesta en vibración forzada

En la Figura 7 se muestra la respuesta del sistema masa-resorte-amortiguador de 2 GDL sin inersor. La excitación es una función armónica sinusoidal con una frecuencia cercana a la primera frecuencia natural ($\omega_1 = 14.1 \text{ rad/s}$ o 2.3 Hz) y de amplitud de 10 mm.

Como se observa en la Figura 8, la respuesta de la masa 2 va en la misma dirección de la masa 1, ambas con amplitud creciente conforme el tiempo crece, por lo que se está excitando la primera resonancia, debido a que la fuerza de excitación tiene una frecuencia igual a la primera frecuencia natural del sistema. Sin embargo, se puede observar que la amplitud de la masa 2 es más grande que la amplitud de la masa 1.



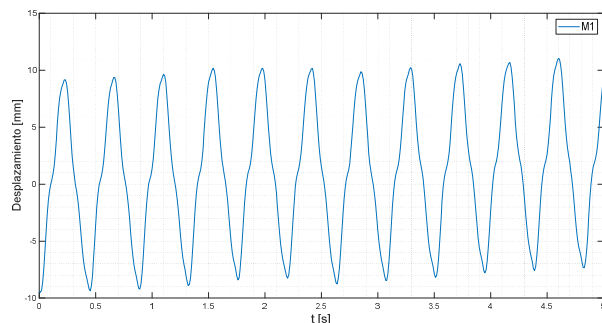


Fig. 7 Respuesta de masa 1 (x_1) en frecuencia de 2.4 Hz. (resonancia).

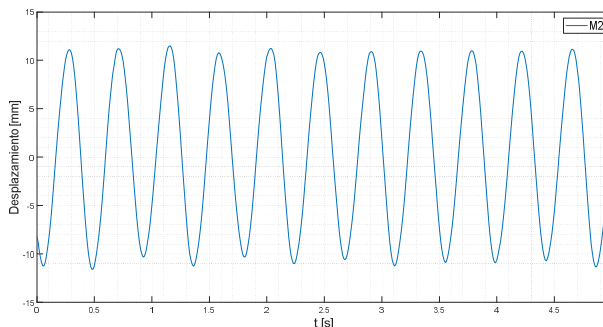


Fig. 10 Respuesta de masa 2 (x_2) con inersor en el sistema en frecuencia de 2.4 Hz. (resonancia).

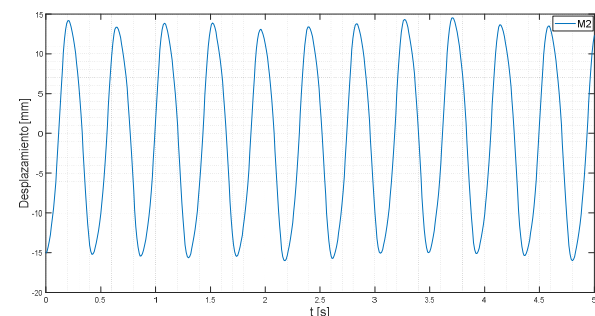


Fig. 8 Respuesta de masa 2 (x_2) en frecuencia de 2.4 Hz. (resonancia).

De manera similar, la respuesta del sistema con inersor, excitado a la misma frecuencia, se muestra en la Figura 9 y Figura 10.

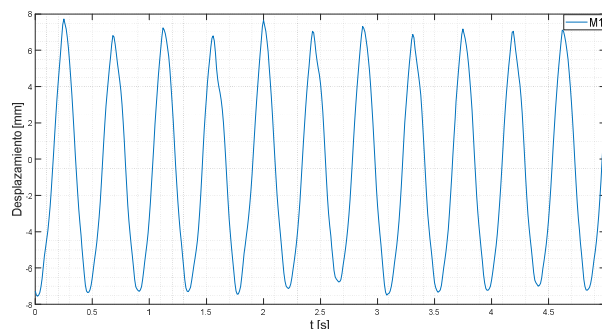


Fig. 9 Respuesta de masa 1 (x_1) con inersor en el sistema en frecuencia de 2.4 Hz (resonancia).

Se observa que en ambas respuestas se atenúa la amplitud, teniendo una mayor atenuación en la amplitud de la masa 2. El comportamiento de la masa 2 se muestra en la Figura 10.

3.2 Respuesta en resonancia con segunda frecuencia natural

En la Figura 11, se muestra la respuesta de la masa 1 del sistema de 2 GDL sin inersor en una frecuencia cercana y menor a su segunda frecuencia natural, 5.5 Hz.

En la Figura 12, se muestra la respuesta de la masa 2 a la misma frecuencia, cabe destacar que las masas tienen en esta frecuencia movimientos contrarios. Sin embargo, se puede observar que, en esta frecuencia, la amplitud de la masa 1 es más grande que la amplitud de la masa 2.

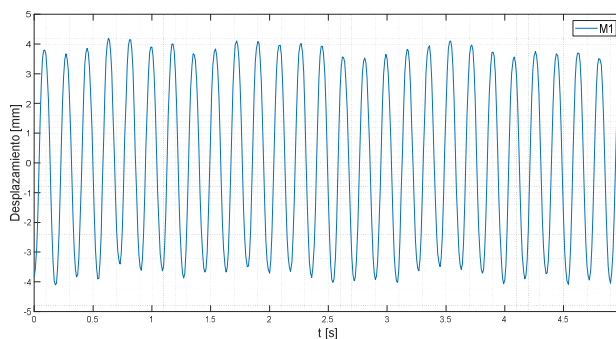


Fig. 11 Respuesta de masa 1 (x_1) en frecuencia de 5.5 Hz.

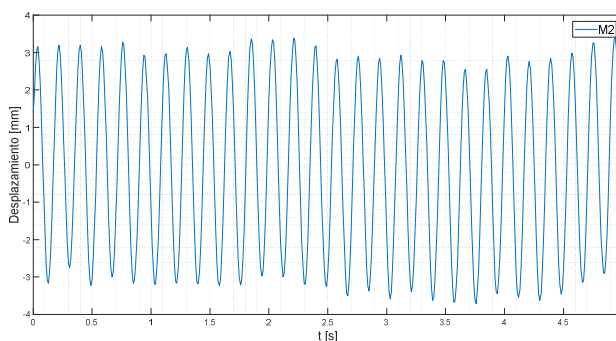


Fig. 12 Respuesta de masa 2 (x_2) en frecuencia de 5.5 Hz.



De manera similar a la respuesta mostrada en la Figura 11 y Figura 12, se realizó la misma simulación con el prototipo con inersor, es decir, se aplicó la misma frecuencia de excitación.

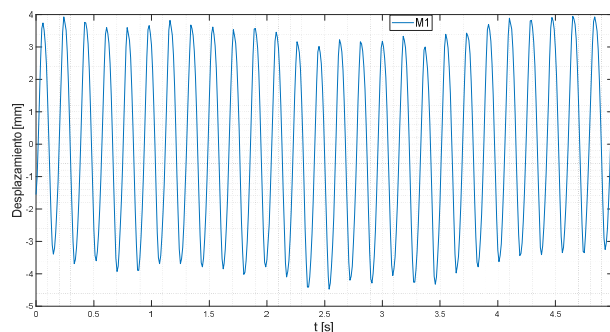


Fig. 13 Respuesta de masa 1 (x_1) con inersor en el sistema en frecuencia de 5.5 Hz.

Se puede observar que se obtiene una respuesta muy similar a la obtenida en el análisis sin inersor, donde la amplitud en la masa 1 en ambos análisis es muy similar. Esto se debe a que la masa 1 está conectada directamente con el excitador, por lo cual solo se verá una diferencia de comportamiento en la masa 2. En la Figura 14 se observa el comportamiento de la masa 2 en la misma frecuencia (5.5 Hz), se puede observar como hay una disminución en la amplitud de esta masa, derivado del efecto del inersor.

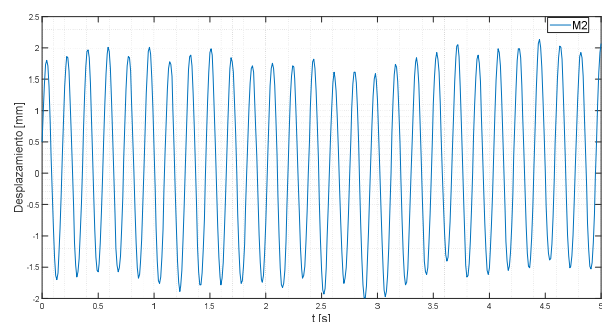


Fig. 14 Respuesta de masa 2 (x_2) con inersor en el sistema en frecuencia de 5.5 Hz.

Las respuestas mostradas en las Figuras 7, 8, 11 y 12, son sin el inersor. Sin embargo, las Figuras 9, 10, 13 y 14, la respuesta del sistema masa-resorte-amortiguador es con el efecto del inersor. Las Figuras 7, 8, 9 y 10 es con la primera frecuencia natural (2.4 Hz), y la respuesta mostrada en las Figuras 11, 12, 13 y 14, es para una excitación cercana a la segunda frecuencia natural (5.5 Hz).

Ahora también se compara la respuesta en resonancia de la segunda frecuencia natural (5.9 Hz), en la cual solo se muestra la respuesta de la masa 2. En la Figura 15 se muestra el comportamiento de la masa 2 sin inersor en esta condición.

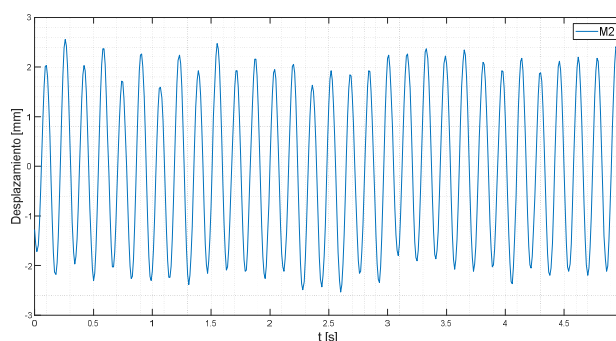


Fig. 15 Respuesta de masa 2 (x_2) en frecuencia de 5.9 Hz (resonancia).

Comparando, también, la respuesta con el inersor mostrada en la Figura 16, con la respuesta sin inersor, Figura 15, se puede apreciar que, en esta segunda frecuencia natural, el inersor atenúa la amplitud de vibración un 35%, logrando mantener estable la oscilación de ambas masas. De los resultados, se muestra que el inersor, cuando está acoplado entre las dos masas, atenúa más la amplitud cuando se encuentra en la segunda frecuencia natural, como se demostró y fue reportado en (Lot *et al.*, 2020).

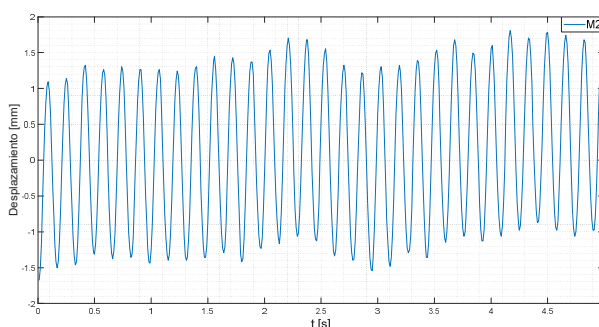


Fig. 16 Respuesta de masa 2 con inersor en el sistema en frecuencia de 5.9 Hz (resonancia).

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta los resultados experimentales de un inersor en condiciones de resonancia de un sistema masa-resorte-amortiguador de 2 grados de libertad. Se obtiene el modelo matemático con el inersor y se comparan las respuestas obtenidas en el análisis experimental.

De los resultados, se muestra que el inersor, cuando está acoplado entre las dos masas, atenúa más la amplitud cuando se encuentra en la segunda frecuencia natural, logrando este diseño reducir en un 35% la amplitud de vibración en esta condición. Además de lograr atenuar la amplitud, logra estabilizar la oscilación de ambas masas, esto se debe a que por



definición el inersor es proporcional a la aceleración relativa que hay entre sus extremos.

Por otra parte, el uso de prototipos experimentales es de gran ayuda para visualizar el comportamiento real de sistemas mecánicos, dando una mejor comprensión de la dinámica.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo brindado por el Tecnológico Nacional de México/CENIDET.

REFERENCIAS

- N. Alujevic', D. C'akmak, H. Wolf, M. Jokic', Passive and active vibration isolation systems using inerter, *J. Sound Vib.* 418 (2018) 163–183.
- M. Z. Q. Chen, Y. Hu, C. Li, G. Chen, "Application of Semi-Active Inerter in Semi-Active Suspensions Via Force Tracking," *ASME. J. Vib. Acoust.* 138(4), pp. 1–11, 2016.
- M.Z.Q. Chen, C. Papageorgiou, F. Scheibe, F.C. Wang, M.C. Smith, The missing mechanical circuit element, *IEEE Circuits and Systems Magazine* 9 (1) (2009) 10–26.
- M. Z. Q. Chen, Yinlong Hu, and Baozhu Du, Suspension Performance with One Damper and One Inerter, 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC) (2012) 3535-3539.
- M. Z.Q. Chen, Yinlong Hu, LixiHuang, Guanrong Chen, Influence of inerter on natural frequencies of vibration systems, *Journal of Sound and Vibration* (2014)1874–1887.
- Fu-Cheng Wang, Cheng-Wei Chen, Min-Kai Liao and Min-Feng Hong. Performance Analyses of Building Suspension Control with Inerters, 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA, USA, Dec. 2007. 12-14.
- Fu-Cheng Wang, Hsueh-Ju Chen and Chung-Hung Yu, Performance Benefits of a Full-Car Model with Mechatronic Inerter Networks, *SICE Annual Conference* 2013. September 14-17, 2013, Nagoya University, Nagoya, Japan.
- Y. Hu, M. Z. Q. Chen, and Y. Sun, "Comfort-oriented vehicle suspension design with skyhook inerter configuration," *J. Sound Vib.*, vol. 405, pp. 34–47, 2017.
- A. Giarralis and F. Petrini, "Optimum design of the tuned mass-damper-inerter for serviceability limit state performance in wind-excited tall buildings," *Procedia Eng.*, vol. 199, pp. 1773–1778, 2017.
- A. Z. Matamoros-Sanchez and R. M. Goodaoll, "Applications of the inerter in railway vehicle suspension," *2014 UKACC Int. Conf. Control. Control 2014 - Proc.*, no. July, pp. 555–560, 2014.
- L. Reza-Arteaga, A. Blanco-Ortega, J. Colín-Ocampo, W. M. Alcocer-Rosado y A. Abúndez-Pliego. Análisis dinámico de un inersor en MSC ADAMS. *Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada*, Vol. 3, Núm. 1, pp. 260-265. 2020.
- M. Watanabe, T. Hayashi, and M. Yamakita, "Wobbling mass effects for a walking robot with inerters," pp. 1073–1078, 2014.
- M. C. Smith, Synthesis of mechanical networks: the inerter, *IEEE Transactions on Automatic Control* 47(10) (2002)1648–1662.
- G. Zhao, G. Raze, A. Paknejad, A. Deraemaeker, G. Kerschen, C. Collette, Active tuned inerter-damper for smart structures and its H 1 optimisation, *Mech. Syst. Signal Process.* 129 (2019) 470–478.



Diseño de un extrusor de inyección variable para manufactura aditiva

Filiberto Cruz Flores*, Andrés Blanco-Ortega*,
Wilberth M. Alcocer-Rosado* y Claudia Cortés García*

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490
(Tel: 777-362-7770; e-mail: filiberto.cruz.flores@gmail.com, andres.blanco@cenidet.edu.mx).

Resumen: En este artículo se presentan el diseño y las pruebas experimentales de un mecanismo de diámetro variable acoplado al sistema de extrusión de una impresora 3D. El objetivo es desarrollar un extrusor de inyección de material, con diámetro variable (0.1 - 1mm) según se requiera en la manufactura aditiva de una pieza para incrementar la velocidad y mejorar la calidad de impresión de la pieza. Se realizó un diseño basado en el llamado mecanismo iris o de diafragma. Para validar el funcionamiento del mecanismo, se realizaron tres pruebas experimentales. El diseño y construcción del mecanismo de diámetro variable realizado tiene como objetivo reducir el tiempo de trabajo que se requiere al cambiar las boquillas de una impresora 3D de diferente diámetro, así como, mejorar el tiempo de impresión y calidad. Se realizaron pruebas de impresión, de un cubo de 10 mm³, con el mecanismo propuesto, mostrando la viabilidad de la boquilla de diámetro variable.

Keywords: Impresión 3D, manufactura aditiva, mecanismo Iris, Sistema de extrusión.

1. INTRODUCCIÓN

El origen de las impresoras 3D proviene de la idea de convertir en objetos reales los modelos realizados con programas de diseño asistido por computadora (CAD) [1]. En la actualidad, se utilizan para crear prototipos rápidos o prefabricar piezas. En 1797, Joseph Braham patentó el primer proceso de extrusión en un tubo de plomo [2] y no fue hasta 1976 donde inició la ahora llamada manufactura aditiva. En 1989 fue desarrollada la técnica de modelado por deposición fundida (Fused Deposition Modeling -FDM) [3], a lo largo de los años la impresión 3D evolucionó a pasos agigantados, desde un haz de luz sobre resinas fotopoliméricas hasta el sinterizado láser selectivo (SLS) permitiendo la fusión selectiva de materiales metálicos [4]. Se realizaron experimentos de tracción en una amplia gama de espesores y ángulos de impresión [5], así como la modificación completa del sistema de extrusión para trabajar con materiales como los cementos [6].

Algunas investigaciones realizaron revisiones sobre los fundamentos y aplicación de la impresión 3D [7], esto para revisar los estudios que determinan los parámetros y características necesarios para evitar que el material (filamento) quede adherido a la boquilla y se presente estancamiento [8]. Al realizar el diseño y fabricación de cabezales que impriman piezas utilizando polvo en lugar de plástico [9], hasta la llegada de la impresión 3D no existían diversas formas para obtener un objeto, siendo la sustracción, flexión, fundición o amoldamiento las técnicas más comunes para la fabricación de

objetos. Estas eran técnicas efectivas, aunque costosas y generadoras de residuos excesivos, por lo que la impresión de plástico sigue siendo una de las más baratas, rápidas y comunes.

2. MODELADO DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN

Una impresora 3D es una máquina capaz de realizar réplicas de diseños en 3D mediante la manufactura aditiva, creando piezas a partir de un diseño hecho por un programa de CAD. Una de las piezas más importantes es el sistema de extrusión. El sistema de extrusión de una impresora es un conjunto de partes que impulsan, conducen, funden y depositan el filamento en la cama de la impresora. El sistema de extrusión, ver Figura 1, cuenta con dos componentes principales:

- El fusor (o hotend)
- El extrusor

En la Figura 1, se identifican las zonas que juegan un papel fundamental para la calidad de impresión, tanto en los parámetros de temperatura como de velocidad. Para el planteamiento del modelo matemático del filamento del extrusor de diámetro variable se considera lo siguiente: el cálculo de tiempo de respuesta en marcha del extrusor y las pérdidas del orden del 10% en el calor entregado.

En la Figura 2, se muestran los componentes del fusor como: el ventilador, disipador, resistencia y un bloque calentador los cuales son los encargados del control de la temperatura de fusión del material en el fusor. En el sistema de transferencia de



calor en el fusor, se consideran las pérdidas convectivas en las aletas y el flujo de calor inducido por una resistencia cerámica.

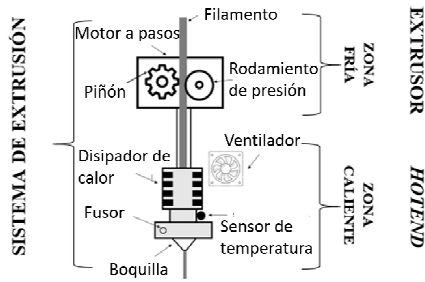


Figura 1. Zonas el extrusor.

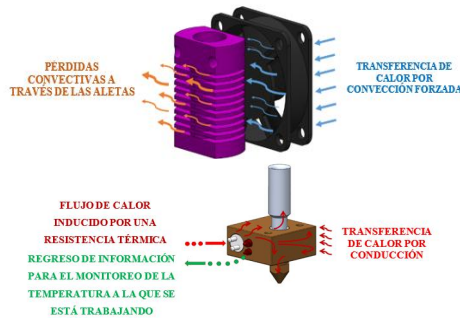


Figura 2. Modelo físico del fusor.

Para la conducción de calor la ecuación o modelo utilizado es la Ley de Fourier [10] (1).

$$\ddot{q}_{conducción} = -\frac{k\Delta T}{dx} \quad (1)$$

$\ddot{q}_{conducción}$ flujo de calor por conducción
 ΔT diferencial de temperatura ($T_{fusión} - T_{ambiente}$)
 dx espesor del material
 K es la propiedad de transporte conocida como conductividad térmica y es característica del material de la pared de estudio

Por lo tanto, las pérdidas de calor en el sistema están dadas por (2):

$$\dot{Q} = -\frac{kA\Delta T}{e} \quad (2)$$

$\dot{Q}$ pérdidas de energía al entorno
 K conductividad térmica
 A área de recubrimiento del aislante
 ΔT diferencia de temperatura ($T_{fusión} - T_{ambiente}$)
 e espesor del aislamiento

Asimismo, la ley de enfriamiento de Newton [11] el modelo apropiado para la transferencia de calor por convección en el sistema (3).

$$\ddot{q}_{convección} = h(T_s - T_{\infty}) \quad (3)$$

$\ddot{q}_{convección}$ flujo de calor por convección
 $(T_s - T_{\infty})$ diferencia de temperatura
 h el coeficiente de transferencia de calor por convección.
 T_s temperatura de la superficie
 T_{∞} temperatura del fluido.

Se puede deducir que el modelo matemático eficiente para el cálculo de la energía necesaria para llevar el bloque calentador a la temperatura deseada, y asumiendo una temperatura del medio ambiente de 25°C, está dado por la (4):

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T = mC_p(T_{fusión} - T_{ambiente}) \quad (4)$$

$\dot{m}$ flujo másico
 C_p calor específico a presión constante
 ΔT diferencia de temperatura ($T_{fusión} - T_{ambiente}$)
 Q transferencia de calor requerida

Considerando que la energía suministrada por el bloque calentador (4) y las pérdidas de calor mediante las aletas del disipador (2), el tiempo para poner a punto de fusión el material está dada por (5):

$$t = \frac{Q}{\dot{Q}} \quad (5)$$

Q energía requerida para fundir el material
 $\dot{Q}$ pérdidas de energía
 t tiempo requerido para fundir el material

En la Figura 3. se muestra el modelo físico de los modelos de transferencia presentes y la notación del tiempo que toma poner a temperatura de fusión el material.

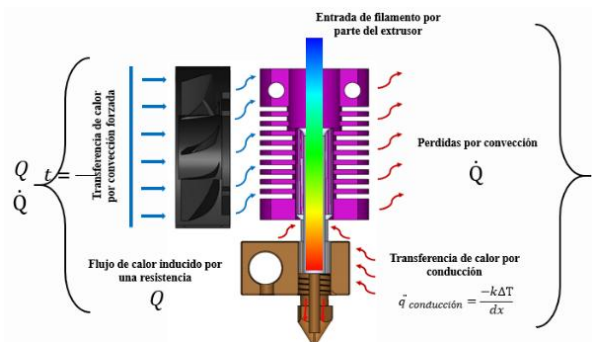


Figura 3. Mecanismos de transferencia en el fusor.



De las ecuaciones anteriores se obtiene un flujo másico, con el cual es posible calcular el caudal y, asimismo, determinar el modelo matemático para la zona fría (6).

$$Q^* = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (6)$$

Q^* caudal
 ρ densidad
 $\dot{m}$ flujo másico

A partir de la ecuación del caudal [10], es posible determinar la velocidad de inyección del filamento (7) y en la Figura 4 se muestra el modelo del extrusor:

$$v = \frac{Q^*}{A} \quad (7)$$

v velocidad
 Q^* caudal
 A área

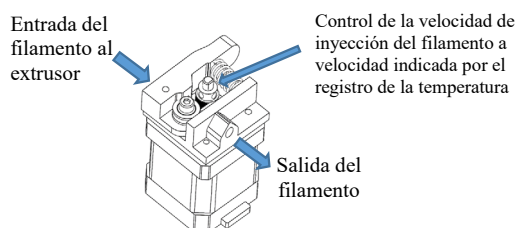


Figura 4. Sistema del control de velocidad de inyección.

En la tabla 1 se muestran los datos de los materiales utilizados en la impresión 3D, como lo son, el PLA y el ABS. Posteriormente, en las tablas 2 y 3 se indican los datos obtenidos a partir de los modelos matemáticos, bajo las leyes de Fourier y de enfriamiento de Newton. Teniendo el diámetro de cada apertura y sus equivalencias en las pérdidas y ganancias de calor, así como la velocidad de inyección que deben de considerarse en cada uno de ellos.

Tabla 1. Tabla de constantes mecánicas.

Símbolo	Unidades	PLA	ABS
A	m^2	0.0001130	0.0001130
e	m	0.0001	0.0001
C_p	$J/kg \cdot ^\circ K$	1800	1240
ρ	kg/m^3	1250	1205
K	$W/m \cdot ^\circ K$	0.13	0.17
T_a	$^\circ K$	298.15	298.15
$\dot{m}$	kg/s	0.0003141	0.0003028
Q^*	m^3/s	0.000002513	0.000002513

Tabla 2. Parámetros de velocidad y temperatura del material PLA conforme al diámetro.

PLA					
D (mm)	T_d ($^\circ C$)	V (mm/seg)	Q (J/s)	t (seg)	$\dot{Q}$ (watts)
0.1	185	8	26.0	1.106	-23.5040
0.2	188	10	26.5	1.106	-23.9447
0.3	193	15	27.3	1.106	-24.6792
0.4	195	20	27.6	1.105	-24.9730
0.5	204	40	29.1	1.106	-26.2951
0.6	211	60	30.2	1.105	-27.3234
0.7	216	80	31.0	1.104	-28.0579
0.8	220	100	31.7	1.106	-28.6455
0.9	223	120	32.1	1.103	-29.0862
1	227	130	32.9	1.108	-29.6738

3. DISEÑO DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN

El diseño de un mecanismo de diámetro variable cumplió con las necesidades y condiciones el proyecto para ser un prototipo útil en las pruebas de impresión.

Tabla 3. Parámetros de velocidad y temperatura del material ABS conforme al diámetro.

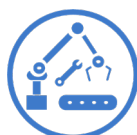
ABS					
D (mm)	T_d ($^\circ C$)	V (mm/seg)	Q (J/s)	t (seg)	$\dot{Q}$ (watts)
0.1	215	8	30.9	0.846	-36.4990
0.2	218	10	31.3	0.844	-37.0753
0.3	220	15	31.7	0.846	-37.4595
0.4	223	20	32.1	0.843	-38.0358
0.5	229	40	33.1	0.844	-39.1884
0.6	233	60	33.8	0.845	-39.9568
0.7	235	80	34.1	0.845	-40.3410
0.8	240	100	34.9	0.845	-41.3015
0.9	242	120	35.2	0.844	-41.6857
1	245	130	35.7	0.844	-42.2620

Estas especificaciones van desde la necesidad de un cambio de diámetro rápido y sin cortar el trabajo de la máquina, de preferencia de forma automática o manual, y por ningún motivo tener atascamientos o desborde de material dentro del mecanismo.

Uno de los mecanismos aptos para este trabajo fue el mecanismo iris, este mecanismo cuenta con un movimiento de apertura y cierre radial centrado, su apertura o cierre es limpio y puede pasar un flujo de material a través de su centro, ver Figura 5. Un flujo de luz es el que se utiliza naturalmente en este sistema, ya que es utilizado en el área de la fotografía), por lo que el mecanismo iris fue el mecanismo ideal para su modificación en el área de la manufactura aditiva.



Figura 5. Representación del movimiento de la pupila a un plano digital.



Dentro del obturador de una cámara fotográfica se encuentra el sistema iris, este cuenta con tres piezas las cuales realizan el movimiento principal de cierre y apertura, ver Figura 6.

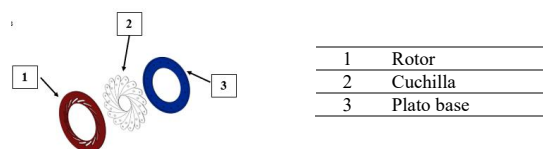


Figura 6. Partes que conforman el mecanismo de iris.

El sistema cuenta con el rotor el cual es el encargado de recibir el movimiento de entrada, el cual, es transmitido a las cuchillas; la mayoría de estos mecanismos cuenta con un total de doce cuchillas, ver Figura 7.

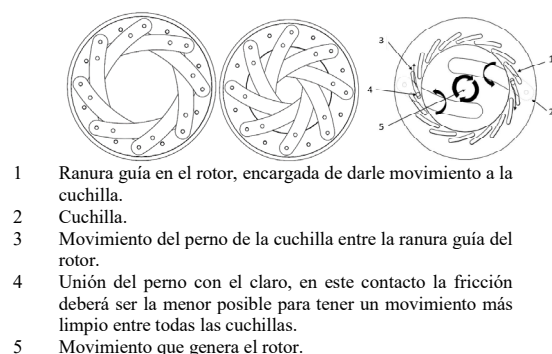


Figura 7. Movimiento natural de las cuchillas.

En la Figura 8 se muestran las tres piezas en las que fueron aplicadas las distintas etapas de rediseños, dos de las más importantes son el movimiento natural de las cuchillas y la forma de la cuchilla. Esto es importante ya que se requiere manejar material fundido sobre ellas y el movimiento entre las cuchillas era angular lo que significa que las cuchillas se intercalan entre sí, con estos cambios las cuchillas generan un movimiento traslacional y tangencial entre ellas.

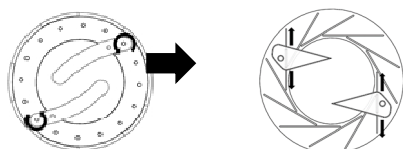


Figura 8. Nuevo movimiento natural de las cuchillas.

Para determinar el buen funcionamiento de los rediseños de las tres piezas se realizaron tres prototipos. Las especificaciones generales para el sistema de diámetro variable son presentadas en la Figura 9, indican los nombres de dichos componentes.

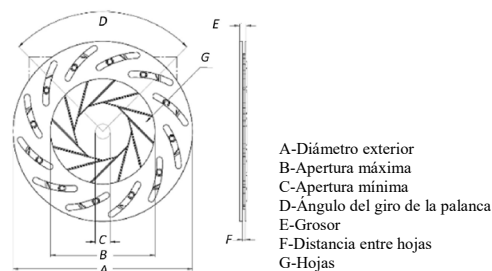


Figura 9. Especificaciones del sistema.

Prototipo 1. Este prototipo cuenta con un total de seis piezas que lo conforman. En el mecanismo las tres piezas principales fueron adaptadas de tal forma que mantuvieran su función en una estabilidad estructural correcta presentada en la Figura 10. Esta prueba proporcionó por primera vez la relación de posición y ajuste que tienen las piezas tras ser modificadas. El prototipo 1 fue fabricado totalmente en plástico ABS por lo que es 100% replicable en una impresora 3D.



Figura 10. Prototipo 1.

Prototipo 2. Este prototipo fue realizado para determinar el comportamiento de las cuchillas con el rotor, esto para verificar si las cuchillas realizaban un buen movimiento tangencial entre ellas o producían atascamientos o tambaleo entre el rotor y el plato base, una vez que se verificó este movimiento se realizaron inspecciones generales como: el contacto que generaba el rotor con las cuchillas, los trabamientos que podía generar el rotor con respecto a la base, y el movimiento traslacional que generaba cada cuchilla sobre las ranuras del plato base. Estas pruebas fueron fundamentales para realizar el prototipo 3. El prototipo 2 fue fabricado sobre madera véase en la Figura 11, esto para reducir costos y tener un mayor detalle a una escala de 5:1.



Figura 11. Prototipo 2.

Prototipo 3. Este prototipo fue realizado en material de aluminio, ver Figura 12, el cual busca verificar que el ensamble es correcto, el acople con el bloque calentador no genere fallas de sobredimensionamiento excesivo dentro de la impresora 3D y no presente fugas de material entre sus uniones.



Figura 12. Prototipo final de diámetro variable.

En la Figura 13 se observa el prototipo de la versión final, con este prototipo fueron realizadas distintas pruebas de impresión y el ajustamiento del cero pieza (HOME) de la impresora 3D. Se compara con las dimensiones de una boquilla comercial, esto por no contar con el equipo o recurso económico para hacer una boquilla más compacta.

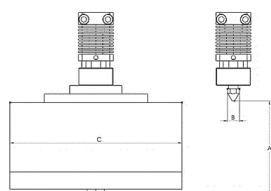


Figura 13. Diferencia de grosor y la altura del mecanismo vs. una boquilla estándar.

4. RESULTADOS

El prototipo final o prototipo 3, fue maquinado sobre aluminio 6061 (véase en la Figura 14). Este material cuenta con las características necesarias para trabajarlo dentro del sistema de extrusión de la impresora 3D, ya que tiene una conductividad térmica (0 a 100°C): temple T6: 167 W/m°C y una baja densidad. En la Figura 15 se presenta dos diámetros de 0 y 1 mm, del mecanismo de diámetro variable.



Figura 14. Piezas maquinadas para el prototipo final.

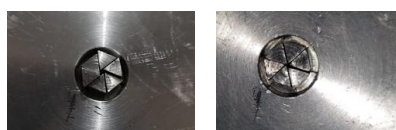


Figura 15. Mecanismo de iris en diámetros de 0 y 1 mm.

El tiempo de espera que tuvo el mecanismo de diámetro variable al alcanzar las temperaturas de fusión del material, es de un tiempo de espera que supera el 334% del tiempo a comparación de una boquilla comercial. Para los resultados de simulación del mecanismo de diámetro variable, la potencia calorífica (watts) se tiene que el coeficiente de convección es de 6.8 y se utiliza una temperatura ambiente de 25°C presentada en la Figura 16.

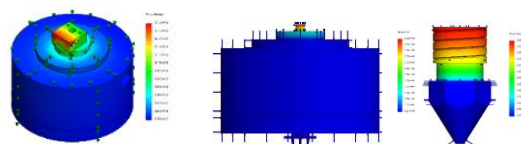


Figura 16. Resultados de simulación térmica del mecanismo.

En las tablas 4 y 5 se muestran los resultados obtenidos por cada uno de los once diámetros que se utilizaron (0.0 a 1.0 mm), estos resultados demostraron el correcto comportamiento del sistema con respecto al calentamiento del mecanismo en general, la única desventaja que se encontró fue el tiempo en que le toma al mecanismo alcanzar la temperatura deseada para cada diámetro, este tiempo toma de una a una hora y media en calentarse, lo que en tiempos de preparación es muy bajo su rendimiento, al momento de que el mecanismo alcanza sus temperaturas ideales para fusionar el material el cambio de diámetro o de pieza a fabricar es imperceptible, ya que el calor dentro del mecanismo no se disipa tan rápida.

Tabla 4. Resultados de simulación de calentamiento del mecanismo para el material ABS.

Diámetro (mm)	Temperatura ambiente (°K)	Temperatura deseada (°K)	Energía requerida (Watts)	Tiempo (s)
0	298.15	0	0	0
0.1	298.15	488.15	30.9	5571.43
0.2	298.15	491.15	31.3	5587.08
0.3	298.15	493.15	31.7	5573.75
0.4	298.15	496.15	32.1	5588.97
0.5	298.15	502.15	33.1	5584.37
0.6	298.15	506.15	33.8	5575.95
0.7	298.15	508.15	34.1	5580.03
0.8	298.15	513.15	34.9	5581.94
0.9	298.15	515.15	35.2	5585.85
1	298.15	518.15	35.7	5583.76

Se realizaron pruebas de impresión con diferentes diámetros de boquilla. Las pruebas de tiempo de impresión por cada centímetro cuadrado se realizaron con cuatro diámetros distintos de boquillas estándares, 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 milímetros.

Tabla 5. Tiempos de fabricación de cubos de 10 mm³

Boquilla de prueba	Boquilla (mm)	Duración de trabajo (min)
	0.8	09:34
	0.6	12:18
	0.4	13:24
	0.2	14:05

Se realizaron pruebas de impresión de un cubo de diez mm³ por cada diámetro de extrusión del mecanismo y de la boquilla estándar. Los tres diámetros asignados para para pruebas de extrusión fueron: 0.2, 0.4 y 0.8 milímetros, como se muestra en la tabla 6.

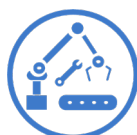


Tabla 6. Impresión de un cubo de 10 mm³ en ABS

Diámetro de boquilla	Mecanismo	Boquilla
0.2 mm		
0.4 mm		
0.8 mm		

Se puede observar de la tabla 6 que la calidad de impresión con el mecanismo de diámetro variable es similar al de una boquilla estándar, esto sin contar que la manufactura ni el tamaño es el adecuado. Lo cual, en una impresora 3D, puede ayudar a minimizar el tiempo y mejorar la calidad, al cambiar de diámetro en la impresión de una pieza.

Al desmontar las piezas del mecanismo después de someterlo a pruebas de impresión, se realizó una revisión general del mismo, este proceso se llevó a cabo con el fin de identificar desbordamiento de material fundido en alguna de las zonas presentado en la Figura 17.



Figura 17. Visualización del mecanismo por desbordamiento de filamento.

4. CONCLUSIONES

Diversos trabajos se han enfocado a diseñar y rediseñar sistemas de extrusión para las impresoras 3D, estos trabajos se han destacado por mostrar distintas modificaciones para los sistemas de extrusión, como el uso de un doble extrusor capaz de aplicar colores distintos a objetos o ampliar su aplicación a la fabricación de dos objetos al mismo tiempo y la modificación general del sistema de extrusión para imprimir otro tipo de materiales.

El mecanismo de diámetro variable reportado en este artículo, logró igualar a la extrusión de plástico de una boquilla estándar de una impresora 3D. Para determinar los parámetros necesarios para lograr el funcionamiento del diseño de la boquilla, se realizaron tres pruebas experimentales de funcionamiento. Estas pruebas se llevaron a cabo con la finalidad de evaluar el nivel de funcionalidad de la boquilla y los problemas que presentaba en cuanto al desbordamiento de material y a su vez evaluar la funcionalidad del uso de una boquilla de diámetro variable con respecto al uso de boquillas de diferentes diámetros. De acuerdo con el mecanismo propuesto, estos pasos para cambiar boquillas se eliminan. Solamente se tuvo que reajustar el diámetro y continuar

trabajando en su normalidad; el mecanismo cuenta con dos sistemas de calibración ya sea por medio electrónico o manual, en este caso se realizó de forma manual lo que ocasionó un tiempo muerto de la máquina al calibrar un nuevo diámetro, de forma electrónica no requiere de algún tiempo muerto ya que podría hacerlo incluso manufacturando la pieza.

Queda como trabajo futuro modificar la programación del código para que se considere diámetros diferentes, dependiendo de la pieza a manufacturar; en detalles, un diámetro menor, en partes que se tengan que rellenar, un diámetro medio o grande.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo brindado por el Tecnológico Nacional de México/CENIDET.

REFERENCIAS

- [1] I. Gibson, D. Rosen and B. Stucker, Additive manufacturing technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, 2nd ed. Springer-Verlag Nueva York, 2015, pp. 1-498.
- [2] C. Wick, J. T. Benedict y R. F. Veilleux, de Tool and manufacturing engineers handbook, Fourth Edition ed., vol. 2, S. o. M. Engineers y E. S. (. d. j. d. 1986), Edits., 1984, p. 840.
- [3] P. Dudek, «FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements,» Archives of metallurgy and Materials, vol. 58, n° No 4 December, p. 4, 20 September 2013.
- [4] I. Valls Pepió y D. Blay Pozo, «Impresora 3D de resina por estereolitografía,» Cataluña, 2018.
- [5] T. Yao, "A novel generalized stress invariant-based strength model for inter-layer failure of FFF 3D printing PLA material", Elsevier, no. 193, p. 4, 2020.
- [6] A. Albara, M. Chougan, M. Al-Kheetan, M. Rafiq Swash and S. Hamidreza Ghaffar, "Effective extrusion-based 3D printing system design for cementitious-based materials", Elsevier, no. 6, p. 4, 2020.
- [7] J. Yuan Lee, J. An and C. Kai Chua, "Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials", Elsevier, no. 7, p. 4, 2020.
- [8] J. Francois Agassant, F. Pigeonneau, L. Sardo and M. Vincent, "Flow analysis of the polymer spreading during extrusion additive manufacturing", Elsevier, no. 29, p. 10, 2019.
- [9] B. M. Boyle, P. T. Xiong, T. E. Mensch, T. J. Werder and G. M. Miyake, "3D Printing Using Powder Melt Extrusion", Elsevier, no. 29, p. 5, 2019.
- [10] T. Bergman, A. Lavine, F. Incropera and D. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer. New York: Wiley, 2017.
- [11] Y. Cengel, J. Perez Castellanos and J. Enriquez Brito, Transferencia de calor y masa. México: Mcgraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V., 2007.



Diseño conceptual y análisis del desplazamiento angular de un banco de pruebas para prótesis de cadera

Emmanuel Resendiz Sosa*, Edgar Ernesto Vera Cárdenas*, Nayeli Camacho Tapia**, Marisa Moreno Ríos*

*Instituto Tecnológico de Pachuca, México (m19201348@pachuca.tecnm.mx)

*Instituto Tecnológico de Pachuca, México (edgar.vc@pachuca.tecnm.mx)

**Centro de Ingeniería y Desarrollo Industria(nayeli.camacho@cidesi.edu.mx)

*Instituto Tecnológico de Pachuca, México (marisa.mr@pachuca.tecnm.mx)

Resumen: Este trabajo presenta una metodología de diseño aplicada a un banco de pruebas de desgaste para prótesis de cadera. Esta metodología permitió definir los objetivos de diseño y obtener un diseño preliminar que supera los requerimientos solicitados por el cliente. Se utilizó SOLIDWORKS®, un software CAD para crear los dibujos conceptuales del banco de pruebas y también para hacer un análisis del desplazamiento angular de mecanismos del banco de pruebas. Se validó el diseño verificando que cumpla con los requerimientos por parte del cliente y aquellos definidos en la norma ISO 14242-1. Finalmente, se presenta el diseño conceptual y diseño de detalle del banco de pruebas.

Palabras Clave: Metodología de diseño, banco de pruebas, prótesis de cadera, desgaste.

Abstract: This paper presents a methodology applied to the design of a wear test bench for hip prostheses. This methodology allowed to define the design objectives and obtain a preliminary design and that overcome the requirements requested by the client. SOLIDWORKS® CAD-Computer-Aided-Design software was used to draw the first sketches of the bench. The design was validated verifying that it complies with the requirements of the client and meets the specifications of the ISO 14242-1 standard. Finally, the conceptual design and detail design of the test bench is presented.

Keywords: Design methodology, test bench, hip prosthesis, wear.

1. INTRODUCCIÓN

La artroplastia total de cadera es un procedimiento quirúrgico, dinámico en evolución. La tecnología moderna e instrumentación junto con los métodos quirúrgicos estandarizados se unen para hacer que este procedimiento reconstructivo en pacientes severamente discapacitados sea altamente predecible y efectivo en términos de costos (W. Bucholz, 2014). El éxito del reemplazo de cadera por una prótesis, depende en su mayoría de la resistencia al desgaste del material de la prótesis. Los materiales empleados actualmente tienen una duración promedio de 12 a 15 años, en el mejor de los casos hasta 20 años, después de ese tiempo es necesario reemplazar la prótesis bajo el proceso quirúrgico, el cual es más invasivo para los pacientes debido principalmente al tiempo de recuperación (Zujur & Álvarez-Barreto, 2016). Ensayos de desgaste se realizan empleando diversos bancos de pruebas, dichos simuladores existen en el mercado, sin embargo, no es tan sencillo contar con ellos desde el punto de vista económico. Algunos simuladores cuestan alrededor de 100 mil dólares, lo cual hace muy difícil su adquisición. Entre los bancos comerciales existen dos marcas que lideran, ENDOLAB® e INSTRON®. En México, algunos desarrollos de simuladores incluyen el “Simulador para Pruebas de Fatiga en Hemiprótesis de Cadera bajo la

Norma ISO 7206” realizado por el Instituto Tecnológico de Celaya (Rico Baeza, Lesso Arroyo, & Orozco Mendoza, 2017), y otro es una patente con el nombre de “Máquina tribológica para medir el desgaste en materiales utilizados para prótesis de cadera” (Reynoso García, 2016). El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar una metodología de diseño de un banco de pruebas de desgaste para prótesis de cadera y hacer un análisis cinemático de los mecanismos obtenidos a partir del diseño conceptual, basado en los parámetros de la norma ISO 14242-1 (International Estándar ISO 14242-1 Implants for surgery – Wear of total hip-joint prostheses – Part 1: Loading and displacement parameters for wear-testing machines and corresponding environmental condition for test., 2009), la cual se enfoca en el estudio de la resistencia al desgaste del componente. Para el desarrollo del banco, se empleó la metodología de diseño en ingeniería propuesta por Nigel Cross en su libro “Métodos de diseño” (Nigel, 2002), la cual ayudó a hacer un diseño sistemático que permitió alcanzar los requisitos para realizar ensayos de desgaste a materiales para prótesis de cadera bajo una norma internacional.

1.1. Movimientos de la articulación de cadera

La articulación de cadera tiene tres rotaciones con diferentes rangos de movimiento. A continuación, se



indica de manera simple cada uno de los movimientos y se ilustran en la Fig. 1 (Kapandji, 2012).

- Flexión: movimiento que provoca el contacto de la cara anterior del muslo con el tronco.
- Extensión: movimiento que conduce al miembro inferior por detrás del plano frontal.
- Abducción: movimiento que conduce al miembro inferior en dirección hacia fuera y lo aleja del plano de simetría del cuerpo.
- Aducción: El movimiento de aducción pura no existe como tal, se conoce como aducción relativa, debido a que cuando ambos miembros se encuentran en abducción y se conducen hacia adentro es cuando ocurre una aducción.
- Rotación externa e interna: El movimiento de rotación externa se da cuando se rota la punta del pie hacia afuera, la rotación interna ocurre lo contrario, la punta del pie se conduce hacia adentro.

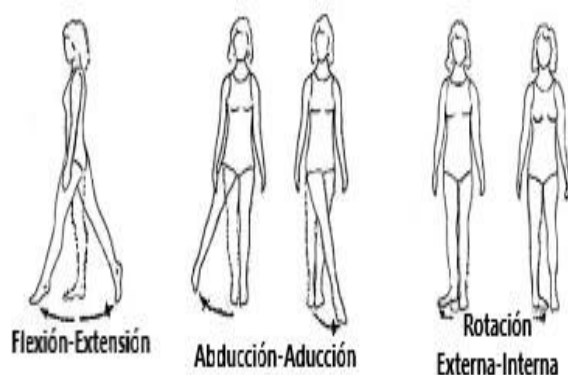


Fig. 1. Movimientos de la articulación de cadera.

2. DESARROLLO

1.2. Metodología de diseño

En el desarrollo de la metodología de diseño se empleó el método de Nigel Cross (Nigel, 2002) y se estructura como se muestra en la Fig. 2.

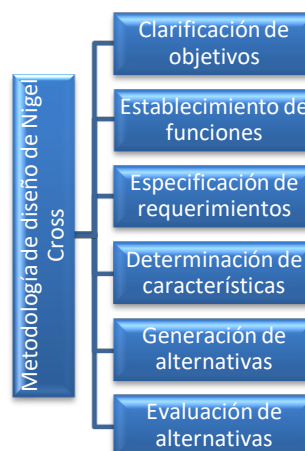


Fig. 2. Etapas de diseño de la Metodología de Nigel Cross.

A continuación, se presenta una descripción de cada una de las etapas de la metodología.

2.1.1 Clarificación de objetivos

En esta primera etapa se presenta el objetivo general y los sub-objetivos, se muestran a través del diagrama denominado “árbol de objetivos”, donde se captura las principales necesidades requeridas como se muestra en la Fig. 3.



Fig. 3. Árbol de objetivos.



2.1.2 Establecimiento de funciones

En esta segunda etapa se presenta un sistema denominado “caja negra” Fig. 4, que contiene todas las funciones necesarias para que ciertas “entradas” se conviertan en “salidas” deseadas. Obteniendo lo anterior, se desarrolla un modelo denominado “caja transparente” Fig. 5, que permite visualizar la relación entre las “entradas” y las “funciones” y estas, a su vez, con las “salidas”.

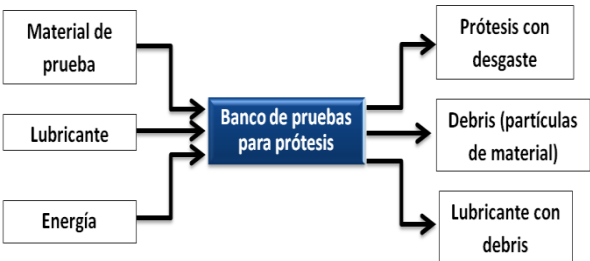


Fig. 4. Caja negra.

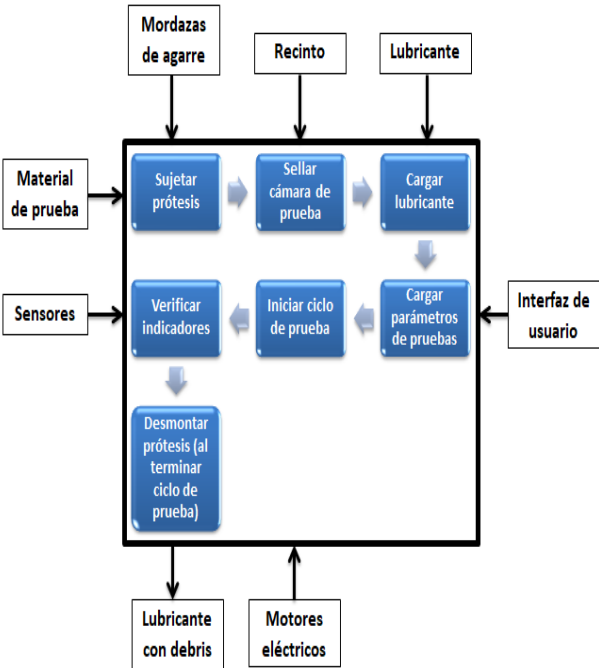


Fig. 5. Caja transparente.

2.1.3 Especificación de requerimientos

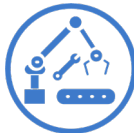
En esta tercera etapa se definen los requerimientos necesarios sobre el funcionamiento y desempeño del banco de pruebas. Estos requerimientos se dividieron en nueve partes como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Requerimientos establecidos.

Características	Requerido	Deseado
1 Características generales :		
Pruebas de prótesis en seco	X	
Pruebas de prótesis lubricadas	X	
Pruebas con temperatura controlada	X	
Sistema fijo	X	
Tener más de dos estaciones de trabajo		X
2 Condiciones de trabajo:		
Bajo normas ISO	X	
Tiempo de set up bajo (preparación)	X	
Variación de movimientos de articulación de cadera	X	
Capaz de producir desplazamientos angulares de acuerdo a norma	X	
Variación de carga aplicada		X
Control de flujo del lubricante	X	
Control de temperatura	X	
Fácil operación	X	
3 Capacidad de estación de trabajo:		
Contar con depósito para lubricante	X	
4 Velocidad de Pruebas :		
Operar a frecuencia de 1 Hz (+/- 0.1Hz)	X	
5 Características de componentes :		
Materia prima comercial	X	
Fácil adquisición	X	
6 Seguridad:		
Botón de paro de emergencia	X	
Sistema de protección para alguna sobre carga de energía	X	
Guarda de seguridad para motores	X	
7 Mantenimiento:		
Mínimo y sencillo		X
Facilidad para encontrar refacciones	X	
8 Ergonomía y estética :		
Agradable a la vista		X
Facilidad en cambiar muestras	X	
9 Precio:		
Costo bajo en comparación de otras máquinas comerciales		X

2.1.4 Determinación de características

En esta cuarta etapa se recurre al método del despliegue de la función de calidad (QFD por sus siglas en inglés) para determinar las características del banco de pruebas, con la finalidad de obtener una “matriz de la calidad” basada en la etapa anterior y aunada a los requerimientos de ingeniería que implica el diseño del banco de pruebas, dicha matriz se muestra en la Fig. 6.



Con relación Sin relación		Control de temperatura	Control de fuerza	Control de velocidad	Capacidad de trabajo	Seguridad	Materiales	Mantenimiento
Características generales	Pruebas de prótesis en seco	X	■	■	X	X	■	X
	Pruebas de prótesis lubricadas	■	■	■	X	X	■	X
	Pruebas con temperatura controlada	■	■	■	X	X	■	X
	Sistema fijo	X	X	X	X	■	X	X
	Tener una estación	X	X	X	■	X	X	■
Condiciones de trabajo	Tener más de dos estaciones de trabajo	X	X	X	■	X	X	■
	Bajo normas ISO	■	■	■	X	X	■	X
	Tiempo de set up bajo (Preparación)	X	X	X	■	X	X	X
	Variación de movimientos de articulación de cadera	X	X	X	■	X	X	X
	Capaz de producir desplazamientos angulares de acuerdo a norma ISO	X	X	X	■	X	X	X
Capacidad de estación	Variación de carga aplicada	X	■	■	■	X	X	X
	Control de flujo del lubricante	■	X	X	■	X	X	■
	Fácil operación	■	■	■	X	X	X	X
	Una prótesis por prueba	X	X	X	■	X	X	X
	Recinto capaz de aislar prueba	X	X	X	■	X	X	X
Velocidad de Pruebas	Operar a frecuencia de 1 Hz (+/- 0.1Hz)	X	X	■	■	X	X	■
	Material comercial	X	X	X	X	X	■	X
	Fácil adquisición	X	X	X	X	X	■	■
	Botón de paro de emergencia	X	X	X	X	■	X	X
	Sistema de protección para alguna sobre carga de energía	X	X	X	X	■	X	X
Seguridad	Mínimo y sencillo	X	X	X	X	X	X	■
	Facilidad para encontrar refacciones	X	X	X	X	X	X	■
	Agradable a la vista	X	X	X	X	X	X	X
	Facilidad en cambiar muestras	X	X	X	■	X	X	X
	Costo bajo en comparación de otras máquinas comerciales	X	X	X	■	X	■	X
Con relación		■	Sin relación		X			

Fig. 6. Matriz de la calidad.

2.1.5 Generación de alternativas

En esta quinta etapa se generó una serie de soluciones alternativas de diseño para el banco de pruebas las cuales se muestran en la Tabla 2. En dicha tabla se identificaron combinaciones novedosas de medios que podrían generar una solución, sin embargo, esto se determina en la

siguiente etapa, donde se da una ponderación a dichos medios.

Tabla 2. Posibles combinaciones de medios de solución.

Soluciones	A	B	C
Funciones			
Sujetar prótesis	Mordaza mecánica	Pinza neumática	Abrazadera
Sellar cámara de prueba	Tapa de silicona	Tapa roscada	Tapa con bisagra
Cargar lubricante	Bomba de agua	Sistema de control de flujo	Llenar manualmente por operador
Cargar parámetros de prueba	Interfaz de usuario	Display LCD	Interfaz en un Smartphone
Inicio de ciclo de prueba	Motorreductor DC	Motor DC con opto acoplador	Motor a pasos
Verificar indicadores	Sensor de temperatura	sensor de proximidad	Sensor de temperatura y humedad
Desmontar prótesis	Accionar mecanismo para desapretar tornillo sin fin	Desactivar pinza neumática	Usar llaves Allen

2.1.6 Evaluación de alternativas

En esta sexta etapa se evaluó las alternativas de solución, se ponderó cada una de las soluciones de la etapa anterior. Posteriormente se calculó y comparó los valores de utilidad de los diseños alternativos. Con esto se obtiene una calificación, la que fue más alta en comparación con las demás fue seleccionada, esto se muestra en la Tabla 3.



Tabla 3. Selección de alternativas de solución.

Peso	Funciones	Parámetro	A			B			C		
			Magnitud	Calificación	Valor	Magnitud	Calificación	Valor	Magnitud	Calificación	Valor
0.2	Sujetar prótesis	Fijar espécimen	Fuerza de agarre y tiempo	8	1.6	Fuerza de agarre	5	1	Fuerza de agarre	8	1.6
0.2	Sellar cámara de prueba	Aíslar ensayo del ambiente	Contaminación de agentes externos	7	1.4	Contaminación de agentes externos	7	1.4	Contaminación de agentes externos	6	1.2
0.2	Cargar parámetros de prueba	Parámetros bajo norma ISO	Cumplir con indicaciones de la norma	9	1.8	Cumplir con indicaciones de la norma	6	1.2	Cumplir con indicaciones de la norma	7	1.4
0.1	Inicio de ciclo de prueba	Accionar movimientos biomecánicos	Precisión de ángulos de movimiento	8	0.8	Precisión de ángulos de movimiento	8	0.8	Precisión de ángulos de movimiento	5	0.5
0.2	Verificar indicadores	Condiciones operativas del ensayo	Temperatura, cantidad de lubricante.	6	1.2	Temperatura, cantidad de lubricante.	6	1.2	Temperatura, cantidad de lubricante.	6	1.2
0.1	Desmotar prótesis	Retirar espécimen de cámara de pruebas	Tiempo Y facilidad	6	0.6	Tiempo	8	0.8	Tiempo	6	0.6
			Σ=7.4			Σ=6.4			Σ=6.5		

3. RESULTADOS

3.1. Diseño conceptual del banco de pruebas

La Fig. 7 presenta un diseño conceptual del banco de pruebas obtenido a partir de la metodología de diseño de Nigel Cross. Cuenta con dos pares de entrada y cada uno genera un movimiento de la articulación de cadera, el primer movimiento es “Abducción-Aducción” y el segundo es “Flexión-Extensión”, cuenta con tres recintos para contener el lubricante donde la prótesis es sumergida, así como tres sistemas para generar la fuerza de compresión entre los componentes de las prótesis, cuenta con la estructura base de todo el banco de pruebas. Todos estos componentes se establecieron en la etapa de “especificación de requerimientos” de la metodología de diseño.

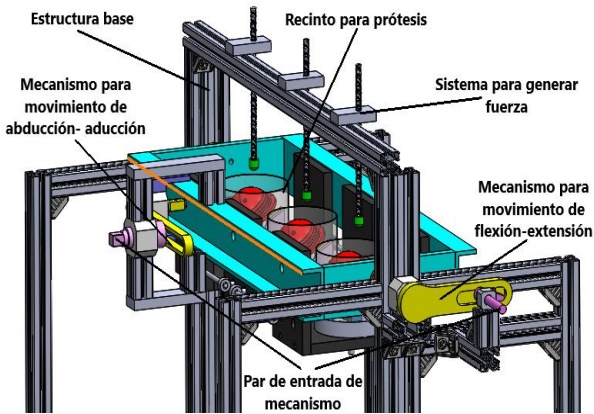


Fig. 7. Ensamble de diseño conceptual del banco de pruebas.

3.2. Mecanismos para generar los movimientos biomecánicos

La norma ISO 14242-1 en el apartado No. 6.5 “sistema de control de movimientos”. Indica los movimientos angulares del componente femoral y la precisión del ángulo que debe generar dichos movimiento (+/- 3°). A continuación en la Fig. 8 se muestra el gráfico de la variación del movimiento del componente femoral que indica esta norma.

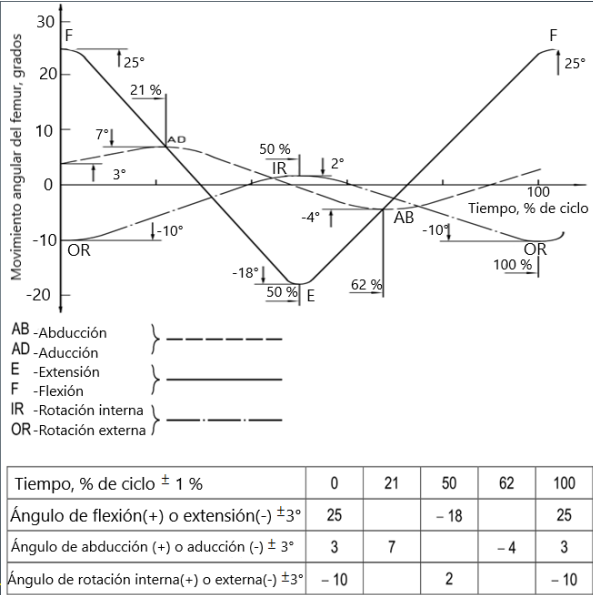
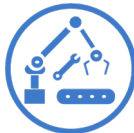


Fig. 8. Variación del movimiento angular del componente femoral.



3.2.1. Mecanismo para el movimiento de Abducción-Aducción y cinemática

Este mecanismo tiene la característica de generar un movimiento armónico desfasado. Por lo tanto es de suma importancia la orientación de cada una de las piezas que lo componen. En la Fig. 9 se muestra el mecanismo y se indica una distancia que se le ha dado de 23.5 mm de una base respecto de la otra, esto permite el desfase que la norma indica.

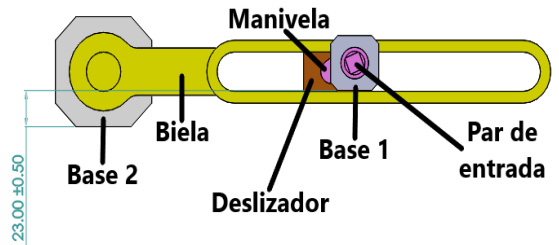


Fig. 9. Ensamble de mecanismos para movimiento de Abducción-Aducción.

Se presenta un análisis de movimiento del mecanismo que se realizó con el complemento *Motion* del software *SOLIDWORKS®*, el análisis permite obtener el valor de variables de desplazamiento, velocidad y aceleración angular o lineal. Se analizó el desplazamiento angular del deslizador que se muestra en la Fig. 9 para conocer el rango de movimiento en grados. A continuación se muestra en la Fig. 10 a) el gráfico la norma ISO 14242-1 del movimiento. En la Fig. 10 b) se muestra la gráfica del desplazamiento del mecanismo, al comparar los gráficos se observa que cumple con los grados de movimiento (7° a -4°) indicados en la norma, lo cual es un resultado satisfactorio.

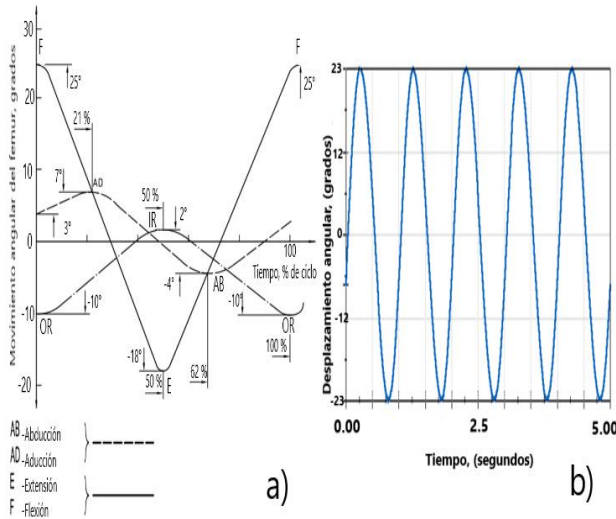


Fig. 10. a) Gráfica de la norma ISO 14242-1, b) Rango de movimiento del mecanismo simulado.

3.2.2. Mecanismo para el movimiento de Flexión-Extensión y cinemática

Este mecanismo tiene la característica de generar un movimiento armónico no desfasado. Aunque es similar al anterior, hay una diferencia en la orientación de las piezas, ya que los centros de las bases están alineados como se muestra en la Fig. 11. Esto quiere decir que no fue necesaria una distancia para lograr la simetría del movimiento.

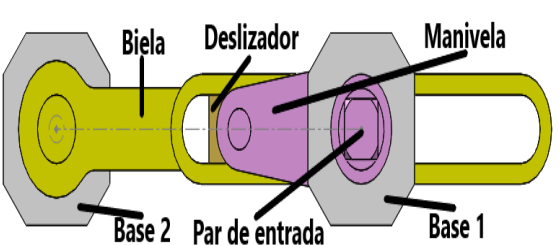


Fig. 11. Ensamble de mecanismos para movimiento de Flexión-Extensión.

A continuación se muestra el análisis del desplazamiento del mecanismo. En la Fig. 12 a) se muestra el gráfico la norma ISO 14242-1 del movimiento. En la Fig. 12 b) se muestra el análisis del desplazamiento del mecanismo, se observa que al comparar los gráficos cumple con los grados de movimiento (23° a -23°) indicados en la norma, lo cual es un resultado satisfactorio.

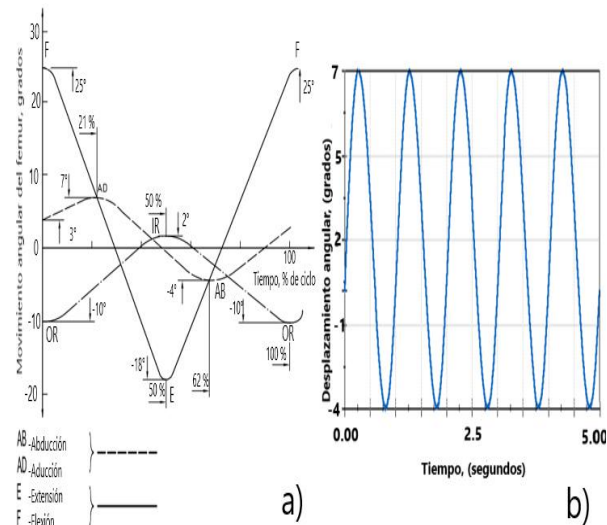


Fig. 12. a) Gráfica de la norma ISO 14242-1, b) Rango de movimiento del mecanismo simulado.

3.3. Diseño de detalle

En este apartado se muestra el proceso para el diseño a detalle de elementos del banco de pruebas que se considera

están sometidos a esfuerzos críticos como son los ejes de transmisión, los rodamientos y pernos. En esta etapa del diseño ya se proponen medidas y tipo de material para los diferentes componentes modelados en la etapa de diseño conceptual.

3.3.1. Diseño de ejes

En el diseño de los ejes se calculó el diámetro permisible de manera analítica y posteriormente se validó el resultado, analizando el modelo CAD del eje que se muestra en la Fig. 13 mediante un análisis de elemento finito.

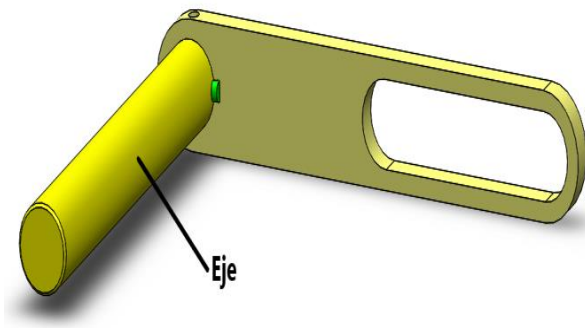


Fig. 13. Trazado de esfuerzos Von Mises en el eje.

A continuación se muestra las ecuaciones utilizadas y los valores de los cálculos.

$$d = 2 \times \sqrt[3]{\frac{2 \times T}{\pi \times \tau_{max}}} \quad (1)$$

Siendo d el diámetro del eje (m), τ_{max} el esfuerzo cortante máximo de operación del material (Mpa) y T el torque (N-m).

$$\tau_{max} = \frac{\tau_{ultimo}}{F_s} \quad (2)$$

Siendo F_s el valor del factor de seguridad, τ_{ultimo} el esfuerzo cortante ultimo del material (Mpa).

$$T = F \times Distancia \quad (3)$$

Siendo F la fuerza (N).

A continuación se muestran los datos utilizados para los cálculos.

- $F_s = 2$
- $\tau_{ultimo} = 731 \text{ Mpa}$. Acero AISI 4130
- $F = 9810 \text{ N}$

A continuación se muestran los resultados obtenidos.

$$\tau_{max} = \frac{1110 \text{ Mpa}}{2} = 555 \text{ Mpa}$$

$$T = 9810 \text{ N} \times 0.15 \text{ m} = 1471.5 \text{ Nm}$$

$$d = 2 \times \sqrt[3]{\frac{2 \times 1471.5 \text{ Nm}}{\pi \times 555 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}} = 0.023 \text{ m} = 23 \text{ mm}$$

Finalmente se elige la dimensión de barra redonda comercial de 25.4 mm o 1 pulgada.

A continuación se muestra el análisis de elemento finito que se hizo para validar la geometría del eje.

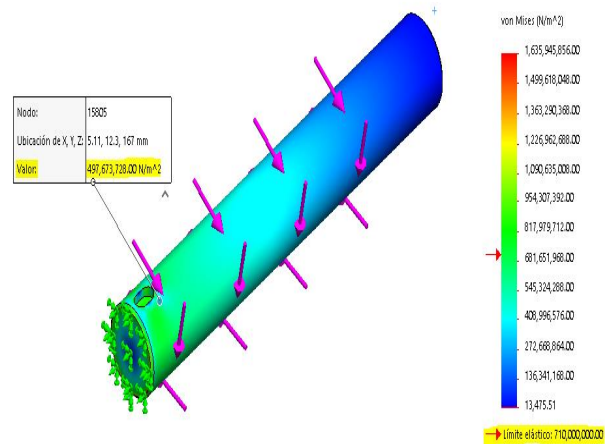


Fig. 14. Trazado de esfuerzos Von Mises en el eje.

Se observa en la Fig. 14 que el valor máximo de tensiones es de 497 Mpa, lo cual indica que está dentro de la zona elástica del material, siendo su valor de límite elástico 710 Mpa.

A continuación se muestra en la Fig. 15 el trazado de factor de seguridad del eje. Se observa que el valor obtenido en un punto crítico del eje es de 2.3, lo cual es un valor aceptable ya que el valor propuesto en los cálculos analíticos es de 2.

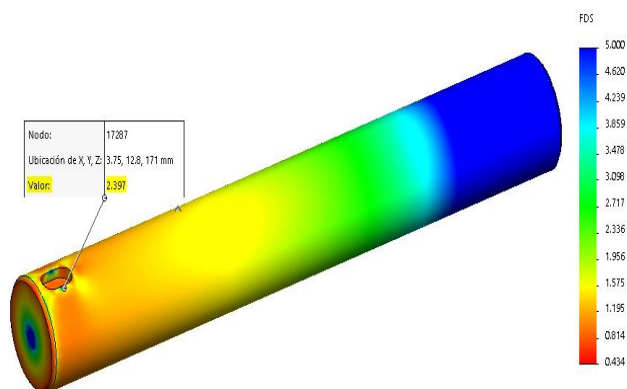


Fig. 15. Trazado de esfuerzos Von Mises en el eje.



3.3.2. Cálculo de rodamientos

Para seleccionar el rodamiento más adecuado, se hace partiendo de conocer el diámetro del eje y de conocer criterios para utilizar algún rodamiento en específico. Se elige de tablas comerciales un rodamiento rígido de bolas debido a las prestaciones que ofrece y a que cumple con los requerimientos del banco de pruebas.

A continuación se muestran los cálculos para conocer su vida nominal de operación.

Es un rodamiento de una hilera de bolas rígidas con un número de rodamiento de tabla RLS 8-. La confiabilidad deseada es del 90% y se supone que las condiciones de operación son muy limpias. La vida nominal se define por la siguiente ecuación:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \quad (4)$$

Siendo L_{10} la vida nominal, C capacidad de carga dinámica básica y P la carga radial de operación.

A continuación se muestran los datos utilizados para los cálculos.

- $C = 22.5 \times 10^3 \text{ N}$
- $P = 4500 \text{ N}$
- $n = 60 \text{ RPM}$

$$L_{10} = \left(\frac{22.5 \times 10^3 \text{ N}}{4500 \text{ N}}\right)^3$$

$$L_{10} = 125$$

En horas de funcionamiento:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L_{10} \quad (5)$$

Sustituyendo valores:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot 60} \cdot 125$$

$$L_{10h} = 34.72 \times 10^3 \text{ horas}$$

3.3.3. Cálculo de la resistencia de pernos

Para el cálculo de la resistencia de los pernos se parte de proponer una medida métrica del perno en base a experiencia y se valida su dimensión a través de iterar los cálculos con diferentes medidas de perno hasta cumplir ciertas condiciones.

La unión que se analizó se muestra en la Fig. 16, la cual se indica en un recuadro color rojo, la cual por simetría es posible hacer el análisis.

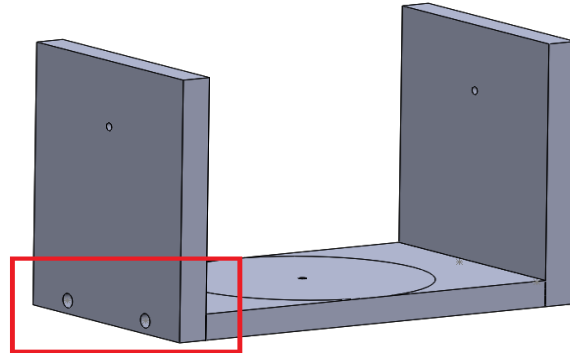


Fig. 16. Unión atornillada.

Se conoce que los pernos están sometidos a cortante directo, entonces, el esfuerzo cortante no debe ser mayor que el menor de los valores siguientes.

1. La resistencia a cortante del tornillo.
2. La resistencia a aplastamiento de la placa en la zona contigua al tornillo.

A continuación se muestran los datos de la unión atornillada.

- $FvEd = 732.72 \text{ N}$ (Cortante que actúa sobre la unión)
- $FtEd = 5731.7 \text{ N}$ (Esfuerzo de tracción que actúa sobre la unión)
- $As = 58 \text{ mm}^2$ (Área resistente del tornillo)
- $fub = 520 \text{ mm}^2$ (Tensión última a tracción del tornillo)
- $\gamma_{mb} = 1.25$ (Coeficiente parcial de seguridad para tornillos)
- $d = 10 \text{ mm}$ (Diámetro del tornillo)
- $t = 20 \text{ mm}$ (Espesor de la placa)
- $f_u = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ (resistencia a tracción del acero de la placa)
- $\alpha = \frac{fub}{fu}$ (Valor de una constante)
- $dm = 13 \text{ mm}$ (Valor del diámetro entre los círculos circunscritos e inscrito a la cabeza del tornillo)

Conociendo datos de la unión atornillada, se calcula la resistencia a cortante del perno con la ecuación (6).

$$FvRd = \frac{0.6 \times fub \times As \times 2}{\gamma_{mb}} \quad (6)$$

$$FvRd = 28954 \text{ N}$$

El valor del cortante que actúa sobre la unión debe ser inferior al valor de la resistencia a cortante calculada, es decir, se debe de cumplir la condición (7) para asegurar que no fallará la unión por cortante directo.

$$28954 \text{ N} > 732.72 \text{ N} \quad (7)$$

Conociendo lo anterior, se calcula la resistencia por aplastamiento con la f ecuación (8).



$$FbRd = \frac{2.5 \times \alpha f_a \times f_u \times d \times t}{y_{mb}} \quad (8)$$

$$FbRd = 208000 \text{ N}$$

El valor de la resistencia por aplastamiento debe ser mayor que el valor del cortante que actúa sobre la unión, es decir, se debe de cumplir la condición (9), para asegurar que no fallará por aplastamiento.

$$208000 \text{ N} > 732.72 \text{ N} \quad (9)$$

Aunque principalmente la unión está sometida a cortante directo, existe una fuerza de tracción que actúa de forma axial al perno, por lo tanto se calcula la resistencia a tracción del perno con la ecuación (10).

$$FtRd = \frac{0.9 \times f_{ub} \times A_s \times 2}{y_{mb}} \quad (10)$$

$$FtRd = 43430 \text{ N}$$

El valor de la resistencia a tracción del perno debe ser mayor que el valor del esfuerzo a tracción que actúa en la unión, es decir, se debe cumplir la condición (11), para asegurar que la unión no fallará por un esfuerzo tensional.

$$43430 \text{ N} > 5731.7 \text{ N} \quad (11)$$

Cuando un perno trabaja a tracción, también se debe comprobar el punzonamiento de la placa en contacto con la cabeza del perno, entonces, se calcula la resistencia de punzonamiento con la ecuación (12).

$$BpRd = \frac{0.6 \times \pi \times d_m \times t \times f_u}{y_{mb}} \quad (12)$$

$$BpRd = 94097 \text{ N}$$

El valor de la resistencia a punzonamiento debe ser mayor que el valor del esfuerzo de tracción que actúa en la unión, es decir, se debe cumplir la condición (13), para asegurar que la unión no fallará por un esfuerzo de punzonamiento en la cabeza del perno.

$$94097 \text{ N} > 732.72 \text{ N} \quad (13)$$

Finalmente cuando la unión está sometida de manera simultánea a esfuerzos cortantes y de tracción, se debe cumplir la condición (14), para validar que los pernos propuestos son adecuados para soportar las cargas.

$$\frac{FvEd}{FvRd} + \frac{FtEd}{1.4 \times FtRd} \leq 1 \quad (14)$$

$$\frac{732.72}{28954 \text{ N}} + \frac{5731.7 \text{ N}}{1.4 \times 43430 \text{ N}} \leq 1$$

$$0.12 \leq 1$$

4. CONCLUSIONES

- En diseño mecánico contar con una metodología de trabajo evita la pérdida de tiempo al momento de tomar decisiones de entre un gran número de opciones de posibles componentes, en este caso la metodología de Nigel Cross permitió seleccionar las mejores propuestas de una manera ordenada y bajo los requerimientos solicitados.
- Tener un diseño conceptual preciso permite llegar de manera más rápida a un diseño a detalle y posteriormente a un diseño final, debido a que en esta etapa se han superado diferentes filtros de conceptualización, a partir de esta etapa el diseñador hace uso de las herramientas computacionales que mejor domine.
- Los resultados obtenidos del diseño a detalle son satisfactorios porque se conoce que los esfuerzos no superan el límite de fluencia del material propuesto. El factor de seguridad propuesto para los análisis es aceptable porque se validó con el análisis de elemento finito para la pieza modelada.
- Al obtener los gráficos del desplazamiento de los mecanismos se pudo comprobar que la trayectoria y el rango del movimiento de cada uno de los mecanismos, cumple con lo que la norma ISO 14242-1 indica para que un banco de pruebas de prótesis de cadera pueda obtener resultados satisfactorios.

REFERENCIAS

- International Estándar ISO 14242-1 Implants for surgery – Wear of total hip-joint prostheses – Part 1: Loading and displacement parameters for wear-testing machines and corresponding environmental condition for test.* (2009). Recuperado el 13 de 1 de 2020, de <https://www.iso.org/standard/63073.html>
- Kapandji, A. (2012). *Fisiología Articular*. Editorial medica panamericana.
- Nigel, C. (2002). *Engineering desing methods*. BALDERAS 95, MÉXICO, D.F.: EDITORIAL U MUSA, S.A. DE C.V.
- Reynoso García, C. A. (2016). *Patente n° MX017166*. Guadalajara, México.
- Rico Baeza, G., Lesso Arroyo, R., & Orozco Mendoza, H. (2017). Desarrollo de un Simulador para Pruebas de Fatiga en Hemiprótisis de Cadera bajo la Norma ISO 7206. *MEMORIAS DEL XL CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA BIOMÉDICA* 76. MONTERREY, NUEVO LEÓN.
- W. Bucholz, R. (2014). Indicaciones, técnicas y resultados de reemplazo total de cadera en Estados Unidos. *Revista médica clínica Condes*, 5(25), 760-764.
- Zujur, D., & Álvarez-Barreto, J. (2016). Prótesis en artroplastia total de cadera y recubrimientos bioactivos de quitosano para. *Revista Ingeniería Biomédica*, 10(19), 33-43

